HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SEÑALES DE CAMPO ELÉCTRICO GENERADAS POR PULSOS BIPOLARES ANGOSTOS ASOCIADOS A RAYOS INTRANUBE

Monografía presentada por:
Samuel Leandro Jiménez Jiménez

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica
Bogotá D.C, Colombia
2022

HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SEÑALES DE CAMPO ELÉCTRICO GENERADAS POR PULSOS BIPOLARES ANGOSTOS ASOCIADOS A RAYOS INTRANUBE

Monografía presentada por:
Samuel Leandro Jiménez Jiménez

En cumplimiento de los requisitos para el grado de:
INGENIERO ELÉCTRICO

Director:
Prof. Dr.-Ing. Herbert Enrique Rojas Cubides

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Grupo de investigación en Sistemas Eléctricos y Eficiencia Energética (GISE3)
Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Bogotá D.C, Colombia
2022

RESUMEN

Los Pulsos Bipolares Angostos (Narrow Bipolar Pulses: NBPs) son descargas eléctricas atmosféricas que ocurren dentro de las nubes de tormenta (descargas intranube). Estos pulsos se caracterizan por su corta duración (en escala de microsegundos) y por ser la mayor fuente natural de radiación electromagnética, incluso mayor que la generada por las descargas nube-tierra. Actualmente, es bien conocido que los NBPs pueden aparecer antes, durante y después de descargas intranube, descargas nube-tierra, y descargas eléctricas que ocurren entre las nubes de tormenta y la parte superior de la atmósfera, denominados de Eventos Transitorios Luminosos (Transient Luminous Events: TLEs).

Esta monografía describe el diseño, desarrollo y validación de la herramienta computacional HMS_NPBs (Herramienta de Manipulación de Señales de NBPs) la cual permite identificar ágilmente las formas de onda de campo eléctrico producidas por NBPs y posteriormente realizar su caracterización. Lo anterior, mediante la obtención de sus parámetros temporales y de magnitud más relevantes. La herramienta HMS_NPBs se desarrolló en el entorno ***App Designer®***, el cual está basado en el lenguaje de programación de ***MATLAB®,*** ideado para realizar cálculos científicos y de ingeniería

La herramienta también incorpora funciones complementarias que permiten realizar una inspección minuciosa de registros de campo eléctrico para identificar otros eventos asociados a rayos nube-tierra o intranube, así como otras perturbaciones electromagnéticas del tipo transitorio. De esta forma, se reducen considerablemente los tiempos de tratamiento y procesamiento de señales asociadas al fenómeno del rayo, los cuales, por lo general, se llevan a cabo de forma manual.

En la etapa final de este trabajo de grado, y como parte del proceso de validación de la herramienta, se realizó la identificación y caracterización de señales de NBPs a partir de un banco de registros suministrado por el Grupo de Investigación en Sistemas Eléctricos y Eficiencia Energética (GISE3). Este conjunto de señales, compuesto por 116 registros, permitió identificar 55 NBPs, 31 de polaridad positiva y 24 de polaridad negativa. Usando la herramienta, para cada registro se determinaron parámetros tales como: tiempo de ascenso de 0 a 100%, tiempo de ascenso de 10 a 90 %, tiempo de cruce por cero, tiempo a la mitad del máximo pico, duración del frente de ascenso rápido, duración del frente de ascenso lento, magnitud del pico, magnitud del pico opuesto y relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico. Finalmente, los resultados estadísticos obtenidos fueron comparados con investigaciones previas llevadas a cabo en diversas regiones del mundo.

Palabras clave: campo eléctrico, caracterización, formas de onda, pulsos bipolares angostos, rayos intranube, software.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. Planteamiento del problema 1

1.2. Objetivos 2

1.3. Justificación 2

1.4. Antecedentes 3

1.4.1. Antecedentes del estudio de rayos en Colombia 4

1.4.2. Caracterización temporal de la forma de onda de campo eléctrico generados por descargas atmosféricas en Colombia 4

1.4.3. Estudios de NBPs alrededor del mundo 5

1.4.4. Uso de herramientas computacionales para el estudio de descargas atmosféricas 5

1.5. Organización del documento 6

2. MARCO REFERENCIAL 9

2.1. Formación de nubes de tormenta 9

2.2. Estructura eléctrica de las nubes de tormenta 10

2.3. Tipos de descargas eléctricas atmosféricas 12

2.4. Descargas intranube (IC) 13

2.5. Pulsos Bipolares Angostos NBPs 14

2.5.1. Proceso de formación de los NBPs 15

2.5.2. Influencia de la región geográfica en la aparición de NBPs 16

3. SEÑALES DE CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR LOS NBPs 19

3.1. Estación de medición de campo eléctrico 19

3.2. Antena de placas paralelas 19

3.3. Circuito electrónico 21

3.4. Lugar de medición y algunas características técnicas 21

3.5. Estación de medición y configuración implementada 23

3.6. Proceso de acondicionamiento de los registros 26

3.7. Formas de onda de campo eléctrico típicas - Parámetros temporales y de magnitud de NBPs 26

3.8. Formas de onda de los NBPs bajo estudio 31

4. CONSTRUCCIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL 35
4.1. Descripción general 35
4.2. Interfaz grafica 35
4.3. Proceso de identificación de eventos 41
4.4. Caracterización de NBPs 47
4.4.1. Ejemplo 1: Caracterización de parámetros de un NNBP 49
4.4.2. Ejemplo 2: Caracterización de parámetros de un PNBP 50
5. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE NBPs 55
5.1. Clasificación de los registros 55
5.2. Validación de la herramienta computacional 56
5.3. Parámetros analizados y resultados generales 56
5.4. Caracterización de NNBPs 57
5.4.1. Tiempo de ascenso de 0 a 100% (Tr [0-100%]) 57
5.4.2. Tiempo ascenso de 10 a 90 % (Tr [10-90%]) 58
5.4.3. Tiempo de cruce por cero (Tz) 59
5.4.4. Tiempo a la mitad del máximo pico (FWMH) 60
5.4.5. Duración del frente de ascenso lento (Ts) 61
5.4.6. Duración del frente de ascenso rápido (Tfr) 62
5.4.7. Duración del pulso (Tp) 63
5.4.8. Magnitud del pico (Ep) 64
5.4.9. Magnitud del pico opuesto (Eos) 65
5.4.10. Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico (Eos/Ep) 65
5.5. Caracterización de PNBPs 66
5.5.1. Tiempo de ascenso de 0 a 100% (Tr [0-100%]) 66
5.5.2. Tiempo ascenso de 10 a 90 % (Tr [10-90%]) 67
5.5.3. Tiempo de cruce por cero (Tz) 68
5.5.4. Tiempo a la mitad del máximo pico (FWMH) 69
5.5.5. Duración del frente de ascenso lento (Ts) 71
5.5.6. Duración del frente de ascenso rápido (Tfr) 71
5.5.7. Duración del pulso (Tp) 72
5.5.8. Magnitud del pico (Ep) 73

5.5.9. Magnitud del pico opuesto (Eos)..... 74
5.5.10. Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico (Eos/Ep)..... 74
6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS..... 76
6.1. Conclusiones..... 76
6.2. Recomendaciones y trabajos futuros..... 77
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 78
ANEXOS..... 84
Anexo A: Manual de la Herramienta de Manipulación de Señales de NBPs (HMS_NPBS) .. 85
Anexo B: Tutorial de la Herramienta de Manipulación de Señales de NBPs (HMS_NPBS) 131
Anexo C : Tutorial ejemplo práctico de la herramienta de manipulación de señales de Pulsos Bipolares Angostos NBPs..... 147
Anexo D : Tutorial para instalar la herramienta de manipulación de señales de Pulsos Bipolares Angostos NBPs..... 148
Anexo E : Tutorial para ejecutar la herramienta de manipulación de señales de Pulsos Bipolares Angostos en Matlab..... 149
Anexo-F: Tiempos del proceso de caracterización..... 150
Anexo-G: Comparación de resultados con el procedimiento manual..... 152

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Tipos de nubes según características y altitud. 10
Figura 2-2 Distribución de carga en una nube de tormenta 11
Figura 2-3 Electrificación de nubes tormentosas. 11
Figura 2-4 Tipos de DEATs 12
Figura 2-5 Tipos de descargas nube tierra (CG). 13
Figura 2-6 Proceso físico de formación de una descarga IC convencional 13
Figura 2-7 proceso de formación de los FB 16
Figura 2-8 Modelo idealizado de distribución de vientos 17
Figura 3-1 Sistema de medición de campo eléctrico. 19
Figura 3-2 Antena de placas paralelas 20
Figura 3-3 Elementos generales del circuito electrónico 21
Figura 3-4 Ubicación del sitio de medición 22
Figura 3-5 Rótulos de identificación de los registros de campo eléctrico 26
Figura 3-6 Señales de NBPs identificadas 32
Figura 3-7 NBP de obtenido del registro "W_161115_202038_Ezb" 32
Figura 3-8 NBP de obtenido del registro "W_161125_220059_Ezb" 33
Figura 4-1 Interfaz gráfica de la sección de identificación de eventos 37
Figura 4-2 Interfaz gráfica de la sección de visualización de registros 38
Figura 4-3 Interfaz gráfica de la sección de caracterización de NBPs 39
Figura 4-4 Flujograma selección señales de campo eléctrico que coinciden con las características de los NBPs 42
Figura 4-5 Algoritmo #1 para la identificación y selección de señales de campo eléctrico que coinciden con las características de los NBPs 43
Figura 4-6 Grafica del registro W_161125_203336_Ezb 44
Figura 4-7 Mensaje luego de la selección de señales del registro W_161125_203336_Ezb 44
Figura 4-8 Grafica del registro W_161125_203955_Ezb 45
Figura 4-9 Mensaje luego de la selección de señales del registro W_161125_203955_Ezb 45
Figura 4-10 Señales seleccionadas por el algoritmo de identificación de eventos posicionadas en el tiempo en: (a) 150.87 ms; (b) 233.21 ms; (c) 316.86 ms; (d) 393.70 ms 46
Figura 4-11 Registro "W_161125_203955_Ezb.mat" luego de realizar un proceso de inspección manual 46
Figura 4-12 Flujograma del proceso de caracterización de señales de campo eléctrico de NBPs 47
Figura 4-13 Algoritmo # 2 para caracterización de señales de campo eléctrico de NBPs 48
Figura 4-14 NNBP obtenido en el registro W_161121_185706_Ezb 49
Figura 4-15 Señal de NNBP luego de encontrar los puntos característicos 50
Figura 4-16 PNBP obtenido en el registro "W_161121_221225_Ezb": (a) al ingresarlo en el aplicativo; (b) luego de encontrar los puntos característicos. 51
Figura 4-17 Pestaña resultados de la plantilla ParametrosCalculados.xlsx 52

Figura 4-18 Pestaña estadísticas de la plantilla BD_NBPs.xlsx: (a) Sección del número de eventos; (b) resultados de los parámetros de la forma de onda para ambas polaridades. 53
Figura 5-1 distribución de los de los tipos de NBPs: (a) polaridad negativa; (b) polaridad positiva; (c) ambas polaridades 55
Figura 5-2 Histograma del tiempo de ascenso de 0 a 100% de NNBPs 58
Figura 5-3 Histograma del tiempo de ascenso de 0 a 90% de NNBPs 59
Figura 5-4 Histograma del parámetro de tiempo de cruce por cero de NNBPs 60
Figura 5-5 Histograma del tiempo a la mitad del máximo pico de NNBPs 61
Figura 5-6 Histograma de la duración del frente de ascenso lento de NNBPs 62
Figura 5-7 Histograma de la duración del frente de ascenso rápido para NNBPs 63
Figura 5-8 Histograma de la duración del pulso de NNBPs 63
Figura 5-9 Histograma de la magnitud del pico para NNBPs 64
Figura 5-10 Histograma de la magnitud del pico opuesto para NNBPs 65
Figura 5-11 Histograma de la relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico de NNBPs 65
Figura 5-12 Histograma del tiempo de ascenso de 0 a 100% de PNBPs. 67
Figura 5-13 Histograma del tiempo de ascenso de 0 a 90% de PNBPs 68
Figura 5-14 Histograma del parámetro de tiempo de cruce por cero de PNBPs 69
Figura 5-15 Histograma del tiempo a la mitad del máximo pico de PNBPs 70
Figura 5-16 Histograma del parámetro de la duración del frente de ascenso lento de PNBPs 71
Figura 5-17 Histograma de la duración del frente de ascenso rápido para PNBPs 72
Figura 5-18 Histograma de la duración del pulso de PNBPs 72
Figura 5-19 Histograma de la magnitud del pico para PNBPs 73
Figura 5-20 Histograma de la magnitud del pico opuesto para PNBPs 74
Figura 5-21 Histograma de la relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico de PNBPs 74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Géneros de nubes según el Atlas Internacional de Nubes 9
Tabla 2-2 Registros de NBPs obtenidos de varias investigaciones en regiones tropicales 17
Tabla 3-1 Resumen de características técnicas de sistemas usados para el registro de NBPs en diferentes regiones del planeta 24
Tabla 3-2 Resumen de características de los registros adquiridos de NBPs en otras investigaciones 25
Tabla 3-3 Clasificación de las formas de onda de campo eléctrico de NBPs 27
Tabla 3-4 Número de registros de NBPs según el tipo de forma de onda 29
Tabla 3-5 Descripción de los puntos característicos para determinar los parámetros de tiempo y magnitud de las señales de campo eléctrico de NBPs 30
Tabla 3-6 Parámetros temporales y de magnitud de la forma de onda de campo eléctrico de NBPs 30
Tabla 4-1 Funciones principales de los módulos del software HMS_NPBs 40
Tabla 4-2 puntos característicos del registro de NNBP 49
Tabla 4-3 parámetros de forma de onda para el registro de NNBP 50
Tabla 4-4 puntos característicos del registro de PNBP 51
Tabla 4-5 parámetros de forma de onda para el registro PNBP 51
Tabla 5-1 Estadísticas del tiempo de ascenso de 0 a 100% para NNBPs 58
Tabla 5-2 Estadísticas del tiempo de ascenso de 0 a 100% de PNBPs 67
Tabla 5-3 Estadísticas del tiempo de ascenso de 10 a 90 % de NNBPs 59
Tabla 5-4 Estadísticas del tiempo de ascenso de 10 a 90 % de PNBPs 68
Tabla 5-5 Estadísticas del tiempo de cruce por cero de NNBPs 60
Tabla 5-6 Estadísticas del tiempo de cruce por cero PNBPs 69
Tabla 5-7 Estadísticas del tiempo a la mitad del máximo pico de NNBPs 61
Tabla 5-8 Estadísticas del tiempo a la mitad del máximo pico de PNBPs 70
Tabla 5-9 Estadísticas de la duración del frente de ascenso lento de NNBPs 62
Tabla 5-10 Estadísticas de la duración del frente de ascenso lento de PNBPs 71
Tabla 5-11 Estadísticas de la duración del pulso de la señal de campo eléctrico de NNBPs 63
Tabla 5-12 Estadísticas de la duración del pulso de PNBPs 73
Tabla 5-13 Estadísticas de la relación entre la amplitud del sobre pico relativo y el pico de NNBPs 66
Tabla 5-14 Estadísticas del parámetro relación entre la amplitud del sobre pico relativo y el pico de PNBPs 75
Tabla 5-15 Resumen de los resultados estadísticos de los parámetros de los NBPs analizados 57

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Término en español	Término en ingles
BLUEs	Eventos luminosos azules	Blue Luminous Events
AP	Proceso de enlace	Attachment process
CA	Descargas nube aire	Cloud to air lightning
Cb	Cumulonimbus	Cumulonimbus
CC	Descargas nube a nube	Cloud to cloud lightning
CG	Descargas nube-tierra	Cloud-to-ground lightning
CID	Descargas intranube compactas	Compact Intracloud Discharges
DDT	Densidad de descargas a tierra	Ground Flash Density
DE	Desviación estándar	Standard deviation
DEATs	Descargas eléctricas atmosféricas	-
Elves	Emisiones luminosas y perturbaciones de muy baja frecuencia de fuentes de pulsos electro-magnéticos	Emissions of Light and Very Low Frequency Perturbations from Electromagnetic Pulse Sources
EMIR-UD	Estación automatizada para la medición indirecta de rayos – Universidad Distrital	Automated station for indirect lightning measurement – Universidad Distrital
Eos	Magnitud del pico opuesto	Opposite overshoot amplitude
Eos/Ep	Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico	Ratio between opposite overshoot to the initial peak amplitude
Ep	Magnitud del pico	Initial peak amplitude
Ep (100 km)	Magnitud del pico normalizado a 100 km	Initial peak amplitude normalized to 100 km
FB	Ruptura rápida	Fast breakdown
FNB	Ruptura rápida negativa	Fast negative breakdown
FPB	Ruptura rápida positiva	Fast positive breakdown
FWMH	Tiempo a la mitad del máximo pico	Full width at half maximum
IC	Descargas intranube	Intracloud Lightning
LD	Líder dardo	Dart leader
MA	Media aritmética	Arithmetic average
MFB	Ruptura rápida de ambas polaridades	Mixed polarity fast breakdown
MG	Media geométrica	Geometric mean
NBEs	Eventos bipolares angostos	Narrow bipolar events
NBPs	Pulsos bipolares angostos	Narrow Bipolar Pulses
NNBPs	Pulsos bipolares angostos de polaridad negativa	Negative Narrow Bipolar Pulses
PNBPs	Pulsos bipolares angostos de polaridad positiva	Positive Narrow Bipolar Pulses
PB	Descargas preliminares	Preliminary breakdown
RS	Descarga de retorno	Return stroke
SIN	Sistema interconectado nacional	-
SL	Líder escalonado	Stepped leader
SNR	Relación señal-ruido	Signal-to-noise ratio
SRS	Descargas subsecuentes	Subsequent return strokes
Tfr	Duración del frente de ascenso rápido	Fast front duration
TGFs	Descargas terrestres de rayos gamma	Terrestrial gamma-ray flashes
TLEs	Eventos luminosos transitorio	Events luminous transient

Nota: la tabla continua en la siguiente página.

Abreviatura	Término en español	Término en ingles
Tp	Duración del pulso	Pulse duration
TR	Temperatura de inversión	-
Tr [0-100]	Tiempo de ascenso de 0 a 100%	Rise time 0 to 100%
Tr [10-90]	Tiempo de ascenso de 0 a 90%	Rise time 10 to 90%
Ts	Duración del frente de ascenso lento	Slow front duration
Tz	Tiempo de cruce por cero	Zero crossing time
ZCIT	Zona de convergencia intertropical	Intertropical convergence zone

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

En Colombia se han realizado varios estudios relacionados a las descargas eléctricas atmosféricas (DEATs), más conocidos como rayos. Esto ha sido posible gracias a la alta actividad de rayos en el país producto de su ubicación geográfica, dentro de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) [1], región donde los vientos cálidos y húmedos de los hemisferios norte y sur chocan favoreciendo la formación de nubes de tormenta. La investigación de rayos en Colombia ha abarcado temas como: el desarrollo de sistemas de medición [2]–[4] localización de rayos [5], [6], protección contra rayos [7], [8], técnicas de procesamiento de señales [9], caracterización de descargas atmosféricas entre otras.

En este contexto, la mayoría de estudios sobre caracterización de rayos realizados en Colombia están enfocados en descargas nube-tierra (CG). En estos trabajos se han evaluado parámetros tales como: densidad de descargas a tierra (DDT) [10], [11], nivel ceráunico [12], [13], multiplicidad [14], [15], características de forma de onda de campo eléctrico y magnético observados en el dominio del tiempo-frecuencia [16]. Por otra parte, las descargas intranube (IC) han sido poco estudiadas en Colombia. Una de estas investigaciones se realizó en el 2015, donde se reportó cerca de siete mil (7000) registros de señales IC por medio del sistema LMA (Lightning Mapping Array) compuesto por una red de seis antenas que fueron instalados al norte de Colombia cerca de la ciudad de Santa Marta. Sin embargo, su estudio se centró principalmente en la estimación de altitud de la descarga atmosférica por medio de rastreos tridimensionales [17]. Otra investigación evaluó la relación de las descargas IC / CG para varias regiones alrededor del mundo, obteniendo que Colombia y Venezuela se presentan los mayores índices. Una hipótesis que propusieron los autores es que la latitud puede afectar esta relación de actividad de rayos [13].

Los Pulsos Bipolares Angostos (Narrow Bipolar Pulses: NBPs), también conocidos como Compact Intracloud Discharges (CID) y/o Narrow Bipolar Events (NBEs), es un tipo de descargas IC que ha generado alto interés en las últimas décadas, especialmente por su alta emisión de radiación en comparación con las descargas CG, los return strokes y otros eventos IC [18]. Los NBPs tienen rasgos únicos en el campo eléctrico producido, tanto en el dominio del tiempo, como en su espectro en frecuencia, entre ellos su corta duración (10 a 30 μs) [19], la gran magnitud en su primer pico y presentarse en ambas polaridades [20].

A la fecha, en el mundo, se han realizado varios estudios de caracterización en el tiempo de los NBPs [21]–[25] y se ha estudiado su comportamiento en regiones como Japón [26], China [27]–[29], Estados Unidos [18], [20], [30], Sri Lanka [21], [23], [25] y Malasia [24]. En Colombia, como ya se mencionó, debido al poco estudio de este tipo de descargas, y sumado a los efectos de la pandemia vivida entre 2020 y 2022, hasta ahora se comienzan a plantear las primeras campañas de medición enfocadas en su identificación. Uno de los grupos de investigación que ha orientado esfuerzos para adelantar estas campañas es GISE3-UD. Sin embargo, mientras se adquieren suficientes registros

para una adecuada caracterización, se ha proyectado adelantar otras actividades de investigación que faciliten el estudio de NBPs en un corto plazo.

Bajo esta misión en particular, algunos trabajos ya han propuesto algoritmos y herramientas computacionales que facilitan los procesos de captura de señales asociadas a los campos eléctricos y/o magnéticos radiados por descargas IC [30]–[32], reduciendo la ejecución de dichos procesos y aumentando el número de registros capturados. Sin embargo, luego de la captura de las señales, procesos como la identificación y caracterización de las formas de onda se realizan de forma manual, lo que implica que para llevar a cabo estos procesos se requiere una cantidad de tiempo considerable. A partir de este contexto, y en la perspectiva que plantea GISE3-UD de adelantar una primera campaña de medición de descargas IC para el año 2022, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué características técnicas debe tener una herramienta computacional que facilite la identificación de eventos y la obtención de los parámetros asociados a la forma de onda de señales de campo eléctrico producido por pulsos bipolares angostos (NBPs)?

1.2. Objetivos

El principal objetivo que la presente monografía es:

Desarrollar una herramienta computacional para la caracterización de señales de campo eléctrico generadas por pulsos bipolares angostos (NBPs) asociados a rayos intranube

Los objetivos específicos propuestos son:

- Identificar los parámetros (temporales y de magnitud) de las formas de onda del campo eléctrico radiado por NBPs que permitan su posterior caracterización.

- Construir un módulo en MATLAB® para el tratamiento de las señales registradas de campo eléctrico y la obtención de los parámetros asociados a los NBPs.

- Validar la herramienta computacional usando una base de datos compuesta por al menos 50 registros de NBPs obtenidos en una temporada de medición de rayos (mediciones reales).

1.3. Justificación

La protección contra rayos tiene como objetivo prevenir daños a estructuras, reducir fallas en redes eléctricas, mitigar lesiones o muertes de seres vivos y reducirla interferencia electromagnética, entre otras cosas. Sin embargo, los sistemas de protección pueden ser poco efectivos si no se conoce el comportamiento de los eventos electromagnéticos presentes en la zona de su implementación. En este sentido, la caracterización de las señales de campo eléctrico y magnético producidas por descargas

atmosféricas permiten diseñar y mejorar sistemas de protección contra rayos, para dispositivos eléctricos y electrónicos, además de dar una mejor comprensión en la formación del fenómeno y generar modelos matemáticos [33].

Las descargas CG son la principal fuente de riesgo electromagnético para sistemas eléctricos, instalaciones petroleras, infraestructura, entre otros. En Colombia, fueron causantes de 1.1 muertes por millón de habitantes en entre los años 1997 al 2014, siendo uno de los países con más víctimas por este fenómeno natural en Latinoamérica [34]. Además, son los responsables del 70% de las fallas del Sistema Interconectado Nacional (SIN) [35].

En el caso las descargas IC, los NBPs pueden perturbar severamente dispositivos o sistemas de comunicación. Así lo evidencio M. Ahmad en su tesis doctoral, concluyendo que los NBPs son la mayor fuente de interferencia natural para una red de comunicación inalámbrica de 2.4 GHz, produciendo mayores afectaciones que las descargas CG y otros eventos intranube [36]. Por lo general, los NBPs ocurren en altitudes entre 8 a 19 km sobre el nivel del suelo [37], rango en el cual vuelan los aviones comerciales, siendo esto un riesgo para sus equipos de control e instrumentación. Asimismo, se ha observado que los NBPs pueden asociarse con la aparición de otras descargas IC y CG [23], [24], [38], aumentando el interés de la comunidad científica por su naturaleza y el proceso de formación. Tema que en Colombia ha sido poco abordado a la fecha.

Teniendo en cuenta que nuestro país presenta una alta actividad de rayos durante todo el año, es una zona óptima para realizar campañas de medición de NBPs. Además, al tener tres cordilleras, la geografía es distintiva de otras regiones tropicales otorgándole condiciones variables de altitud, relieve y clima. Un ejemplo de esta combinación es Bogotá la cual se encuentra ubicada en el trópico y posee una altitud promedio de 2550 msnm. Esta condición geográfica no se ha presentado en ninguna de las regiones en las que se han obtenido registro de NBPs.

Actualmente, el grupo de investigación GISE3 de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas implementa una estación automatizada para la medición indirecta de rayos (EMIR-UD), ubicada en la Facultad Tecnológica, la cual permitirá adquirir registros de diversos eventos atmosféricos. Bajo esta situación, con el fin de disminuir los tiempos de caracterización e identificación de eventos atmosféricos poco estudiados como los NBPs, es necesario el desarrollo de una herramienta computacional que facilite dichos procesos. Esto sin duda será un paso importante para la consolidación de información sobre la actividad de rayos en esta región del país.

1.4. Antecedentes

En esta sección se presenta una síntesis de los avances más relevantes de la investigación de rayos en Colombia. y dado su escaso estudio en el país, se presenta un contexto sobre el conocimiento adquirido de los NBPs en el mundo.

1.4.1. Antecedentes del estudio de rayos en Colombia

Los primeros estudios de rayos realizados en Colombia se centraron en la estimación del nivel ceráunico, el cual es parámetro que determina el número de días de tormenta al año, considerando día de tormenta cuando se registra un trueno (efecto auditivo que acompaña a la descarga) [39]. En 1976, se realizó el primer mapa de nivel ceráunico en Colombia y posteriormente se realizó un mapa multianual más robusto entre los años 1974–1988 cuyas actualizaciones hacen parte de la norma de protección contra rayos NTC 4552 de 2008 [40].

Aunque sigue teniendo relevancia en algunos estudios, el nivel ceráunico es considerado un parámetro rudimentario de los rayos [39]. La densidad de descargas a tierra (DDT) se considera un parámetro más riguroso ya que calcula la cantidad de rayos que caen por km2- año. Para determinar el valor del DDT y caracterizar las descargas atmosféricas es necesario contar con sistemas de detección, los cuales son capaces de identificar, monitorear y localizar la actividad de rayos que ocurren en una región [40]. El primer sistema de detección de rayos en Colombia fue la RECMA (Red de localización y medición de descargas atmosféricas), desarrollada en el año 1988 por la Universidad Nacional y empresas del sector eléctrico [39].

Actualmente, en Colombia operan sistemas de detección como la red SID (Sistema de Información de Descargas) [38] y la red LINET (Lightning Detection Network) [41], las cuales son administradas por empresas privadas, de modo que la información obtenida es restringida. No obstante, estas redes han permitido establecer un comportamiento detallado de la actividad de rayos en el país e identificar zonas de gran interés. Es así como en la última década se ha concluido que la región con mayor DTT en Latinoamérica es el Catatumbo ubicada entre Colombia y Venezuela reportando un valor de 60 descargas / Km^2- año [15]. Además de estas redes de localización de rayos, se cuenta con sistemas de carácter académico como la estación de medición de campos eléctricos y magnéticos radiados por rayos del grupo de investigación EMC-UNC de la Universidad Nacional sede Bogotá y ahora la estación de GISE3-UD.

1.4.2. Caracterización temporal de la forma de onda de campo eléctrico generados por descargas atmosféricas en Colombia

Uno de los primeros estudios de caracterización temporal de rayos en Colombia se realizó en 1993, en el que se parametrizó el valor máximo del campo eléctrico normalizado a 100 km de 36 registros de descargas nube tierra por medio de estudios estadísticos [39]. Posteriormente, en el año 2006 se realizó el mismo estudio en la Sabana de Bogotá y se comparó los resultados con los adquiridos en investigaciones desarrolladas en Uppsala-Suecia, estos resultados fueron muy similares [42]. En 2018, se realizó un estudio más rigoroso evaluando trece parámetros de tiempo y magnitud. Los resultados obtenidos fueron comparados con otras investigaciones, se determinó que la duración

promedio de las descargas CG de polaridad negativa es mayor en al menos de 15 % en Colombia con respecto con otras regiones [9].
Recientemente, se han realizado investigaciones de otros tipos de descargas atmosféricas o con características muy específicas. En 2019, se caracterizó de forma independiente las descargas nube tierra (CG) de polaridad positiva, fenómeno que se caracteriza por su baja ocurrencia y por presentar una mayor magnitud de corriente comparado con las descargas CG negativos [43]. En ese mismo año se elaboró la caracterización de un tipo de descarga pocamente estudiada en el país denominada tren de pulsos preliminares, la cual antecede las descargas CG [44]. Estos aportes son significativos para mejorar la comprensión de la formación y características de las descargas atmosféricas en Colombia.

1.4.3. Estudios de NBPs alrededor del mundo

Le Vine, investigador del centro espacial Kennedy, realizó en el año 1980 un estudio para determinar el tipo de descarga atmosférica y el evento que presenta la mayor radiación de radiofrecuencia. En dicho trabajo, estableció que dichas características se presentan en una descarga intranube de corta duración, la cual no había sido observada hasta ese momento. Hoy en día se conoce a este evento como pulsos bipolares angostos (NBPs) [18]. La primera caracterización de la forma de onda del campo eléctrico generado por estos eventos se realizó en Sri Lanka en el año 1985, donde se estimaron tres parámetros temporales y uno de magnitud: el tiempo de acenso del 0 al 100%, el tiempo por cruce por cero, la duración, la relación entre el pico inicial del pulso y el pico de la segunda cresta [21].

Posteriormente, en 2010 se hizo por primera vez una caracterización temporal en Malasia. Se encontró que el 63% de los NBPs estaba acompañado de otros eventos atmosféricos antes y después de haber ocurrido [24]. Esta característica contrastaba con investigaciones anteriores ya que se creía que ocurría de forma aislada. Posteriormente, en el año 2016 se realizó un nuevo estudio de NBPs en Sri Lanka, el cual se diferenció por caracterizar los parámetros de forma de onda del campo eléctrico según la polaridad y comparar los resultados con otras investigaciones abarcando gran parte de la literatura publicada hasta el momento [23]. Esta investigación ha sido la más completa sobre NBPs reportada hasta la fecha.

1.4.4. Uso de herramientas computacionales para el estudio de descargas atmosféricas

Este tema ha sido de gran auge en los últimos años, pero no se reportan muchos casos exitosos en la literatura. Es así como en 2019 se implementó técnicas de machine-learning para desarrollar un software capaz de estimar la distancia entre el impacto de return strokes negativos (descarga CG) y la estación de medición. Para ello, el software se preparó a partir de 1500 registros del campo eléctrico previamente adquiridos en la Florida- EEUU, y para validarlo se realizó una campaña de medición en la región del Amazonas, Brasil. Los resultados se compararon con la distancia obtenida de un sistema de localización de rayos satelital, obteniendo una efectividad del 88% [45].

En 2020 investigadores de la Universidad de Alabama y la Universidad de Florida desarrollaron un algoritmo que automáticamente identificaba las descargas CG, IC y su polaridad a partir de la utilización de señales de campo eléctrico provenientes por descargas atmosféricas, El modelo logró una precisión del 99,11% de 50000 registros obtenidos posteriormente en Córdoba, Argentina [32]. En Colombia, García y Acosta en 2021 desarrollaron un módulo de adquisición automática para la EMIR - UD, perteneciente al GISE3 de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La herramienta disminuye considerablemente los tiempos de adquisición y almacenamiento de señales de descargas atmosféricas, permitiendo de aumentar el número de registros almacenados en comparación de métodos manuales [31].

Los Pulsos Bipolares Angostos no son ajenos al desarrollo de herramientas computacionales, en el 2019 el observatorio de la Universidad de Florida en Gainesville incorporó un sistema de registro semiautomático el cual identificaba los NBPs y otros eventos atmosféricos, alcanzando hasta 1022 registros NBPs con este sistema. Además, se lograba reducir el tiempo del proceso de adquisición de señales considerablemente [30].

1.5. Productos del trabajo de grado

Durante el desarrollo del trabajo, a la fecha, han sido presentado dos productos los cuales son:

- **Jiménez, S.L.**, Rojas, H.E., *"Algoritmo para la identificación de señales de campo eléctrico generadas por pulsos bipolares angostos asociados a rayos intranube"* XVIII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica (SENIE), oct. 19 -21, 2022. México, Pistas Educativas. (aceptado para ponencia oral).

- **Jiménez, S.L.**, Rojas, H.E., *"Herramienta computacional para la caracterización de señales de campo eléctrico generadas por pulsos bipolares angostos asociados a rayos intranube (herramienta HMS_NBPs)"* Registro de Software N°13-91-72 el 28 de julio de 2022, otorgado por la Dirección Nacional de Derechos de Autor.

1.6. Organización del documento

La estructura del documento continua de la siguiente forma. En el segundo capítulo se presentará el marco referencial que incluye conceptos básicos y terminología asociada a rayos. Se explicará la formación y estructura eléctrica de las nubes de tormenta, la clasificación de las descargas eléctricas atmosféricas, las características de los NBPs entre otros temas. En el tercer capítulo se describe el sistema de medición utilizado para adquirir las señales de campo eléctrico, incluyendo sus características y la configuración escogida para la adquisición de las señales objeto de estudio. Estas características serán comparadas con otros sistemas para evidenciar su validez. Finalmente, se describirán las formas de onda típicas de campo eléctrico producidas por NBPs y sus parámetros más relevantes.

Por su parte, en el cuarto capítulo, se describirá la estructura de la herramienta computacional desarrollada, explicando los módulos y etapas que la conforman, sus funciones operativas, y los algoritmos implementados. Adicionalmente, se realizarán algunos ejemplos de ejecución. El quinto capítulo muestra el proceso de validación de la herramienta computacional. Adicionalmente, se presentarán los resultados del estudio de caracterización de un banco de señales de campo eléctrico asociadas a los NBPs. En este estudio se examinaron siete parámetros temporales y tres de magnitud, y para cada uno de ellos se presentará un análisis estadístico. Dichos resultados se compararán con los obtenidos en otras investigaciones realizadas en diferentes partes de mundo. Finalmente, el sexto capítulo presenta las conclusiones de este trabajo e incluye algunas recomendaciones a tener en cuenta en estudios posteriores.

2. MARCO REFERENCIAL

En el presente capítulo se presentarán las bases teóricas necesarias para acercar al tema central de las descargas eléctricas atmosféricas (DEATs). Se explicará la formación y estructura eléctrica de las nubes de tormenta, el proceso de formación de las DEATs y, posteriormente se describirá detalladamente los Pulsos bipolares angostos (NBPs).

2.1. Formación de nubes de tormenta

El Atlas Internacional de Nubes en su primer volumen define una nube como: "*hidrometeoros que constan de diminutas partículas de agua líquida o hielo, o ambos, suspendidos en el aire libre*" [46]. Las nubes tienen una cantidad infinita de formas posibles, aun así, suelen aparecer con características semejantes. La comunidad científica ha podido clasificar las nubes en diez (10) tipos denominados géneros. En la tabla 2-1 se encuentra su descripción y en la figura 2-1 se observan sus formas. Las nubes de tormenta son denominadas e identificadas como Cumulonimbus (Cb), las cuales son nubes de gran extensión vertical y de color grisáceo, generalmente acompañadas por descargas eléctricas, lluvia intensa y caída de granizo [47].

Tabla 2-1 Géneros de nubes según el Atlas Internacional de Nubes

Genero	Características
Cirrus (Ci)	Nubes delgadas, tiene una apariencia fibrosa (hilos muy finos).
Cirrocumulus (Cc)	Pequeñas nubes blancas redondeadas que pueden ocurrir individualmente o en filas largas. Las pequeñas ondas en estas nubes se asemejan a forma de granos, fusionados o separados
Cirrostratus (Cs)	Nubes delgadas, en forma de láminas, se puede observar a través el sol y la luna.
Altocumulus (Ac)	Las nubes con forma de ondas o bandas paralelas.
Altostratus (As)	Las nube gris o azul grisácea que cubre todo el cielo. Son suficientemente delgadas para revelar el sol vagamente.
Nimbostratus (Ns)	Nubes de color gris oscuro. Por lo general, se asocian con lluvia o nieve. Sin embargo, la precipitación de estas nubes generalmente no es muy fuerte.
Stratocumulus (Sc)	Las nubes grumosas que aparecen en filas, parches o masas redondas.
Stratus (St)	Nubes que se forman cerca del suelo, suelen ser planas y sin forma.
Cumulus (Cu)	Nube con una parte superior abovedada y una base plana. Muestran un ligero crecimiento vertical.
Cumulonimbus (Cb)	Nube pesada y densa, con una extensión vertical considerable, en forma de montaña.

Fuente: Adaptado de [46]

La Cb se desarrolla a partir de grandes parcelas ascendentes de aire húmedo y caliente que a medida que suben se condensan por la disminución de temperatura que ocurre en los primeros kilómetros de la atmosfera, y adicionalmente, por saturación de humedad relativa haciendo que las parcelas de aire ya no puedan contener más agua en forma de vapor. Posteriormente, se forman pequeñas partículas de agua en estado líquido de alrededor de 0.01 mm de diámetro que pueden ir creciendo en tamaño [48]. Si dichas partículas alcanzan diámetros de entre 1-5 mm caen en forma de precipitación. Luego, estas partículas ascienden hasta que la atmosfera alcanza una temperatura de 0°C causando un proceso

de congelación. Sin embargo, algunas partículas permanecen en estado líquido hasta que alcanzan una temperatura de -40 °C [49], [50]. Este proceso puede repetirse a medida que las parcelas de aire asciendan y aumenten el tamaño de la Cb.

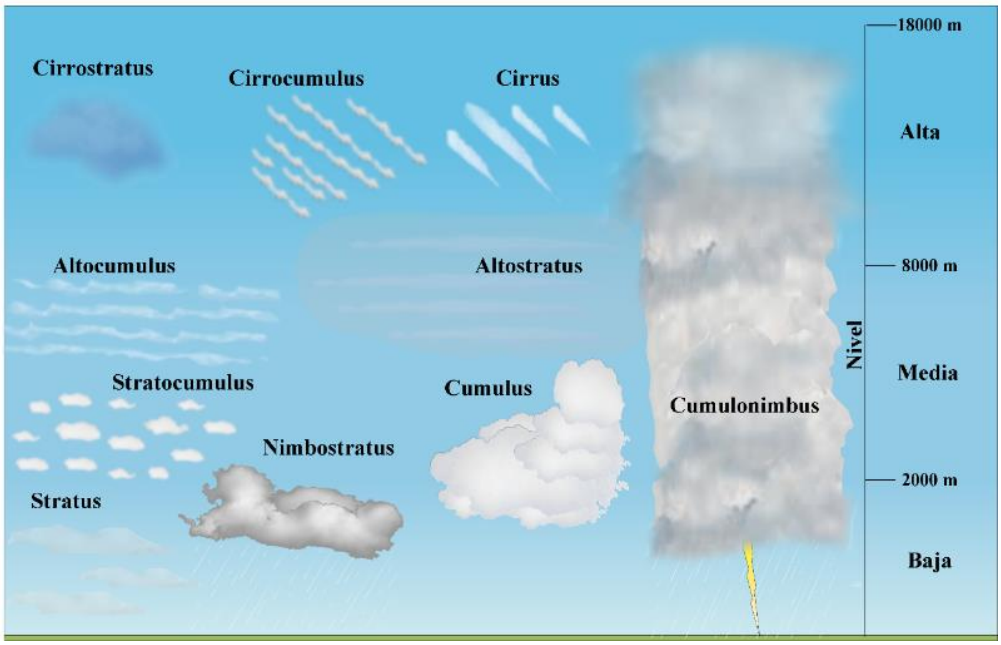


Figura 2-1 Tipos de nubes según características y altitud.
Fuente: Adaptada de [51]

2.2. Estructura eléctrica de las nubes de tormenta

Los primeros investigadores en estudiar la distribución de carga dentro de las Cb fueron los ingleses George C. Simpson y C. T. R. Wilson a principios del siglo XX [52], [53]. Ellos propusieron una disposición dipolar, compuesta de una región de carga positiva (P) y otra de carga negativa (N). Sin embargo, llegaron a conclusiones opuestas en cuanto la posición de dichas regiones. Para Wilson el dipolo estaba conformado en la parte inferior por una región N y la superior región P, contrario de la propuesta de Simpson que mencionaba que el dipolo era en la parte inferior región P y la superior región N.

Pocas décadas después de esta controversia, Simpson y Scrase (1937) establecieron que realmente la distribución de carga es tripolar [54], conformada por una región N en el centro de la nube y dos regiones P en la parte superior e inferior (ver figura 2-2), estudios posteriores apoyarían dicha conclusión [55].

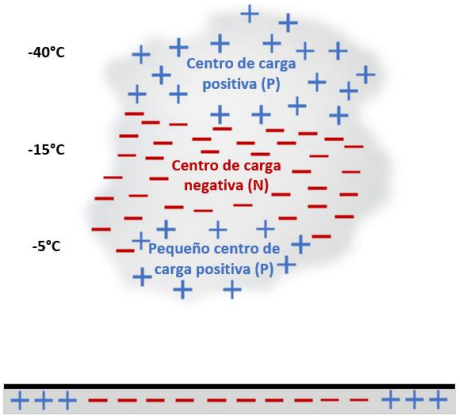


Figura 2-2 Distribución de carga en una nube de tormenta
Fuente: Adaptada de [56]

La naturaleza de la estructura de carga tripolar en la nube de tormenta es explicada por el mecanismo de colisión entre partículas de hielo, el cual señala que las partículas que conforman la nube (gotas de agua en estado superenfriado y cristales de hielo) adquieren una carga eléctrica debido al choque entre ellos. [47]. Los cristales de hielo se cargan eléctricamente cuando caen y entran en contacto con las gotas de agua, las cuales se congelan inmediatamente, creando pequeñas partículas de granizo con carga contraria a los cristales de hielo. Si la temperatura del entorno está por debajo de un valor crítico llamado temperatura de inversión (TR), los cristales de hielo estarán cargados negativamente, en caso que sea superior al TR serán cargados positivamente. La TR se encuentra entre -10 y -20 °C. Por las corrientes ascendentes los cristales de hielo se mueven hacia arriba conformando la región superior de la Cb y las partículas de granizo se mantienen en la zona central de la nube. Los cristales de hielo que caen después de pasar la TR contribuirían a la formación de la región de carga positiva inferior [49].

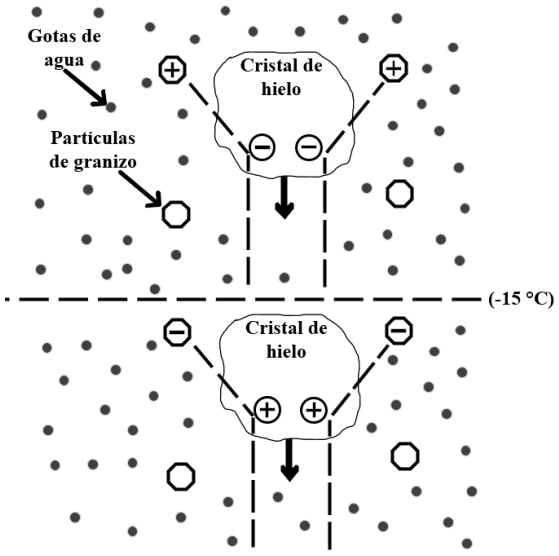
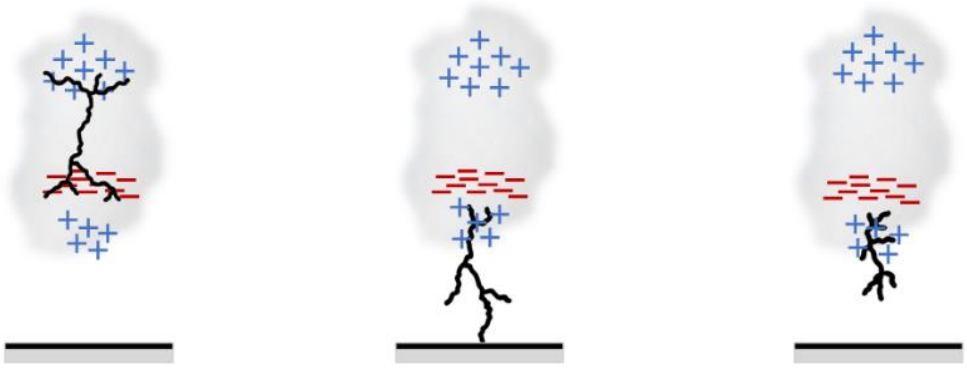


Figura 2-3 Transferencia de carga mecanismo colisión entre partículas de hielo, electrificación de nubes tormentosas.
Fuente: Adaptada de [49]

2.3. Tipos de descargas eléctricas atmosféricas

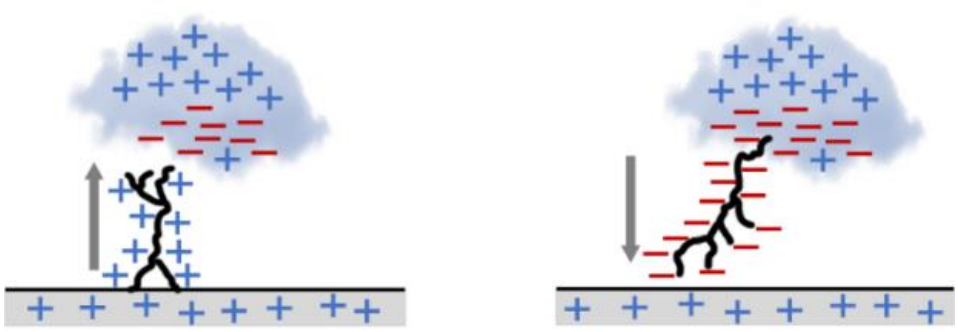
Las descargas eléctricas atmosféricas (DEATs) se clasifican en: descargas nube tierra (cloud to ground; CG), descargas nube aire (cloud to air CA), descargas nube a nube (cloud to cloud; CC) y descargas intranube o dentro de la nube (intracloud; IC)[33]. En la figura 2-4 se muestran los tres tipos más comunes de DEATs en una nube de tipo tripolar.



(a) (b) (c)

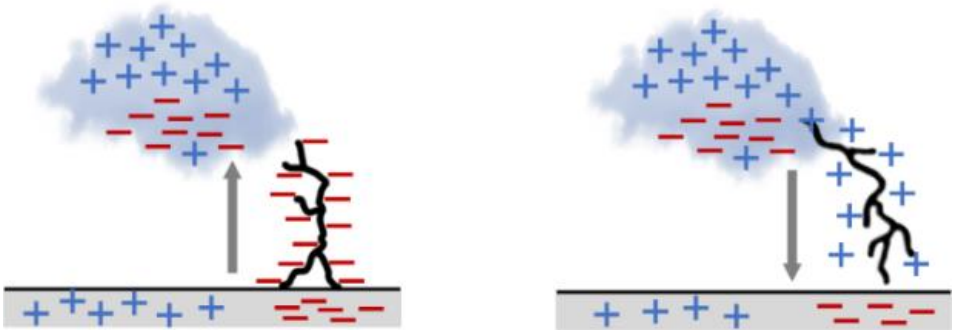
Figura 2-4 Tipos de DEATs: (a) descargas intranube o dentro de la nube (IC); (b) descargas nube tierra (CG); (c) descargas nube aire (CA)
Fuente: Adaptada de [33]

Las descargas CG se subdividen según el desplazamiento de cargas (positiva o negativa) y su dirección (ascendente o descendente), hay cuatro (4) tipos de descargas CG: descendentes negativos, ascendentes negativos, descendentes positivos, y ascendentes positivos (ver la figura 2-5). Alrededor del 90% de las descargas CG son negativas y 10% positivas [49]. A pesar de su poca ocurrencia, las descargas +CG son las más peligrosas por sus altas corrientes (cerca de 300 kA) con transferencias de carga a tierra superiores a 100 C, causando más daño en caso de impacto que las descargas -CG [57].



(a) (b)

Nota: la imagen continua en la siguiente página



(c) (d)

Figura 2-5 Tipos de descargas nube tierra (CG) (a) Ascendente positivo ;(b) Descendente negativo;(c) ascendente negativo;(d) descendente positivo.
Fuente: Adaptada de [49]

2.4. Descargas intranube (IC)

Aunque las descargas IC conforman cerca del 80% del total de las DEATs [49], han sido poco estudiadas con respecto a las descargas CG. Esto es debido en parte a que el fenómeno no puede ser observado de manera efectiva, cuando se emplean cámaras de video de alta velocidad con frecuencia no se puede distinguir los procesos que ocurren dentro de la nube. En las últimas décadas se han hecho enormes avances en el estudio de descargas IC usando mediciones de los campos electromagnéticos, y nuevas técnicas como la interferometría basada en mapeo espacial y temporal de la descarga a partir de su radiación VHF [58], [59]. La figura 2-6 muestra las etapas de formación de una descarga IC.

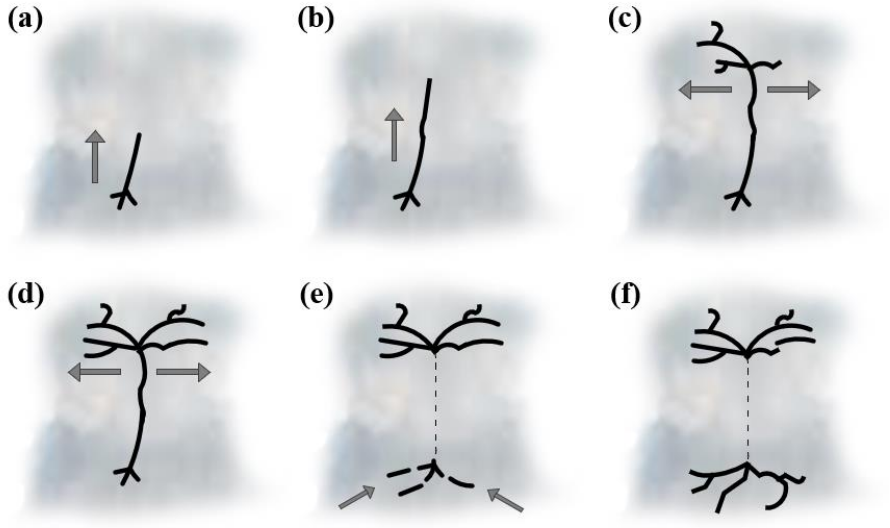


Figura 2-6 Proceso físico de formación de una descarga IC convencional: (a) y (b) Inicio del movimiento de carga ascendentemente; (c) y (d) Expansión horizontal en la parte superior de la Cb y transferencia de carga desde la parte inferior simultáneamente; (e) y (f) separación de los canales inferior y superior y propagación retrocesiva horizontal en la parte inferior de la Cb.
Fuente: Adaptada de [60]

Las descargas IC convencionales se forman con el movimiento vertical de cargas de región N hacia la región P superior de la Cb [61]. Este movimiento de carga transcurre durante los primeros 10 a 20 ms, desplazándose entre 2-3 km y con una velocidad de entre 1 a 3 x 10^5 m/s. Posterior a la actividad inicial, d 20 a 140 ms, se forma una propagación horizontal de carga en la parte superior de la Cb. La etapa final, que ocurre entre 140-195 ms, muestra que la propagación de carga del nivel inferior al superior cesa y la carga negativa de la parte inferior se transfiere horizontalmente hacía el punto de inicio de la descarga [58].

2.5. Pulsos Bipolares Angostos NBPs

Los Pulsos Bipolares Angostos (Narrow Bipolar Pulses: NBPs) también conocidos como Compact Intracloud Discharges (CID) y Narrow Bipolar Events (NBEs) es un tipo de descarga IC de muy corta duración entre 10 - 30 μs [19], identificada por ser la mayor fuente natural de radiación en alta y muy alta frecuencia (entre 3–300 MHz) [18], alcanzando potencias de hasta 270 kW [62]. Adicionalmente, los NBPS se caracterizan por altas magnitudes de campo eléctrico generado, comparables a los producidos por los return strokes de las descargas CG [20], [22].

En 1980, el investigador Le Vine reporta por primera vez observaciones de NBPs [63], el especuló que se trataba de una actividad relacionada con los procesos K de una descarga IC. Luego Cooray y Lundquist (1985) [21], realizaron una caracterización y descripción detallada de la forma de onda de campo eléctrico a partir de veintiséis (26) registros obtenidos en Sri Lanka. Por su parte Willett y Bailey (1989) [20], realizaron un análisis espectral de la derivada de campo eléctrico, encontrando que la radiación producida por NBPs es mucho más fuerte en la banda de alta-frecuencia que las producidas por descargas nube-tierra o cualquier otro proceso de rayo.

En 1998 se realiza la primera estimación de altitud (sobre el nivel del suelo) en las que ocurren los NBPs. Este estudio utilizó el satélite FORTE con el cual se obtuvieron 800 registros y se determinó que los NBPs ocurrían entre 4 a 12 km [64]. De la misma manera, Wu y otros investigadores (2011) [37], por medio de una red de localización de rayos compuesta por siete (7) estaciones ubicadas en Guangzhou - China, realizaron una estimación más exacta de la altitud de los NBPs. Los resultados encontraron que los NBPs de polaridad positiva ocurren a mayor altitud que los NBPs de polaridad negativa. Los primeros ocurren entre 16 – 19 km, mientras que su contraparte ocurren entre 8 – 16 km. Dichos resultados fueron similares a los obtenidos en Nuevo México y la Florida en el que se analizaron cerca de diez mil NBPs [65].

Inicialmente, se pensaba que los NBPs eran eventos aislados, es decir, que antes o después no se presentaban otros tipos de descargas IC o CG [20]–[22], [63], [66]. Sin embargo, luego se encontró que también podían aparecer antes de las descargas IC [67], [68], descargas CG [62], [69], [70] y descargas preliminares [71]. En 2008, Nag y otros investigadores realizaron una campaña de medición en Gainesville, Florida. Luego de recopilar 157 registros de NBPs, se evidenció que

aproximadamente el 18% ocurriera antes, durante o después de descargas IC; un 6% con descargas CG y el 8% de los registros presentaban múltiples NBPs separados de por lo menos de 200 ms [38].

Recientemente, los NBPs han aparecido muy próximos a varios tipos de Eventos Transitorios Luminosos (TLEs), los cuales son un tipo de descarga que ocurre por encima de las nubes de tormenta. En 2018, Liu y otros investigadores [72], por medio del sistema de medición JASA compuesta por seis (6) estaciones ubicadas en Jianghuai, China y el satélite FORMOSAT-2, encontró que seis NBPs de polaridad negativa precedían de por menos de 1 ms a algún tipo de Evento Luminoso Azul (BLUEs). Estos son un conjunto de descargas que se caracterizan por su radiación lumínica de color azulado que se propagan hacia arriba y ocurren a altitudes entre 20-50 km [73].

De forma similar, un reciente estudio realizado por Zhang y otros investigadores (2021) [74], reportaron nueve NBPs pocos ms después de descargas terrestres de rayos gamma (TGFs), los cuales son otro tipo de TLE que se caracteriza por sus breves emisiones de fotones de alta energía de entre 1 - 40 MeV [75] y que ocurren a una altitud de entre 15 - 21 km sobre el nivel de mar [76]. La gran variedad de eventos que aparecen próximos a los NBPs ha intrigado a la comunidad científica. No obstante, la relación que tiene con dichos eventos es tema de debate actualmente y aún se requieren más investigaciones para llegar a una conclusión válida.

2.5.1. Proceso de formación de los NBPs

El proceso de formación de los NBPs es diferente a las descargas intranube convencionales. Actualmente no se tiene un consenso del proceso formación de los NBPs. Sin embargo, en la última década ha tomado fuerza la hipótesis relacionada a los procesos denominados ruptura rápida positiva (fast positive breakdown ; FPB) [62], [77], [78], ruptura rápida negativa (fast negative breakdown; FNB) [79] y ruptura rápida de ambas polaridades (mixed polarity fast breakdown; MFB) [80]. Inclusive, se ha mencionado que dichos procesos son los responsables de todas las DEATs. El adjetivo “rápido” en estos procesos se debe a que la velocidad de propagación de carga en el aire virgen se encuentra varios ordenes por encima de otros procesos conocidos (alrededor de $1 * 10^7$ m/s sin descargas previas) cómo por ejemplo los líderes [81].

El mecanismo de ruptura rápida (fast breakdown; FB) está basado en la teoría de Streamers. Los hidrometeoros de las nubes de tormenta se aceleran por la presencia de un fuerte campo eléctrico, provocando choques y una posterior avalancha de partículas ionizadas. En la cabeza de la avalancha se comienza a acumular carga neta positiva o negativa con un radio de decenas a cientos de μm [82]. Cuando la cabeza crece hasta un valor critico (apróximamente 10^7 electrones [60]) se comienza a ramificar, este estado se denomina Streamer. Los FB inician a partir del desarrollo de streamers positivos descendentes en una Cb durante 1–3 μs. Posteriormente, según el tipo de FB se pueden desarrollar de diferente manera: los FNB y MFB hacen una transición a streamers negativos ascendentes, y luego solo los MFB vuelven a cambiar a Streamers positivos [80]. En el caso de los

FPB no ocurre ninguna transición. En la figura 2-7 se muestra un diagrama del proceso de formación de los FB.

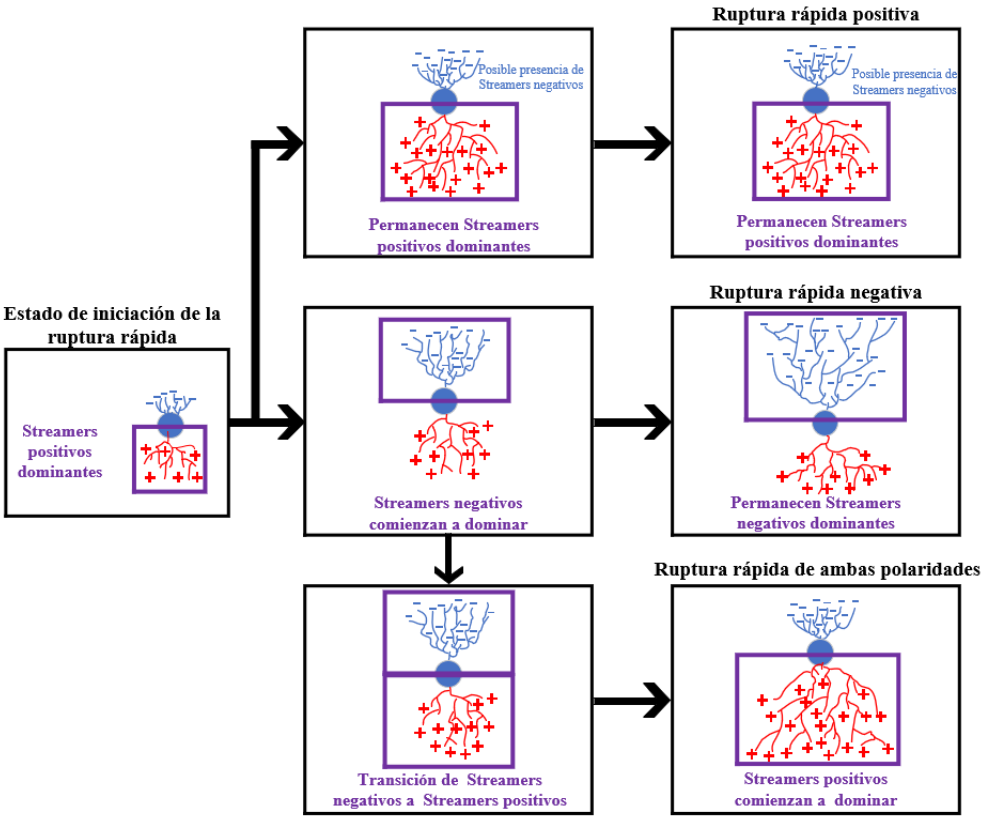


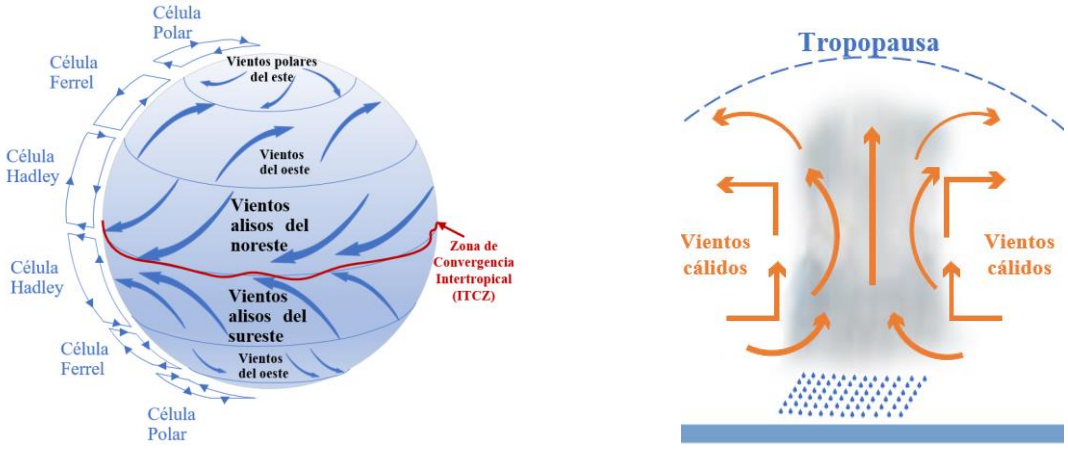
Figura 2-7 proceso de formación de los FB
Fuente: tomado y adaptada de [80]

2.5.2. Influencia de la región geográfica en la aparición de NBPs

El clima de una región puede variar significativamente por múltiples factores, uno de los más importantes es la latitud, la cual indica la posición (en grados) de un determinado lugar del planeta partiendo del ecuador (latitud 0°). El polo norte es el punto extremo en la posición norte cuya latitud es 90° N y el Polo sur con una latitud de 90° S [83]. En este contexto, la Tierra se divide generalmente en tres (3) zonas climáticas llamadas latitudinales: zona tropical que abarca desde 0° a los 30° N y S, zona templada desde 30° a los 51° N y S, zona fría que va desde 51° hasta 90° N y S [84].

Las zonas tropicales son mucho más cálidas que las otras dos debido a que el calentamiento solar varía poco a lo largo del año [85]. Esto genera que vastas parcelas de aire asciendan por convección cerca del ecuador hasta llegar a la tropopausa en la atmósfera, y luego se dirijan hacia los polos descendiendo hacia la superficie de la tierra en las regiones templadas, para nuevamente ascender. Este patrón que realizan los vientos sobre el ecuador se denomina celda de Hadley [86] y existen un par de celdas a cada lado del ecuador (ver figura 2-8a). De esta manera, el aire cálido en ambos hemisferios crea una banda de baja presión conocida como zona de convergencia intertropical (Intertropical Convergence Zone; ITCZ) que se caracteriza por propiciar varias precipitaciones [87].

A lo largo del año, banda de convergencia se desplaza de norte a sur, dando lugar a las estaciones seca y húmeda típicas de las regiones tropicales [85].



(a) (b)

Figura 2-8 (a) Modelo idealizado de distribución de vientos; (b) formación de nubes convectivas por el flujo de aire caliente en la ITCZ
Fuente: Adaptada de [83] y [85]

La ITCZ también se caracteriza por favorecer la formación de nubes de tormenta Cb en las regiones tropicales, haciéndolas zonas propicias para investigación de DEATs, incluyendo los NBPs. Actualmente, es bien conocido que los NBPs aparecen con mayor frecuencia en regiones tropicales. En 2008, en Suecia (país en zona templada), se realizó una campaña de medición de NBPs en época de tormentas eléctricas [25]. Durante dicho estudio no se pudo capturar ninguna señal de campo eléctrico de NBPs, en cambio las regiones tropicales se han publicado varios trabajos donde se reportan registros de NBPs. Para sintetizar estos hallazgos, en la tabla 2-2 se observa el número de registros de NBPs obtenidos en diferentes investigaciones realizadas en zonas tropicales.

Tabla 2-2 Registros de NBPs obtenidos de varias investigaciones en regiones tropicales

Ref.	Fecha de medición	Lugar	N° de PNBPs	N° de NNBPs
[88]	Junio (2016)	Misisipi - U.S.A	0	201
[89]	Enero (2015) y Marzo (2016)	Pagdan - Indonesia	103	28
[90]	Enero – diciembre (2015)	Padang - Indonesia	0	13
[91]	Abril -mayo (2014)	Colombo - Sri Lanka	50	40
[23]	Abril -mayo (2013)	Matara - Sri Lanka	40	142

Nota: la tabla continua en la siguiente página

Ref.	Fecha de medición	Lugar	N° de PNBPs	N° de NNBPs
[92]	Noviembre- diciembre (2012)	Johor - Malasia	26	38
[93]	Julio (2012)	Jianghuai - China	1395	144
[94]	Julio – agosto (2010)	Guangzhou - China	2	9
[95]	2007	Conghua y Guangdong - China	46	29
[25]	abril – mayo (2005 y 2006)	Colombo - Sri Lanka	25	0
[22]	Junio-septiembre (1996)	Nuevo México - U.S.A	0	24
[66]	Septiembre (1989)	Florida - U.S.A	156	10
[20]	Junio-septiembre (1985 y 1987)	Florida - U.S.A	0	24

PNBPs: NBPs de polaridad positiva; NNBP: NBPs de polaridad negativa

Fuente: autor

3. SEÑALES DE CAMPO ELÉCTRICO GENERADO POR LOS NBPs

Este capítulo presenta la descripción general de una estación de medición para obtención de registros de campo eléctrico producidos por descargas eléctricas atmosféricas (DEATs). Este sistema es similar al usado en Weligatta, Sri Lanka en el año 2016 por H. Rojas [9], estudio gracias al cual se obtuvieron los registros de NBPs analizados en el presente trabajo. Adicionalmente, se detallarán las formas de onda típicas de los NBPs y las características de los registros.

3.1. Estación de medición de campo eléctrico

La estación para la medición de campo eléctrico generado por DEATs está compuesta por cuatro bloques principales: (A) antena de placas paralelas, (B) circuito electrónico amplificador-buffer (D) osciloscopio, y (F) computador personal, en la figura 3-1 se observa la disposición de los bloques mencionados. El proceso de medición inicia con el campo eléctrico producido por las descargas eléctricas, el cual induce una diferencia de tensión directamente proporcional sobre las placas paralelas. Esta señal viaja por el cable coaxial y llega al circuito electrónico que se encarga de aislar la impedancia de la antena y proporciona a la señal la potencia necesaria para llegar hasta el osciloscopio. El osciloscopio por su parte, es el instrumento que permite capturar y registrar las señales detectadas, su activación se produce cuando se supera un valor de referencia en magnitud (trigger). Finalmente, estas señales son enviadas al computador de escritorio para ser almacenadas en una base de datos.

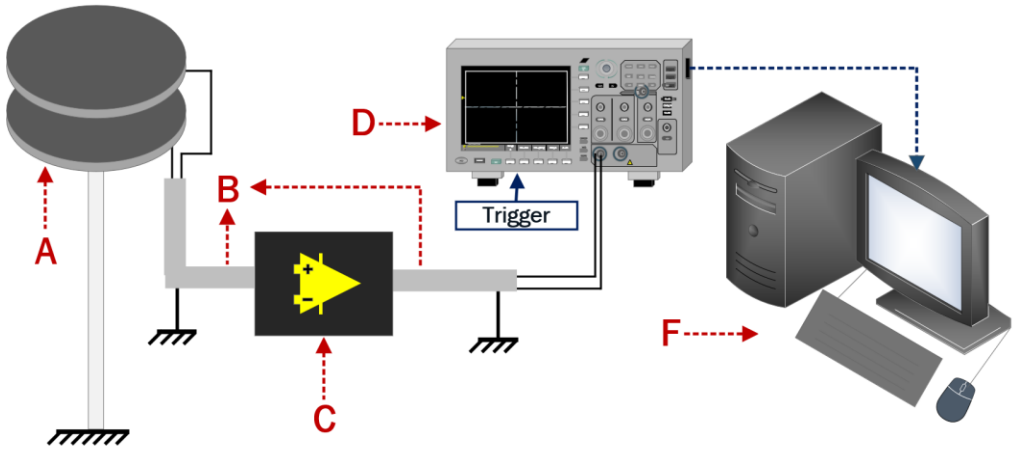


Figura 3-1 Sistema de medición de campo eléctrico: (A) antena de placas paralelas; (B) cable coaxial ;(C) circuito electrónico; (D) osciloscopio digital;(F) Computador de escritorio.
Fuente: tomado de [9]

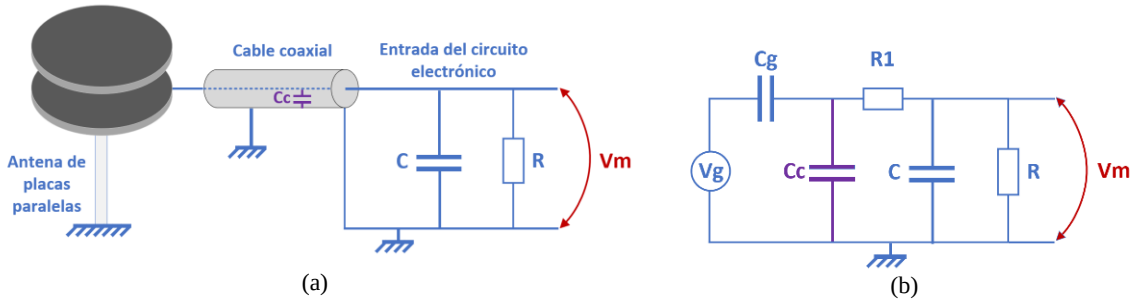
3.2. Antena de placas paralelas

La antena de placas paralelas mide la componente normal del campo eléctrico producido por descargas CG e IC. Está compuesta por dos placas metálicas generalmente de forma circular

suspendidas verticalmente y separadas a una distancia fija. La placa inferior está conectada a tierra y el voltaje entre placas de la antena dependerá del campo eléctrico y de un factor conocido como altura efectiva (***heff***) [9]. En la ecuación 3.1 se observa la relación entre la tensión inducida por la antena (***Vg***) y la componente normal del campo eléctrico (***En***).

$$V_g = E_n \, X \, h_{eff} \tag{3.1}$$

La tensión de medida ***Vm*** (antes del buffer-amplificador) es obtenida como resultado de la tensión inducida por la antena y el acople entre los cables coaxiales y el circuito electrónico. En la figura 3-2 se muestra el esquema circuital de la antena de placas paralelas y su circuito equivalente. En esta figura, ***En*** es la componente vertical del campo eléctrico, ***Vg*** es el potencial de la antena, ***Cg*** es la capacitancia equivalente de la antena, ***Cc*** es la capacitancia equivalente del cable coaxial que conecta la antena y el circuito electrónico, **R1** es la resistencia de acople entre el cable y el circuito electrónico, **C** es la capacitancia de acople del circuito electrónico, **C** es la capacitancia de acople del circuito electrónico y **R** es la resistencia de entrada que controla el tiempo de decaimiento del circuito.



(a) (b)

Figura 3-2 Antena de placas paralelas. (a) Esquema que incluye el circuito electrónico; (b) Circuito equivalente
Fuente: tomado de [9]

De esta manera, el valor aproximado de la tensión en la entrada del circuito electrónico será:

$$V_m(t) \approx \left\{ V_g \, X \left[\frac{h_{eff}}{C_g + C_c + C} \right] e^{-t/R(C_g + C_c + C)} \right\} \tag{3.2}$$

Suponiendo que el campo eléctrico inducido es una función escalonada de valor unitario, V_m decaerá de forma exponencial y llegará aproximadamente al 37% de su valor inicial (1/e), durante un tiempo denominado constante de decaimiento (τ_d). Los sistemas de medición con constantes de decaimiento del orden de segundos se denominan “antena lenta” y aquellos con constantes en el orden de los milisegundos “antena rápida” [96]. Para el caso del sistema de medición expuesto en esta sección, la constante de decaimiento estará definida por la siguiente expresión:

$$\tau_d = R(C_g + C_c + C) \tag{3.3}$$

3.4. Circuito electrónico

Como se mencionó anteriormente, el circuito electrónico se encarga de aislar la impedancia de la antena y proporciona a la señal la potencia necesaria para llegar hasta el osciloscopio. Este se conecta directamente a la placa superior de la antena y su salida con el osciloscopio mediante cables coaxiales. La placa inferior de la antena generalmente estará conectada a tierra. El circuito está alimentado por una fuente DC o una batería independiente para minimizar la interferencia causada por otros equipos electrónicos. En la figura 3-3 se muestra el esquema estándar del circuito electrónico del sistema de medición de señales de campo eléctrico radiado por rayos.

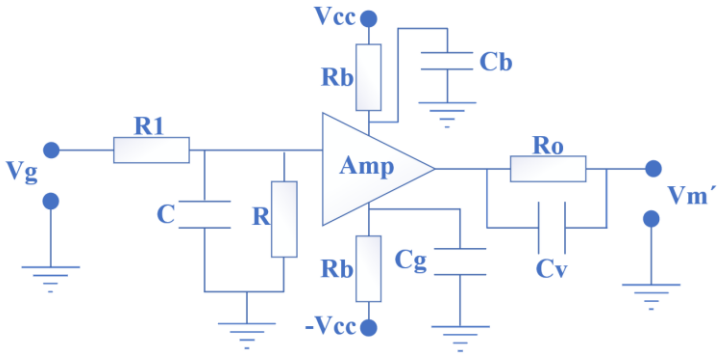


Figura 3-3 Elementos generales del circuito electrónico
Fuente: autor

Galvan & Fernando en el año 2000 propusieron este circuito electrónico basado en el amplificador buffer de alta velocidad LH0033 de National Semiconductor®, el cual se caracteriza por tener un ancho de banda de 100 MHz, una velocidad de respuesta de 1.5 kV/μs y una impedancia de entrada del orden de MΩ [97]. Diversas investigaciones han adoptado este circuito y con él obtuvieron registros de descargas CG [98] y otros tipos de eventos [99], [100]. En 2004 F. Santamaria y el grupo de investigación el Grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética de la Universidad Nacional (EMC-UNC), con colaboración de investigadores de la Universidad de Uppsala Suecia, construyeron un sistema de medición similar [42] y se pudieron obtener registros de DEATs en Colombia [101]. En las siguientes secciones se describirá el sistema de medición empleado para obtener las señales analizadas en este trabajo.

3.5. Lugar de medición y algunas características técnicas

Pese a tener su propia estación de medición indirecta de rayos, a causa de la pandemia por COVID-19, el distanciamiento social y las restricciones para el ingreso a laboratorios especializados en la Universidad Distrital durante 2020 y 2021, el GISE3 no ha podido realizar una campaña de medición de rayos completa en los últimos tres años. Por este motivo, se decidió realizar una inspección a las bases de datos con registros adquiridos en anteriores campañas de medición realizadas por el grupo de investigación.

De esta manera, los registros analizados en el presente trabajo son mediciones realizadas por H. E. Rojas en Weligatta, provincia sur de Sri Lanka, más exactamente en las instalaciones del UCIARS (Institute for Agro-Technology and Rural Sciences) de la Universidad de Colombo (6.208° N y 81.209° E), entre los meses octubre–noviembre del año 2016. En la figura 3-4 se observa la ubicación de la estación de medición empleada [9]. Weligatta es una región agrícola de terreno plano, cercana a la costa en dirección al mar Índico. Tiene una altitud de 14 msnm, con temperaturas entre 24 y 36°C. La humedad relativa es aproximadamente del 70 % durante todo el año, y aumenta hasta 90 % durante la temporada de lluvias (monzones). Presenta una gran cantidad de tormentas eléctricas a causa de los vientos ecuatoriales producidos por la ZCIT durante dos temporadas al año: abril-mayo y octubre-enero.



(a)



(b)

Figura 3-4 (a) Ubicación Sri Lanka en el mapamundi; (b) Ubicación del sitio de medición
Fuente: Adaptado a partir de [9]

Uno de los propósitos del estudio mencionado, y la tesis doctoral asociada, fue validar el desempeño de un nuevo circuito electrónico para medir señales de campo eléctrico producido por DEATs, ya que el circuito electrónico implementado durante varias décadas está construido por un amplificador que dejó de ser fabricado desde el año 2008 (buffer LH0033). Esta validación se realizó mediante la comparación entre el nuevo sistema de medición (basado amplificador BUF602) y un sistema de medición patrón basado con el amplificador LH0033 construido por el grupo de investigación Atmospheric Physics and Lightning (APL) de la Universidad de Colombo. La descripción completa del sistema patrón se puede consultar en [9].

3.6. Estación de medición y configuración implementada

El sistema de medición de campo eléctrico que adquirió los registros analizados en esta investigación está conformado por cables coaxiales RG 58/U con una impedancia característica es 50 Ω y un circuito electrónico basado en el amplificador-buffer de alta velocidad BUF602 de Texas Instruments®, el cual se caracteriza por tener una alta impedancia de entrada, ancho de banda de 1000 MHz, alta velocidad de respuesta (8 $kV/\mu s$) y ganancia unitaria. El registrador de señales utilizado fue el Yokogawa SL-1000 que dispone de 2 canales, una frecuencia de muestreo máxima de 100 MS/s (tiempo de muestreo de 10 ns) y una resolución de 12 bits [9], [102].

En su conjunto el ancho de banda del sistema de medición es de 11.8 MHz con una constante de decaimiento de 37.9 ms [9], la cual permite registrar con precisión señales de campo eléctrico compuestas por componentes electrostáticas y radiadas generadas por rayos cercanos y lejanos [103]. Para tener certeza y confianza en los registros adquiridos, en la tabla 3-1 se muestran las características técnicas más relevantes del hardware usado en este trabajo en contraste con otras investigaciones. La tabla incluye el número de estaciones de medición, constante de decaimiento y ancho de banda. Cabe resaltar que en algunas de las investigaciones no es incluida toda la información del sistema de medición.

De estos sistemas, se resalta la similitud entre las estaciones implementadas en Indonesia [90], Sri Lanka [23], [25] y Malaysia [24]. En otros estudios se implementaron sistemas basados en antenas de placa plana u otros tipos como es el caso de U.S.A [38], [66], [88]. Si se compara el ancho de banda, se puede observar que el sistema implementado tiene un rango mayor a la mayoría de las investigaciones a excepción de la realizada en Malaysia [24]. El uso de un conjunto de antenas como es el caso de China [94], [95], [104] y U.S.A [20], [22], permiten aumentar el rango de medición, además de poder localizar el lugar donde ocurren los NBPs.

El sistema de medición revisado en este trabajo se configuró para obtener mediciones de descargas CG, descargas IC y NBPs. El circuito electrónico responsable de disparar el trigger, fue el basado en el buffer LH0033 (sistema patrón instalado simultáneamente), el cual se ajustó a 50 mV (1.03 V/m visto por el amplificador buffer BUF602). Los registros fueron configurados con una ventana de captura de 500 ms, un pretrigger (tiempo entre el inicio de la ventana y el NBP) de 100 ms y un

tiempo de muestreo de 100 ns. Las señales de campo eléctrico tuvieron un radio de cubrimiento de hasta 250 km con respecto la estación de medición.

Tabla 3-1 Resumen de características técnicas de sistemas usados para el registro de NBPs en diferentes regiones

Ref.	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de estaciones	Constante de decaimiento	Ancho de banda
[9]	Weligatta - Sri Lanka	6.208° N	2016	1	37.9 ms	0 Hz - 11.8 MHz
[88]	Mississippi - U.S.A	-	2016	-	10 ms y 1 s	16 Hz - 2.6 MHz y 0.16 Hz – 2.6 MHz
[90]	Padang - Indonesia	~0° N	2015	1	100 ms	-
[23]	Matara - Sri Lanka	5.95 °N	2013	1	18 ms	-
[104]	Khingan - China	~51°N	2010	3	-	800–400 kHz
[94]	Guangzhou - China	-	2010	2	0.5 ms y 8 s	-
[38]	Florida - U.S.A	-	2008	-	10 ms	16 Hz - 10 MHz
[29]	Shanghai - China	31.001°N	2004	1	-	5kHz – 2 MHz
[95]	Guangzhou - China	-	2007	7	1 ms	160 Hz - 3 MHz
[24]	Johor - Malaysia	1.56°N	2009	1	500 µs	0 – 30 MHz
[25]	Colombo - Sri Lanka	6.9°N	2005-2006	1	13 ms	0 – 10 MHz
[105]	Shanghai - China	31.001°N	2005	1	-	5kHz – 2 MHz
[22]	Nuevo México - U.S.A	-	1996	3	100 µs, 1ms y 6 ms	-
[66]	Florida - U.S.A	-	1989	1	-	3 Hz a 7 MHz
[20]	Florida - U.S.A	-	1985 y 1987	4	1 ms y 10 s	-
[21]	Sri Lanka	8°N	1978	1	100 ms	10 Hz - 600 kHz

Fuente: autor

En la tabla 3-2 se muestran las características de registros campo eléctrico de NBPs, adquiridos en otras investigaciones. La tabla incluye: latitud, año de campaña, ventana del registro, tiempo de pretrigger y tiempo de muestreo. Cabe resaltar que en algunas de las investigaciones no es incluida toda la información mencionada.

Tabla 3-2 Resumen de características de los registros adquiridos de NBPs en otras investigaciones

Ref.	Lugar	Latitud	Año de la campaña	Ventana	Pretrigger	tiempo de muestreo
[9]	Weligatta - Sri Lanka	6.208° N	2016	500 ms	100 ms	100 ns
[88]	Mississippi - U.S.A	-	2016	400 ms	250 ms	100 ns
[90]	Padang - Indonesia	~0° N	2015	250 ms y 1 s	150 ms y 500 ms	1 µs y 4 µs
[91]	Colombo - Sri Lanka	6.93°N	2014	200 ms	-	3.2 ns
[92]	Johor - Malaysia	1 °N	2012	-	-	40 ns
[104]	Cordillera de Khingan - China	~51°N	2010	5.2 ms	-	0.64 µs
[24]	Johor - Malaysia	1.56°N	2009	250 ms	100 ms	10 ns
[38]	Florida - U.S.A	-	2008	500 ms	100 ms	10 ns
[95]	Guangzhou - China	-	2007	1 ms	-	100 ns
[25]	Colombo - Sri Lanka	6.9°N	2005-2006	20, 30 y 40 ms	-	5 ns, 8 ns y 10 ns
[105]	Shanghai - China	31.001°N	2005	52,4 ms	-	100 ns
[22]	Nuevo México - U.S.A	-	1996	(4 – 50) ms	-	0.5 µs, 1 µs y 2 µs

Fuente: autor

Como se puede observar, los tiempos de ventana son muy diversos. Las ventanas más grandes se ajustaron en Indonesia [90] con tiempos de hasta 1 s, las implementada en U.S.A fueron similares [38], [88], las de Sri Lanka [25] y China están por debajo de 50 ms [104], [105]. En el caso del pretrigger se observa que el ajuste en Sri Lanka coincide con los valores configurados en Malaysia [24] y U.S.A [38]. Por otro lado, entre menor sea el tiempo de muestreo más fidedigna será la forma de onda del NBP, el tiempo utilizado en Weligatta es menor al implementado en Indonesia [90], China [104]; iguales a los usados en U.S.A [88] y China [95], [105]; y un poco mayor al empleado

en Sri Lanka [25], [91], Malaysia [24], [92] y U.S.A [38]. La mayor diferencia entre tiempos de muestreo es de 20%.

3.7. Proceso de acondicionamiento de los registros

Los archivos obtenidos desde el osciloscopio Yokogawa SL1000 pasaron por el siguiente proceso de acondicionamiento: (a) Identificar y nombrar los vectores de tiempo y magnitud como ***(t, x)***; (b) Ajustar del vector de magnitud ***(x)*** con factores de corrección; (c) Cambiar de la extensión de los archivos originales entregados por el osciloscopio (*.wdf) por archivos binarios de MATLAB® (*.mat); (d) Etiquetar y guardar cada registro. Para la identificación de los registros, los rótulos incluyen el lugar de medición, que para el caso de Weligatta- Sri Lanka se reconoce con la letra "**W**", la fecha y hora obtenidos por un módulo GPS y el tipo de señal registrada que en este caso es campo eléctrico vertical (***Ezb***). La estructura de los rótulos se observa en la figura 3-5.

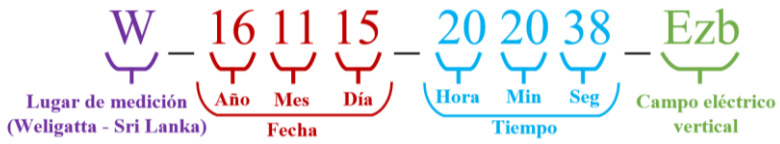


Figura 3-5 Rótulos de identificación de los registros de campo eléctrico obtenidos en Weligatta, Sri Lanka
Fuente: tomado y adaptado de [9]

3.8. Formas de onda de campo eléctrico típicas - Parámetros temporales y de magnitud de NBPs

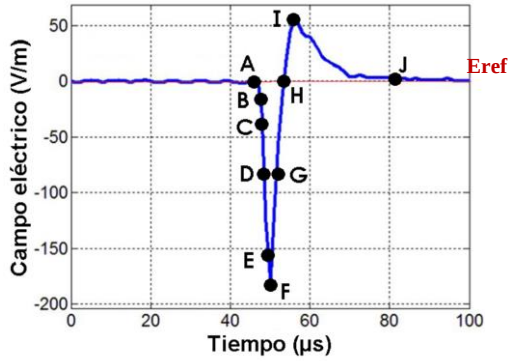
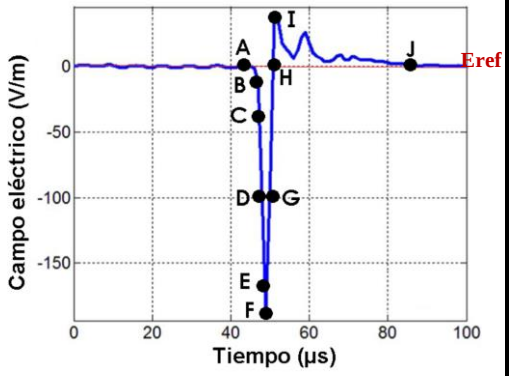
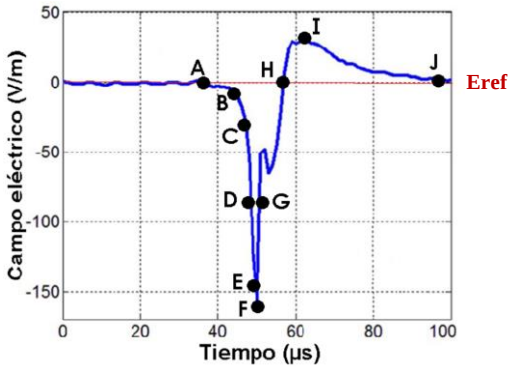
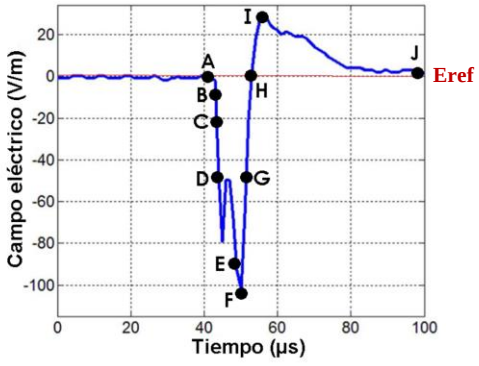
Las formas de onda de campo eléctrico de los NBPs reportadas por Le Vine en 1980 fueron la referencia para su identificación en posteriores investigaciones. En dicho trabajo se describía un NBP como una señal de corta duración entre 10 – 20 μs, con una primera cresta (pendiente de ascenso) de gran magnitud, y seguida de una segunda cresta de menor magnitud y dirección opuesta a la primera (respecto a la referencia) [63]. Posteriormente, Medelius (1991) y Nag et. al (2010) identifican otras características importantes de la forma de onda de los NBP. Dentro de estas se resaltan la presencia de múltiples picos en la primera cresta [38] y oscilaciones en la segunda cresta [66].

Estos cambios de campo eléctrico evidencian el desplazamiento de las cargas eléctricas dentro de la nube de tormenta. De esta manera, para los NBPs que presentan una cresta inicial negativa en su campo eléctrico, ocurre un movimiento de carga negativa hacia arriba y luego un movimiento de carga positiva hacia abajo [30]. Del mismo modo, para los NBPs que presentan una cresta inicial positiva en el campo eléctrico, ocurre un proceso similar, pero con carga de signo contrario. Teniendo en cuenta que los impulsos son clasificados generalmente por su polaridad, en este trabajo se emplea ***la convención de signos atmosféricos***. Esta convención menciona que, si la primera cresta es de valor negativo, el pulso será considerado de polaridad positiva (Positive narrow bipolar pulses; PNBPs).

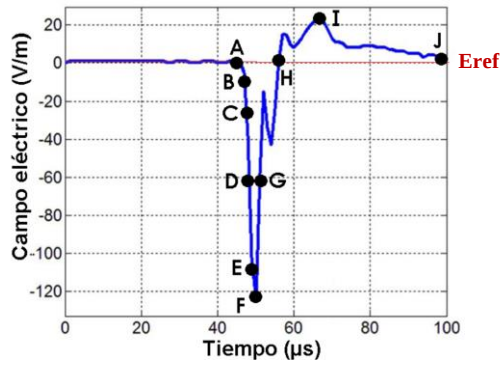
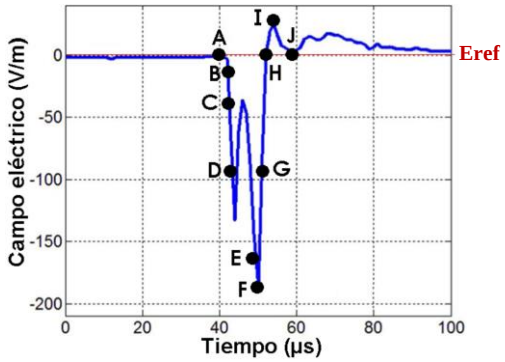
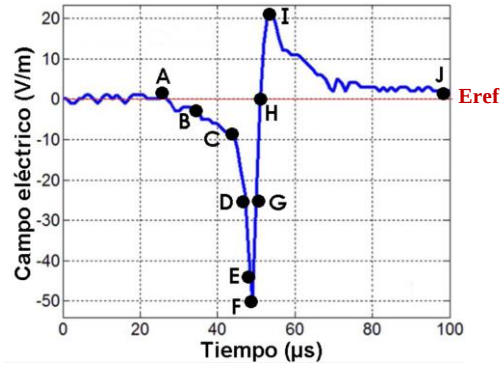
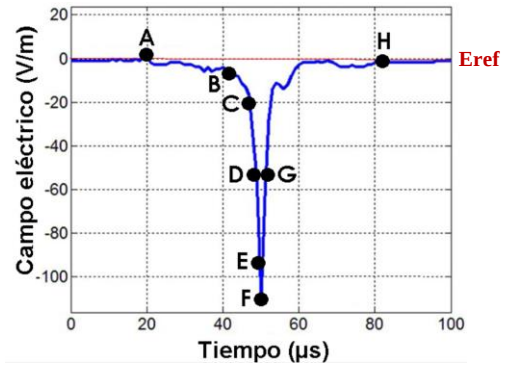
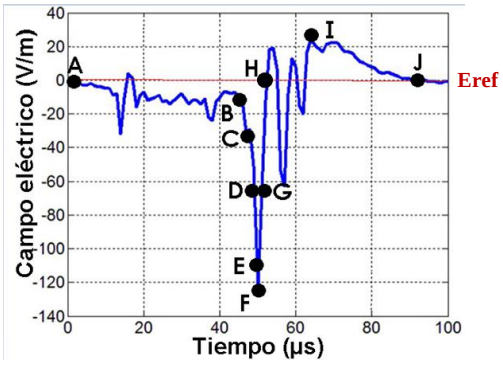
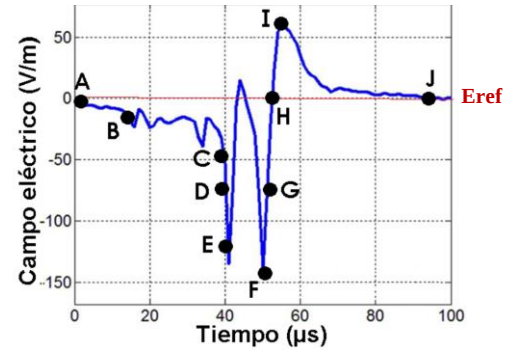
En caso contrario, si la primera cresta es de valor positivo el pulso será considerado de polaridad negativa (Negative narrow bipolar pulse; NNBPs) [20].

Hasta el momento, el estudio de clasificación más amplio y detallado sobre las formas de onda de campo eléctrico de los NBPs se realizó por Leal y otros investigadores en Florida - Estados Unidos, durante 2019 [30]. En este estudio se recopilaron mil veintidós (1022) señales de NBPs en rangos de hasta 500 km con respecto a la estación de medición. A partir de esta clasificación, se determinaron las características que tienen en común las formas de onda de los NBPs. Adicionalmente, se desarrolló un algoritmo que facilita la identificación de NBPs. En la Tabla 3-3 se presentan las formas de onda identificadas en el estudio.

Tabla 3-3 Clasificación de las formas de onda de campo eléctrico de NBPs

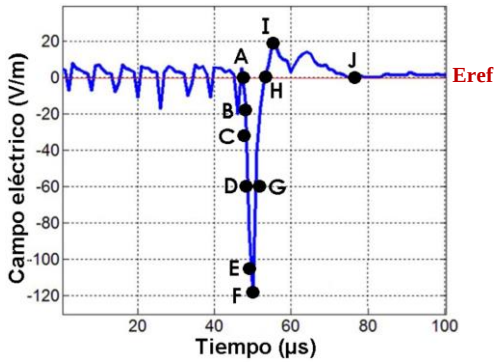
NBP tipo 1: Forma bipolar, ambas crestas sin oscilaciones	**NBP tipo 2:** Forma bipolar cuya primera cresta no presenta oscilaciones y la segunda si
	
NBP tipo 3: Forma bipolar en la cual se presenta un pico pequeño después del máximo pico de la primera cresta, y la segunda no presenta oscilaciones	**NBP tipo 4:** Forma bipolar en la cual se presenta un pico pequeño antes del máximo pico de la primera cresta y la segunda no presenta oscilaciones
	

Nota: la tabla continua en la siguiente página.

NBP tipo 5: Forma bipolar en la cual se presenta un pico pequeño después del máximo pico de la primera cresta, y la segunda presenta oscilaciones.	**NBP tipo 6:** Forma bipolar en la cual se presenta un pico pequeño antes del máximo pico de la primera cresta, y la segunda presenta oscilaciones.
	
NBP tipo 7: Forma bipolar en la cual se presenta un mayor frente lento y ambas crestas no presentan oscilaciones	**NBP tipo 8:** Forma de onda unipolar en la cual no se presenta la segunda cresta
	
NBP tipo 9: Forma bipolar en la cual se presenta un mayor frente lento. Adicionalmente, la segunda cresta presenta grandes oscilaciones	**NBP tipo 10:** Forma bipolar en la cual se presenta un mayor frente lento. Adicionalmente, la cresta inicial tiene múltiples picos, y la segunda no presenta oscilaciones
	

Nota: la tabla continua en la siguiente página.

NBP tipo 11: Forma de onda bipolar precedida por un tren de pulsos más pequeño



Fuente: tomado y adaptado de [30]

El algoritmo de identificación desarrollado por Leal consistía en calcular la relación entre las amplitudes espectrales a 1 kHz y 100 kHz de un conjunto de señales previamente adquiridas. Si la relación era menor que cinco, se clasificaba como NBP potencial. Luego, examinó visualmente las señales potenciales y verificaba que la duración se ajustara a la duración del NBP, en caso de no ser así se descartaba. En este proceso, aproximadamente el 13% de los eventos potenciales fueron descartados. En la tabla 3-4 se observa la distribución de registros según el tipo de NBP identificados en el estudio mencionado.

Tabla 3-4 Número de registros de NBPs según el tipo de forma de onda

Tipo de NBP	Ocurrencia	
	Registros	Porcentaje
1	263	25.73%
2	443	43.35%
3	89	8.71%
4	63	6.16%
5	75	7.34%
6	31	3.03%
7	38	3.72%
8	2	0.20%
9	4	0.39%
10	2	0.20%
11	12	1.17%
Total	1022	100%

Fuente: tomado de [30]

En la tabla 3-3 se puede observar que las formas de ondas tienen puntos etiquetados de forma alfabética. Estos son denominados puntos característicos y son importantes ya que a partir de ellos se pueden estimar los parámetros de la forma de onda de campo eléctrico de los NBPs. En la tabla 3-5 se presenta la definición de cada punto característico.

Tabla 3-5 Descripción de los puntos característicos para determinar los parámetros de tiempo y magnitud de las señales de campo eléctrico de NBPs

Punto	Descripción
A	Punto de inicio del evento. La señal tiende a desviarse del nivel de referencia (Eref)
B	Punto en el cual alcanza el 10% de su pico máximo (positivo o negativo)
C	Punto donde la señal cambia abruptamente de pendiente
D	Punto en el cual alcanza el 50% de su pico máximo (positivo o negativo)
E	Punto en el cual alcanza el 90% de su pico máximo (positivo o negativo)
F	Punto en el cual alcanza su valor máximo (positivo o negativo)
G	Punto en alcanzar el 50% después del valor máximo (positivo o negativo)
H	Punto en el cual alcanza el valor de la referencia por primera vez.
I	Punto en el cual alcanza el valor máximo (positivo o negativo) de polaridad opuesta al punto F
J	Punto en el cual la señal finalmente regresa al nivel de referencia (Eref)

Fuente: autor

Una vez identificados estos puntos, se pueden determinar los parámetros de tiempo y magnitud de las señales de campo eléctrico producido por los NBPs. En la tabla 3-6 se incluye la ecuación y la descripción de cada parámetro (7 temporales y 4 de magnitud). Estas definiciones se implementaron en la herramienta de cómputo HMS_NPBs (Herramienta de Manipulación de Señales de NBPs), la cual será introducida y descrita en el capítulo cuatro. Adicionalmente, fue empleada para el estudio de caracterización de señales y su comparación con otras investigaciones, lo cual será presentado en el capítulo 5 y 6, respectivamente.

Tabla 3-6 Parámetros temporales y de magnitud de la forma de onda de campo eléctrico de NBPs

Parámetro		Formula	Descripción
TEMPORALES	Tiempo de ascenso de 0 a 100%	$t_{r(0-100)} = t_F - t_A$	Lapso que recorre la forma de onda desde el punto de deflexión inicial (**A**) hasta alcanzar su valor máximo (**F**)
	Tiempo de ascenso de 10 a 90 %	$t_{r(10-90)} = t_E - t_B$	Lapso que recorre la forma de onda para ir desde 10% (**B**) hasta 90% (**E**) del valor máximo de la señal (**F**)
	Tiempo de cruce por cero	$t_z = t_H - t_A$	Lapso que recorre la forma de onda desde el punto inicio de la señal (**A**) hasta el primer cruce con el nivel de referencia (**H**)
	Tiempo a la mitad del máximo pico	$FWMH = t_G - t_D$	Lapso de la primera cresta en que se cubre el primer y segundo punto en el que alcanza el 50% del pico inicial (**D** y **G**).
	Duración del frente de ascenso lento	$t_S = t_C - t_A$	Duración de la señal que va desde el punto de deflexión inicial (**A)** hasta donde cambia abruptamente de pendiente (**C**)
	Duración del frente de ascenso rápido	$t_{Fr}=t_F - t_C$	Lapso que va desde el momento que finaliza el frente lento (**C**) hasta alcanzar su valor máximo (**F**)
	Duración del pulso	$t_p = t_J - t_A$	Lapso que recorre la forma de onda desde el punto de deflexión inicial (**A**) hasta su punto final (**J**)

Nota: la tabla continua en la siguiente página.

Parámetro		Formula	Descripción
MAGNITUD	Magnitud del pico	$E_P = \lvert E_F - E_{ref} \rvert$	Magnitud del pico inicial (positivo o negativo). Se mide con respecto al nivel de referencia (**Eref**)
	Magnitud del pico normalizado a 100 km	$E_{P(100\ km)} = \lvert E_F - E_{ref} \rvert * \frac{R}{100}$ **R** es la distancia desde el sistema de medición (km)	Magnitud del pico inicial (positivo o negativo), ajustado por la distancia. Se mide con respecto al nivel de referencia (**Eref**)
	Magnitud del pico opuesto	$E_{os} = \lvert E_I - E_{ref} \rvert$	Magnitud (positivo o negativo) del pico de polaridad opuesta posterior al primer cruce por cero. Se mide con respecto al nivel de referencia (**Eref**)
	Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico	$E_{os}/E_P = \lvert E_F / E_I \rvert$	Relación entre la magnitud del pico inicial (**F**) y el pico de polaridad inversa (**I**).

Fuente: autor

3.9. Formas de onda de los NBPs bajo estudio

La base de datos suministrada por el GISE3 está conformada por ciento dieciséis (116) señales de campo eléctrico adquiridas en la campaña de medición realizada en Weligatta - Sri Lanka durante 2016. De estos registros, se extractaron cincuenta y cinco (55) NBPs de los cuales 31 señales son de polaridad positiva y 24 de polaridad negativa. En la figura 3-6 se muestran algunos ejemplos de NBPs extractadas de dicha base de datos. La magnitud de las cincuenta y cinco señales analizadas tuvo valores entre los 23.6 V/m y 1.19 V/m, con una media aritmética de 10.44 V/m, una desviación estándar de 7.11 V/m y media geométrica de 7.73 V/m. En las figuras 3-7 y 3-8 se observa dos registros de NBPs con diferentes valores de magnitud, en donde se aprecia el nivel de ruido de la señal.

Haciendo uso del módulo ***Wavelet analyzer 1D*** de Matlab®, para el análisis de ruido de las señales se seleccionó el filtro wavelet Coiflet 4 de nivel 5 con implementación de la técnica de umbral suave. Este filtro se implementó ya que presenta un buen desempeño para la reducción de ruido en las señales de campo eléctrico producidas por rayos CG, tal y como fue mostrado en [106]. Del proceso realizado se obtuvo que la relación señal-ruido (signal-to-noise ratio; SNR) de los 55 registros de NBPs varió entre 3 y 28 dB con un valor promedio de 4.4 dB. Estos resultados muestran que el contenido de ruido en las señales registradas no afecta significativamente la caracterización de forma de onda. Por tal motivo, los registros analizados en el presente trabajo fueron manipulados directamente sin realizar ningún tipo de procesamiento y/o eliminación de ruido. Esto con el fin de asemejar el proceso de caracterización a aquel empleado en otros estudios donde no se implementaron filtros sobre las señales.

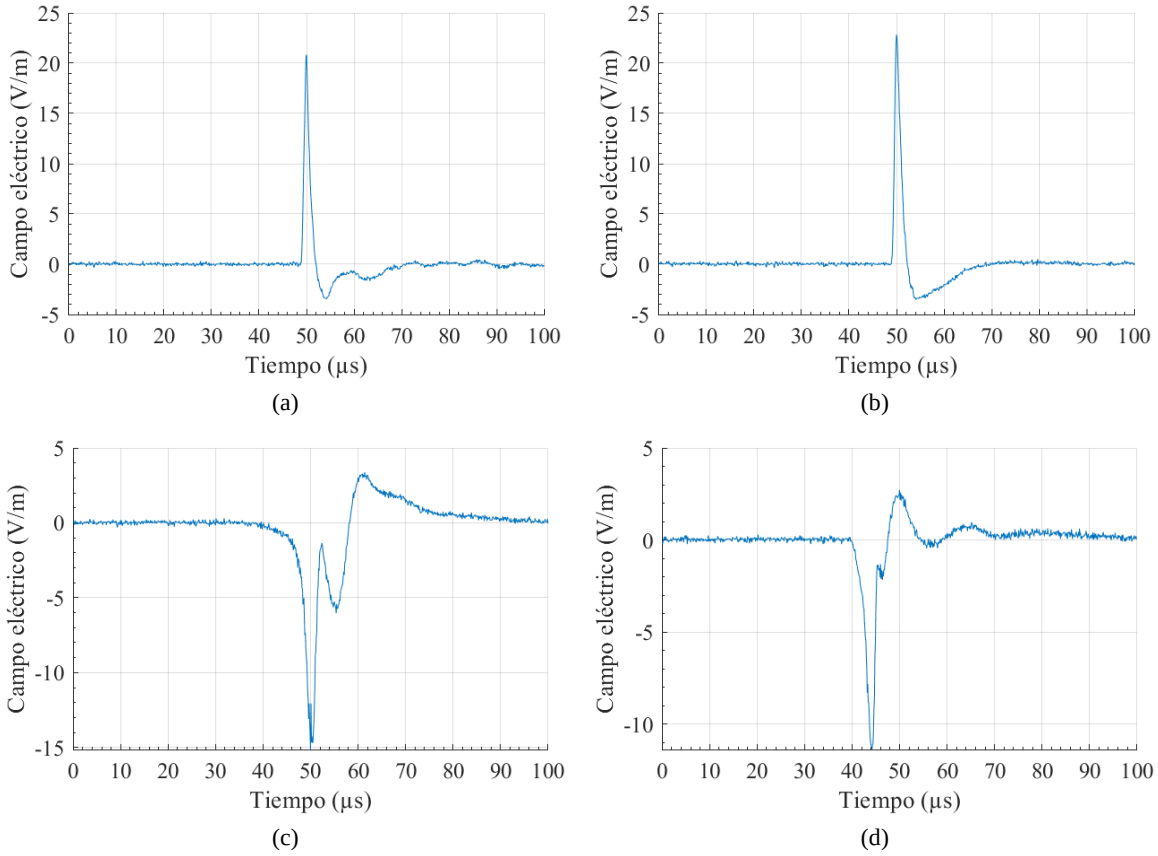


Figura 3-6 Señales de NBPs identificadas: (a) PNBP tipo 2; (b) PNBP tipo 1; (c) NNBP tipo 3; (d) NNBP tipo 5
Fuente: autor

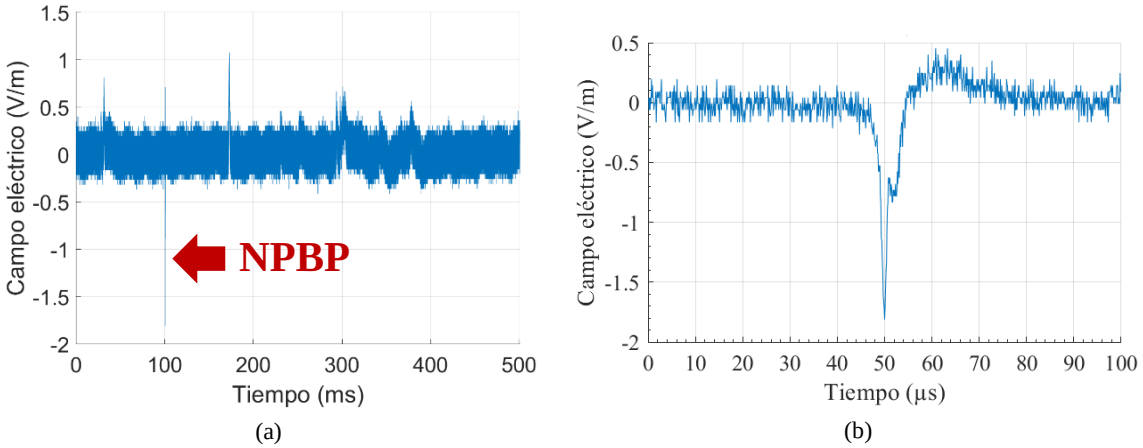
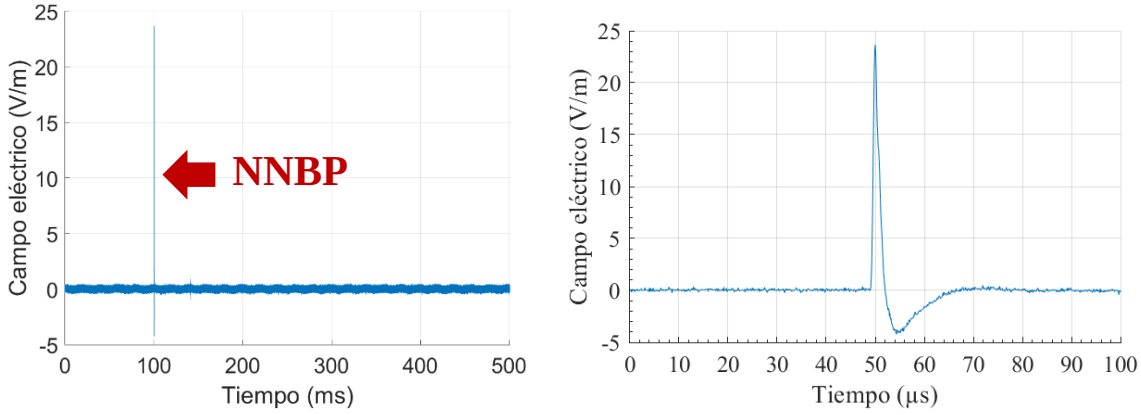


Figura 3-7 NBP de obtenido del registro "W_161115_202038_Ezb": a) ventana completa de 500 ms; b) Ajustado a una ventana de 100 µs
Fuente: autor



(a) (b)

Figura 3-8 NBP de obtenido del registro "W_161125_220059_Ezb" : a) ventana completa de 500 ms; b) Ajustado a una ventana de 100 µs

Fuente: autor

4. CONSTRUCCIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

Los sistemas de medición indirecta de DEATs pueden recolectar cientos de señales en una temporada de medición. Dichas señales pasan por procesos de identificación, clasificación y caracterización de formas de onda. No obstante, buena parte de estos procesos se realizan de forma manual, lo que implica una cantidad de tiempo considerable en su ejecución. Por esta razón, en este capítulo se presenta la herramienta computacional HMS_NPBs (Herramienta de Manipulación de Señales de NBPs), aplicativo desarrollado como núcleo de este trabajo de grado, la cual permite realizar de manera ágil la identificación y caracterización de señales de campo eléctrico producidas por NBPs. Adicionalmente, junto con su proceso de diseño e implementación se presentan algunos ejemplos de ejecución.

4.1. Descripción general

La herramienta computacional HMS_NPBs (Herramienta de Manipulación de Señales de NBPs) facilita la identificación de las formas de onda de campo eléctrico producidas por NBPs en los registros obtenidos por la estación de medición. Adicionalmente, permite caracterizar ágilmente (menos de 80 segundos) el bloque de señales bajo estudio mediante la obtención de parámetros temporales y de magnitud. Esta herramienta se desarrolló en el entorno ***App Designer®***, basado en el lenguaje de programación de ***MATLAB®,*** ideado para realizar cálculos científicos y de ingeniería**.**

El software HMS_NPBs está compuesto por treinta y seis (36) funciones operativas y aproximadamente 5100 líneas de código distribuidas en veinte (20) módulos. Estas funciones y sus bloques de programación en conjunto permiten al usuario:

a. Realizar una inspección minuciosa de señales de campo eléctrico generado por rayos (flashes nube-tierra o intranube) y otras perturbaciones electromagnéticas del tipo transitorio.
b. Identificar, seleccionar, recortar y guardar nuevos registros a partir de las señales ingresadas.
c. Analizar gráficamente los registros obtenidos en el orden de los milisegundos hasta algunas decenas de microsegundos.
d. Explorar y hallar potenciales registros de NBPs dentro de las señales ingresadas.
e. Caracterizar señales de campo eléctrico generados por NBPs mediante la obtención de parámetros temporales y de magnitud.
f. Guardar los resultados del proceso de la caracterización de NBPs en una base de datos (archivo tipo Excel).

Esta esta herramienta está protegida por derechos de autor dentro de los términos de la legislación colombiana. Su licencia de uso y modificación se reserva para los autores y los miembros autorizados del Grupo de Investigación en Sistemas Eléctricos y Eficiencia Energética (GISE3) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

4.2. Interfaz grafica

El proceso de diseño de la herramienta inició con el desarrollo conceptual de los algoritmos y la inclusión de diversas relaciones matemáticas. A partir de ellos, se realizaron varios modelos de la

interfaz gráfica, cuya versión final implementa diversas etapas separadas según su propósito (identificación, visualización y caracterización).

La interfaz gráfica compuesta por una serie de componentes visuales e interactivos los cuales son: menú general, barra de navegación, sección de identificación de eventos, visualización de registros y caracterización de NBP. Los componentes dentro de la ventana principal del aplicativo cambiarán dependiendo de la sección escogida en la barra de navegación. Solamente el menú general y la barra de navegación se disponen de manera fija.

En la figura 4-1 se observa la sección de identificación de eventos, la cual está conformada de seis módulos destinados principalmente para encontrar señales de campo eléctrico asociadas a NBPs o DEATs, estos módulos son:

- Módulo 1.1: Cargar archivo
- Módulo 1.2: Información del registro
- Módulo 1.3: Grafica del registro
- Módulo 1.4: Guardar archivo
- Módulo 1.5.1: Grafica del registro
- Módulo 1.5.2: Información del registro

Por su parte, la sección de visualización de registros se encarga de mostrar al usuario las señales seleccionadas por el aplicativo, en la siguiente sección de este capítulo se dará una explicación más detallada de esta selección. La sección de visualización de registros está compuesta por cinco módulos como se muestra en la figura 4-2:

- Módulo 2.1: Número de señales capturadas
- Módulo 2.2: Desplazamiento de registros
- Módulo 2.3: Guardar archivo
- Módulo 2.4: Grafica del evento
- Módulo 2.5: Información del registro

Finalmente, la sección de caracterización está conformada de nueve módulos responsables a la determinación de parámetros temporales y de magnitud de las señales de NBPs, tal y como se aprecia en la figura 4-3:

- Módulo 3.1: Gráfica del registro de NBP
- Módulo 3.2: Cargar registro
- Módulo 3.3: Información del registro
- Módulo 3.4: Asignación del nivel de referencia
- Módulo 3.5: Selección del tipo de NBPs
- Módulo 3.6: Selección de puntos
- Módulo 3.7: Verificación del punto C
- Módulo 3.8: Calculo de parámetros
- Módulo 3.9: Guardar datos

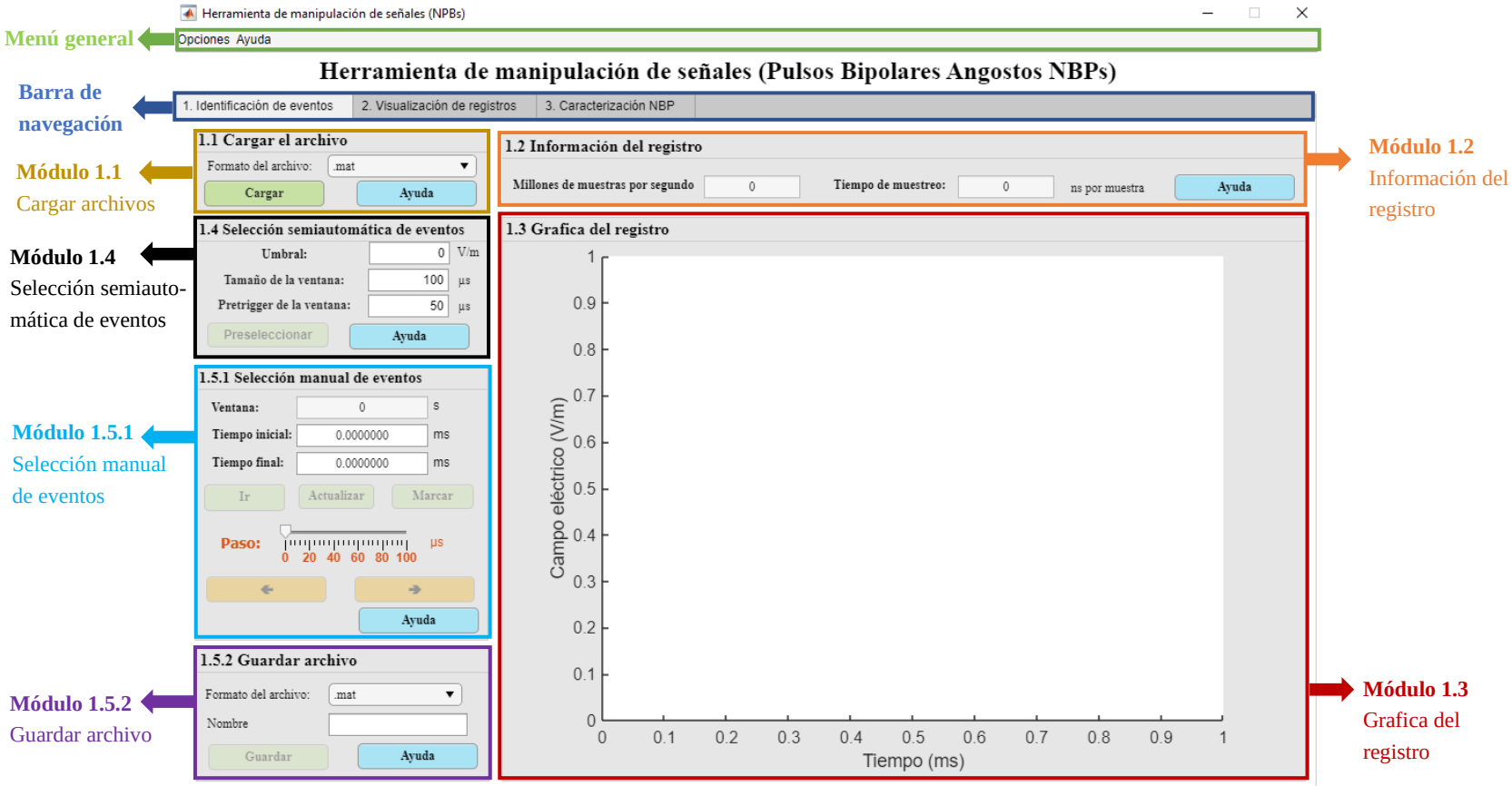


Figura 4-1 Interfaz gráfica de la sección de identificación de eventos

Fuente: autor

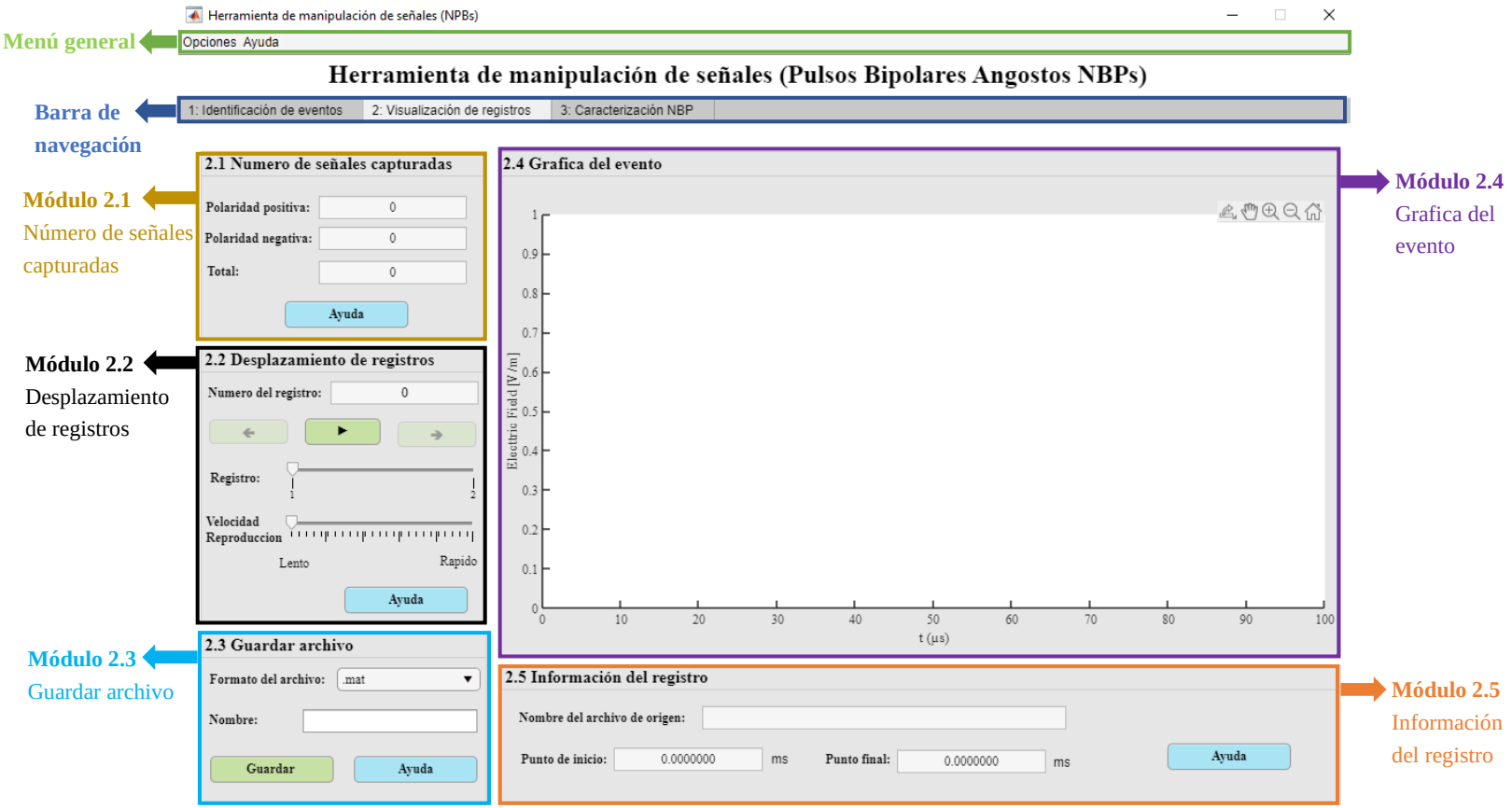


Figura 4-2 Interfaz gráfica de la sección de visualización de registros
Fuente: autor

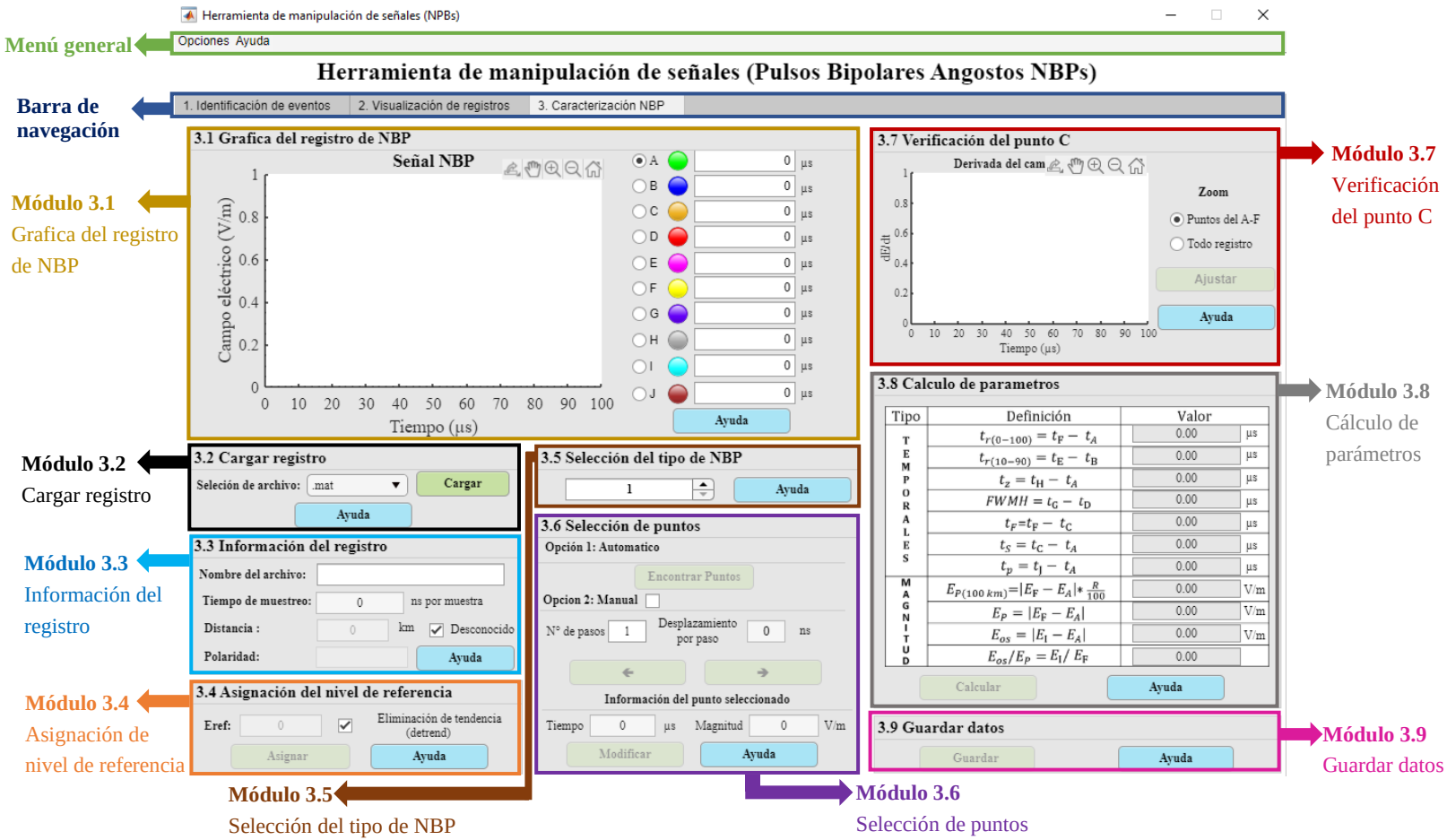


Figura 4-3 Interfaz gráfica de la sección de caracterización de NBPs
Fuente: autor

En la tabla 4-1 se describen las funciones principales que hacen de la herramienta computacional HMS_NPBs. Cabe mencionar que en el anexo A se encuentra el manual de usuario completo, documento que describe de forma más detallada cada uno de sus componentes, funciones operativas, mensajes de advertencia, proceso de instalación, y toda la información necesaria para su ejecución y uso.

Tabla 4-1 Funciones principales de los módulos del software HMS_NPBs

Sección	Módulo	Función
Identificación de eventos	1.1. Cargar archivo	Permite cargar un registro de campo eléctrico al aplicativo.
	1.2. Información del registro	Permite visualizar características del registro ingresado en el módulo 1.1 como: número de muestras en millones por segundo y el tiempo de muestreo.
	1.3. Grafica del registro	Grafica el registro ingresado en el módulo 1.1.
	1.4. Selección semiautomática de eventos	Selecciona los segmentos del registro que cumplen una serie de condiciones que permite identificar las señales de campo eléctrico de NBPs. En la siguiente sección de este capítulo se dará una explicación más detallada.
	1.5.1. Selección manual de eventos	Permite inspeccionar el registro ingresado en el módulo 1.1. además de seleccionar un segmento del registro en caso de que el usuario requiera guardarlo.
	1.5.2. Guardar archivo	Permite guardar un segmento del registro ingresado en el módulo 1.1.
Visualización de registros	2.1: Número de señales capturadas	Muestra el número de señales encontradas por el algoritmo de identificación de eventos.
	2.2: Desplazamiento de registros	Permite cambiar la señal visualizada en el módulo 2.4 del conjunto de señales seleccionadas por el algoritmo de identificación de eventos.
	2.3: Guardar archivo	Permite guardar la señal visualizada en el módulo 2.4.
	2.4: Grafica del evento	Muestra las señales encontradas por el algoritmo de identificación de eventos.
	2.5: Información del registro	Muestra el nombre del registro del que se extrajo la señal visualizada en el módulo 2.4, y además la posición en el tiempo del punto de inicio y final

Nota: la tabla continua en la siguiente página.

Sección	Módulo	Función
Caracterización de NBP	3.1: Gráfica del registro de NBP	Grafica el registro de NBP ingresado en el módulo 3.2.
	3.2: Cargar registro	Permite cargar el registro de campo eléctrico de NBP en el aplicativo.
	3.3: Información del registro	Permite visualizar características del registro como: nombre del archivo ingresado, número de muestras en millones por segundo y el tiempo de muestreo.
	3.4: Asignación del nivel de referencia	Permite asignar o determinar el nivel de referencia de la señal ingresada en el módulo 3.2.
	3.5: Selección del tipo de NBPs	Permite diligenciar el tipo de NBP del registro ingresado en el módulo 3.1, este dato será anexado posteriormente en la base de datos.
	3.6: Selección de puntos	Localiza automáticamente todos los puntos característicos del registro ingresado, además permite modificar su posición en caso de que el usuario lo requiera.
	3.7: Verificación del punto C	Permite verificar la correcta selección del punto característico C.
	3.8: Calculo de parámetros	Calcula los parámetros característicos de la señal de NBP ingresada en el módulo 3.2.
	3.9: Guardar datos	Guardar los parámetros calculados en el módulo 3.8 en la base de datos (hoja de cálculo tipo Excel).

Fuente: autor

4.3. Proceso de identificación de eventos

Como se mencionó anteriormente, las formas de onda de campo eléctrico de NBPs se caracterizan por tener una primera cresta de gran magnitud y una corta duración en la escala de microsegundos. Adicionalmente, todas las formas de onda típicas tienen sin excepción dos puntos que cruzan por su referencia antes y después de su pico máximo. A partir de estas características, se desarrolló un algoritmo que facilita su identificación. Cabe mencionar que este algoritmo también puede identificar formas de onda de otros tipos de eventos eléctricos atmosféricos tales como descargas preliminares y return strokes, entre otros. Esto se debe a que la aplicación permite ajustar varios parámetros de entrada, tales como umbral, tamaño completo de la ventana y pretrigger de la ventana. A continuación, se explicará su funcionamiento y la relación con los parámetros mencionados.

Inicialmente, para el proceso de identificación de eventos, se debe ingresar un registro de campo eléctrico. El algoritmo realiza el reconocimiento de los vectores de tiempo y magnitud de la señal cargada (señal de entrada) en la herramienta. Luego, se identifican los puntos de la señal que superen un valor de magnitud (tanto positivos como negativos). Este valor corresponde al parámetro de ingreso ***umbral***. Posteriormente, se selecciona una porción de la señal alrededor de cada punto

definido por encima del umbral. Esta porción se denomina sub-ventana y su extensión será determinada por el parámetro ***tamaño de la ventana***, mientras su posición inicial será asociada con un tiempo previo al punto seleccionado. Dicho tiempo es el parámetro de ingreso ***pretrigger de la ventana.***

El algoritmo verificará si el punto seleccionado es el de mayor magnitud dentro de su sub-ventana, y en caso de que no se cumpla la sub-ventana será descartada, así con cada punto identificado. Del mismo modo, se verifica si la porción de la señal contenida en cada sub-ventana tiene cruce por el nivel de referencia antes y/o después del punto de mayor magnitud. Finalmente, para el correcto reconocimiento de las formas de onda de NBPs el usuario deberá inspeccionar las sub-ventanas recopiladas por el algoritmo (consideradas como potencialmente válidas) y compararlas con las formas de ondas típicas presentadas en la tabla 3-1. En la figura 4-4 se observa el flujograma del algoritmo desarrollado y en figura 4-5 su diagrama de flujo. El procedimiento para la ejecución de los procesos mencionados se explicará a continuación, este puede ser complementado con el manual de usuario incluido en el **anexo A,** el tutorial en el **anexo B** y el video-tutorial del **anexo C**.

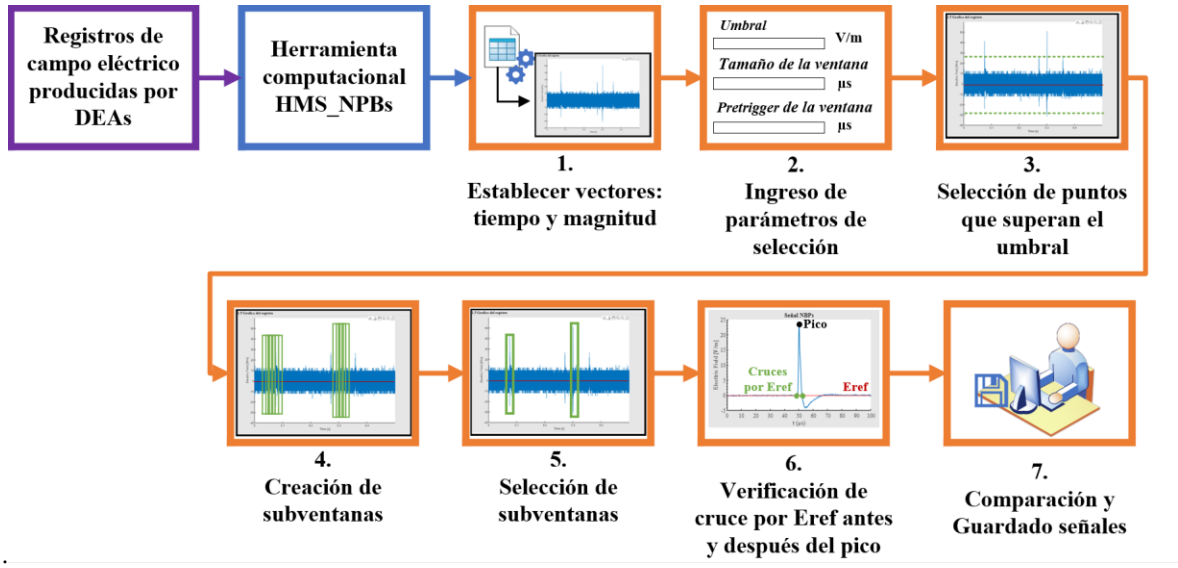


Figura 4-4 Flujograma selección señales de campo eléctrico que coinciden con las características de los NBPs
Fuente: autor

Espacio dejado en blanco de manera intencional

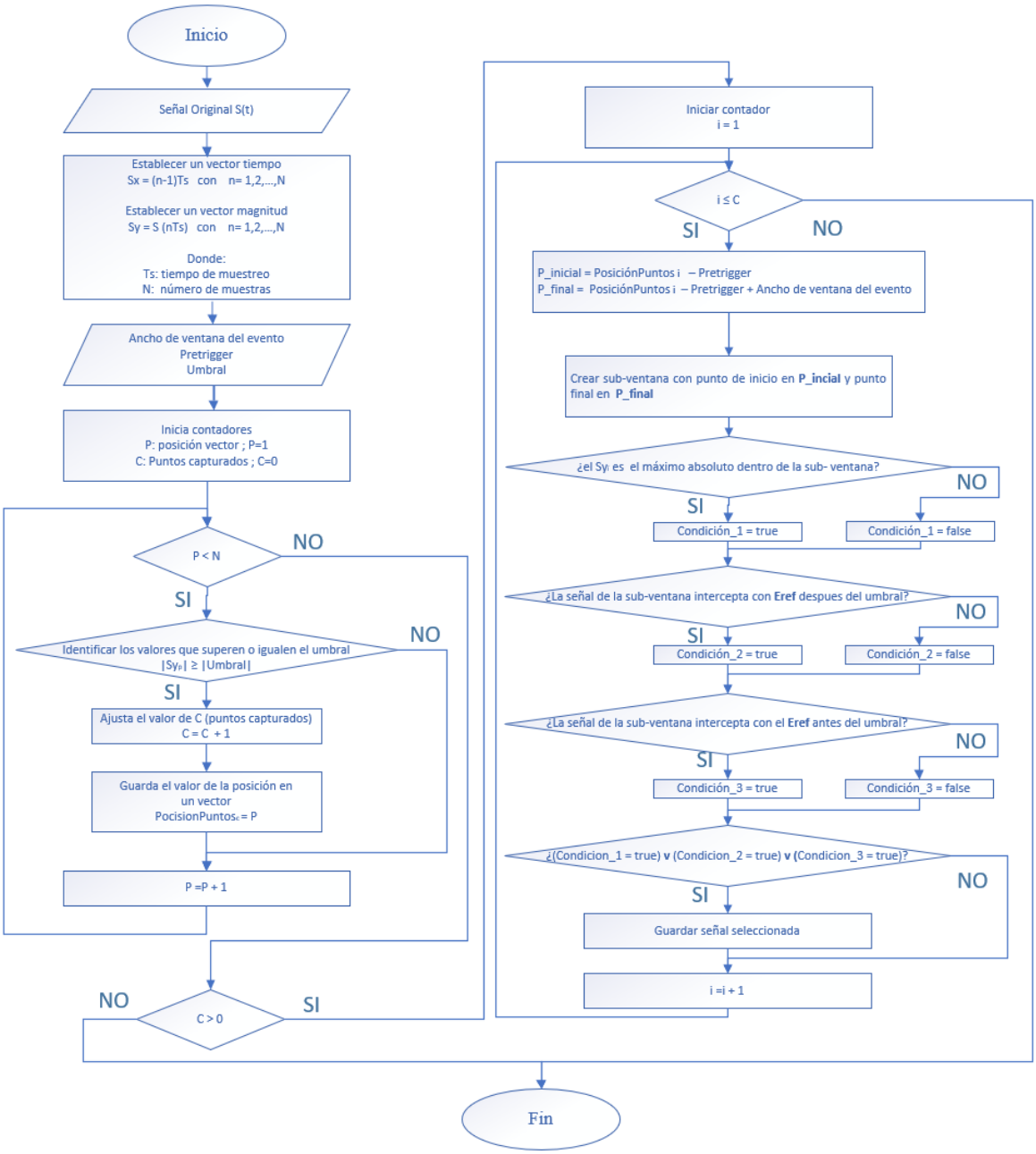


Figura 4-5 Algoritmo #1 para la identificación y selección de señales de campo eléctrico que coinciden con las características de los NBPs

Fuente: autor

Para realizar el proceso de identificación de señales de NBPs usando el aplicativo HMS_NBPs se tomarán de ejemplo dos registros, uno sin presencia de señales de NBPs y otra con presencia de ellos. Inicialmente se debe dar clic el botón “cargar” del módulo 1.1 para ingresar el registro de campo eléctrico al aplicativo. En este caso se ingresó la señal de campo eléctrico que se muestra en la figura 4-6.

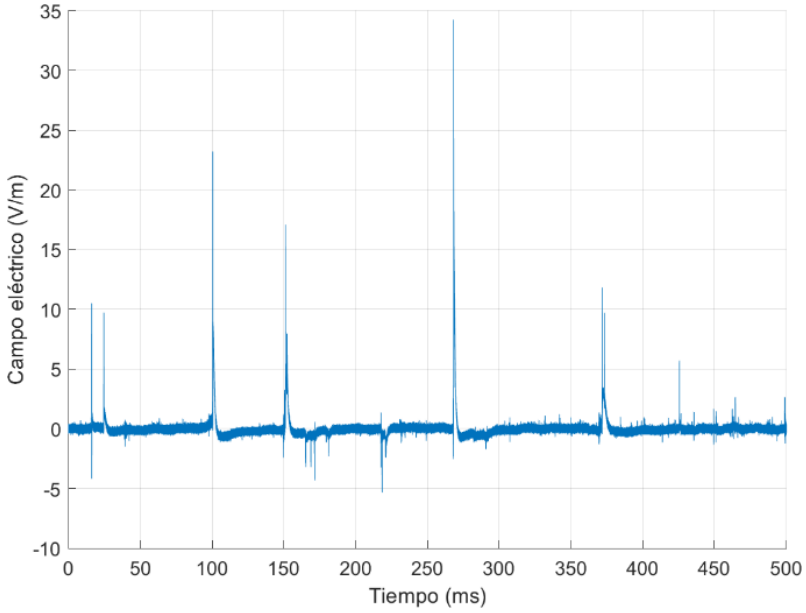


Figura 4-6 Grafica del registro W_161125_203336_Ezb
Fuente: autor

Posteriormente, en el módulo 1.4 de la interfaz se ingresan los parámetros de entrada del algoritmo de identificación de eventos. Para el ejemplo presentado, los valores fueron 5 V/m de Umbral, 100 µs de tamaño de ventana y 50 µs de pretrigger. Luego, se deberá presionar el botón "preseleccionar" del mismo módulo, inmediatamente aparecera una ventana emergente informando la cantidad de señales seleccionadas por el algoritmo. Para este ejemplo, el aplicativo no encontró ninguna señal. En la figura 4-7 se observa el mensaje de la ventana emergente que entrega el aplicativo.

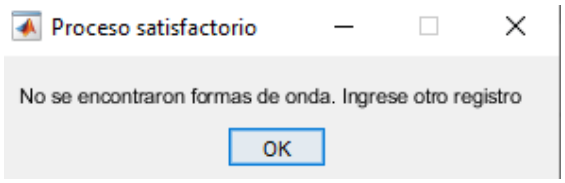


Figura 4-7 Mensaje luego de la selección de señales del registro W_161125_203336_Ezb
Fuente: autor

Ahora bien, al ingresar un segundo registro y luego de diligenciar los mismos parámetros del ejemplo anterior, en este caso el aplicativo identifica cuatro señales, tres con polaridad negativa y una positiva. Para observar estas señales seleccionadas el usuario puede dirigirse a la sección de visualización de registros. En la figura 4-8 se observa el segundo registro ingresado, mientras en la figura 4-9 se incluye la ventana emergente con la información del número de eventos encontrados por el aplicativo.

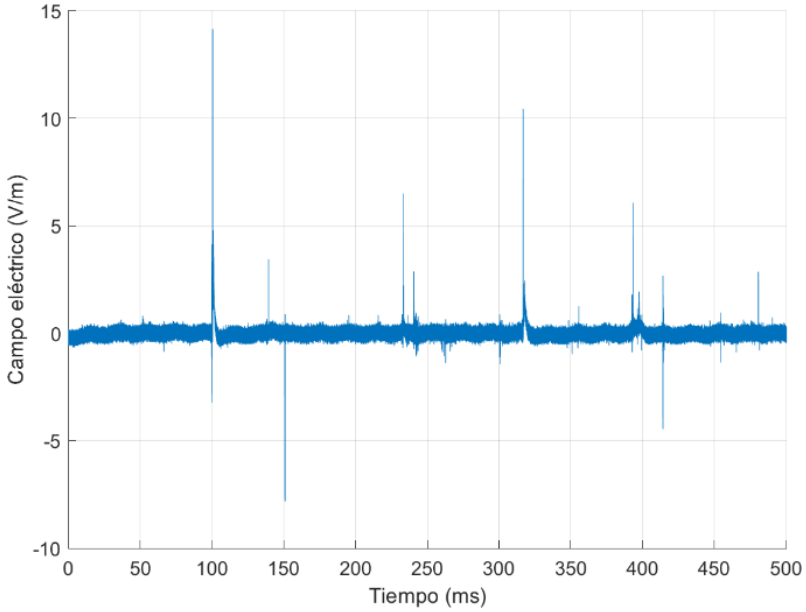


Figura 4-8 Grafica del registro W_161125_203955_Ezb
Fuente: autor

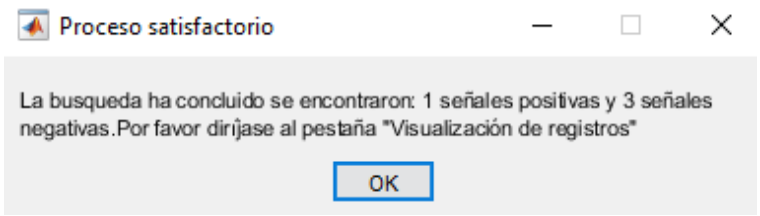


Figura 4-9 Mensaje luego de la selección de señales del registro W_161125_203955_Ezb
Fuente: autor

Una vez ubicado en la sección de visualización de registros, se observa en el módulo 2.4 la gráfica de la primera señal encontrada. Para cambiar la señal visualizada simplemente se oprime los botones de flechas o la barra de registro del módulo 2.2. En la figura 4-10 se incluyen las cuatro formas de onda de los eventos identificados por el aplicativo. Posteriormente, el usuario debe comparar las señales identificadas con las formas de ondas típicas (ver tabla 3-3) para determinar si alguna de ellas coincide con un NBP. En este ejemplo, se puede observar que la única señal que cumple con dichas características es la incluida en la figura 4-10 (a). Esta señal de NBP podra ser guardada usando el módulo 2.3 de la herramienta.

El aplicativo también permite la selección manual de señales usando los módulos 1.5.1 y 1.5.2. En dichos módulos se disponen herramientas gráficas que facilitan el inspeccionar, recortar y guardar las señales de interés que se encuentran dentro del registro. Adicionalmente permite marcar las partes del registro que ya han sido examinadas. Estas funciones son explicadas detalladamente en el manual de usuario (ver anexo A). En la figura 4-11 se muestra el segundo registro luego de realizar un proceso de inspección manual.

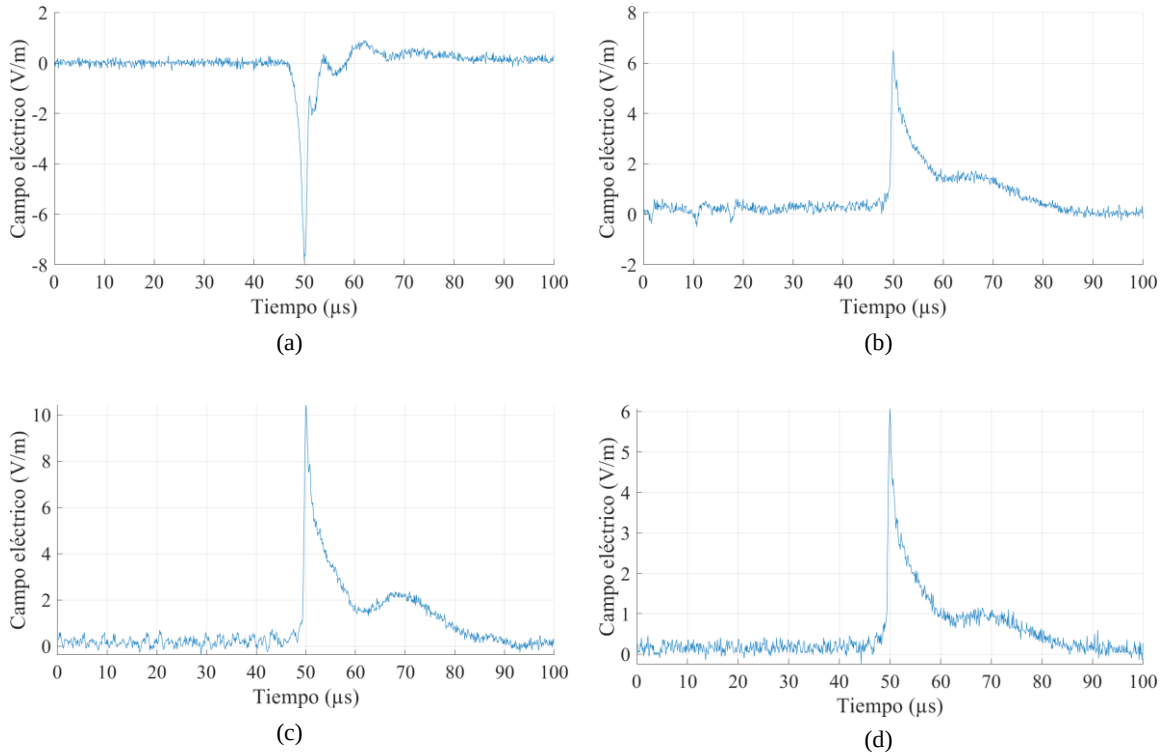


Figura 4-10 Señales seleccionadas por el algoritmo de identificación de eventos posicionadas en el tiempo en: (a) 150.87 ms; (b) 233.21 ms; (c) 316.86 ms; (d) 393.70 ms

Fuente: autor

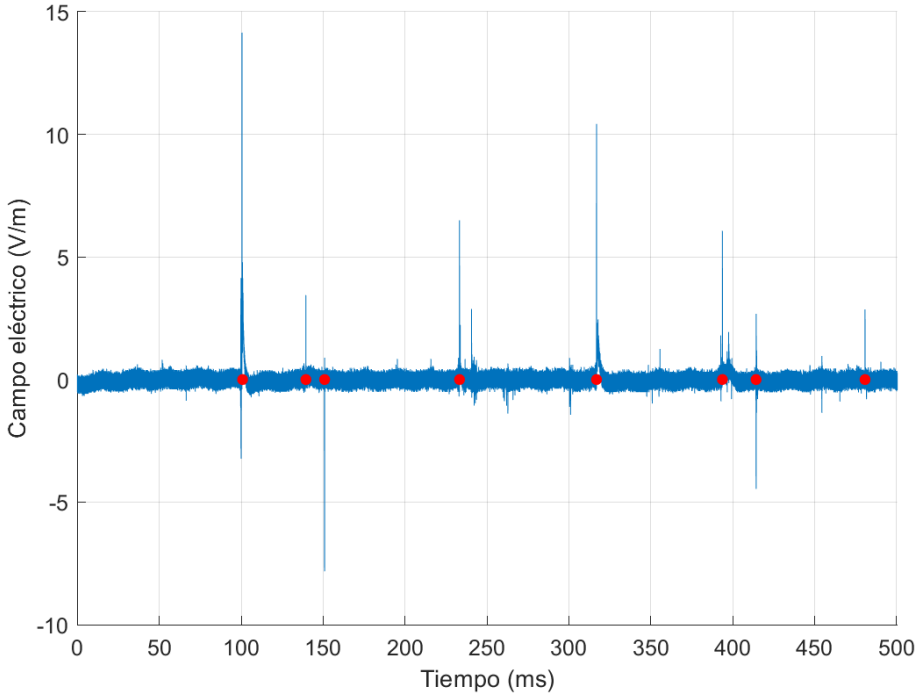


Figura 4-11 Registro "W_161125_203955_Ezb.mat" luego de realizar un proceso de inspección manual

Fuente: autor

4.4. Caracterización de NBPs

A partir de la información presentada en la sección 3.7, en donde se explicaba las formas de ondas típicas de NBPs, sus parámetros y puntos característicos, se desarrolló un segundo algoritmo para caracterizar las señales de campo eléctrico asociadas a los NBPs. En la figura 4-12 y la figura 4-13 se observa estructura general y su diagrama de flujo, respectivamente.

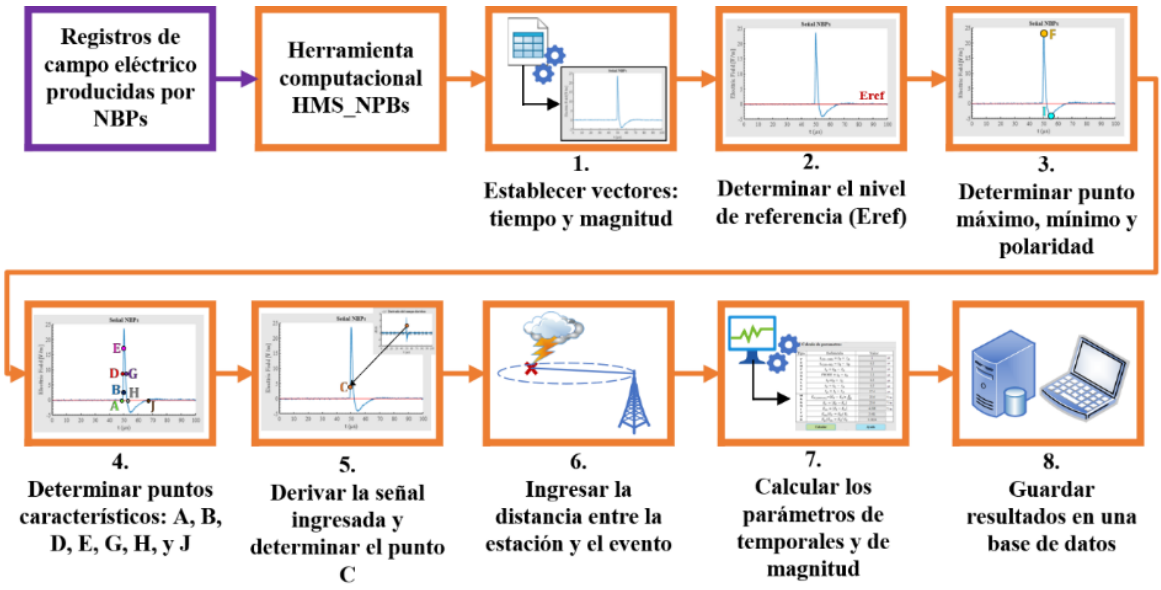


Figura 4-12 Flujograma del proceso de caracterización de señales de campo eléctrico de NBPs
Fuente: autor

Este algoritmo reconoce los vectores de tiempo y magnitud, luego asigna el nivel de referencia (Eref) de la señal bajo estudio, encuentra los puntos de mayor y menor magnitud (F y I), y establece la polaridad. Enseguida, determina el punto inicial y final de la señal (A y J), el punto de cruce por cero (H), los primeros puntos en alcanzar el 10% (B), 50% (D) y 90% (E) de su pico máximo, y el segundo punto en alcanzar el 50% después del pico máximo (G). Posteriormente, el algoritmo estima la derivada del campo eléctrico y encuentra el punto de mayor pendiente (C) en el inicio de la señal. Finalmente, se calculan los parámetros y se guardan en una base de datos. Al igual que con el primer algoritmo, el procedimiento para la ejecución de estos procesos mencionados se explica en el manual de usuario.

Espacio dejado en blanco de manera intencional

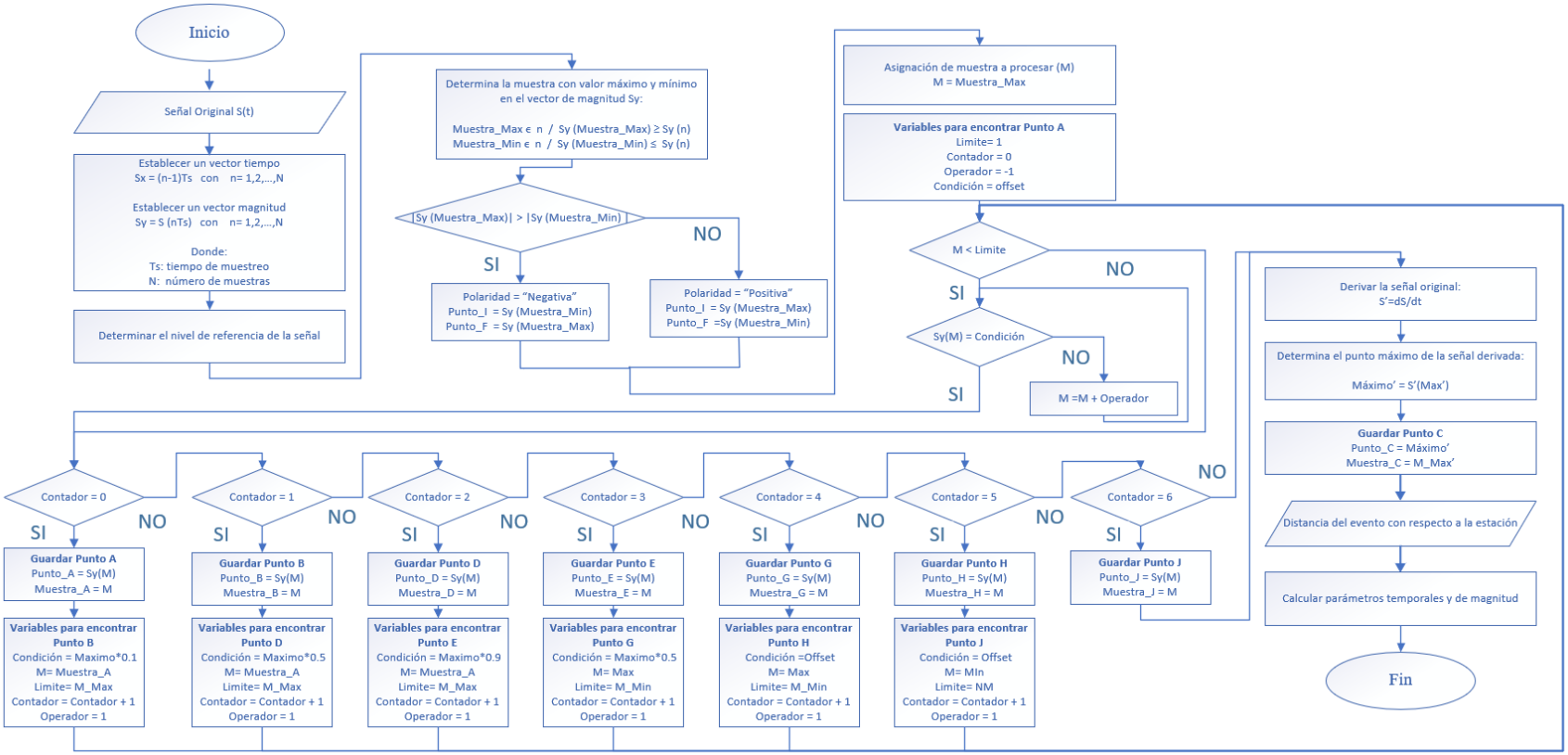


Figura 4-13 Algoritmo # 2 para caracterización de señales de campo eléctrico de NBPs
Fuente: autor

4.4.1. Ejemplo 1: Caracterización de parámetros de un NNBP

Para describir el funcionamiento de esta etapa se incluirán dos señales de ejemplo de NBPs, una de polaridad positiva (PNBP) y otra de polaridad negativa (NNBP). La primera señal fue extraída del registro "W_161121_185706_Ezb", su forma de onda es bipolar con una cresta inicial de un solo pico, mientras la segunda cresta presenta pequeñas oscilaciones (NBP tipo 2). Este registro es ingresado al aplicativo en el módulo 3.2 y graficado usando el módulo 3.1. En la figura 4-14 se observa la gráfica de este NNBP.

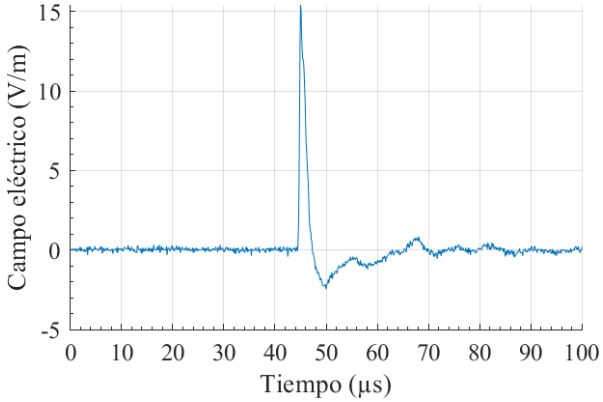


Figura 4-14 NNBP obtenido en el registro W_161121_185706_Ezb
Fuente: autor

Posteriormente, en el módulo 3.4 se asigna el nivel de referencia, el cual puede ser diligenciado o calculado automáticamente. Luego, al usar el botón *"encontrar puntos"* del módulo 3.6, el aplicativo se encargará de encontrar los puntos característicos del NNBP. Para verificar visualmente la correcta ubicación de cada punto característico, estos son representados con un color determinado. En la tabla 4-2 se observa el color asignado y la posición en el tiempo de cada uno de ellos para la señal de la figura 4-14.

Tabla 4-2 puntos característicos del registro de NNBP

Puntos	Posición
A	44.4 µs
B	44.6 µs
C	44.7 µs
D	44.8 µs
E	44.9 µs
F	45 µs
G	46 µs
H	47.3 µs
I	50 µs
J	65.2 µs

Fuente: autor

Junto con lo anterior, el aplicativo posicionará los puntos característicos en la gráfica de la señal y los mostrará en el módulo 3.1, tal y como se puede apreciar en la figura 4-15. En caso de que se requiera cambiar la posición de algún punto esto se podrá hacer manualmente con ayuda del módulo 3.6.

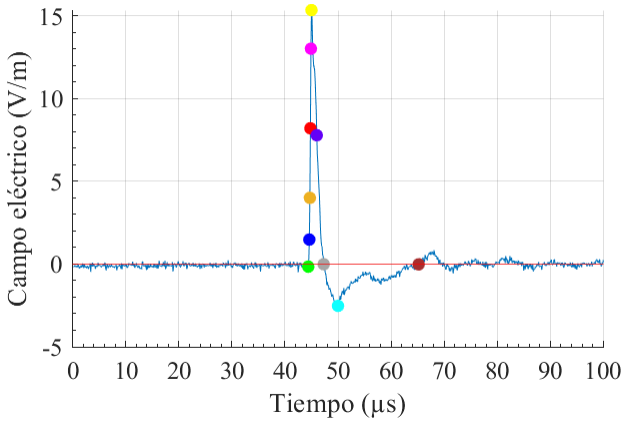


Figura 4-15 Señal de NNBP luego de encontrar los puntos característicos
Fuente: autor

Una vez estimados los puntos característicos de la señal, se podrán calcular los parámetros temporales y magnitud dando clic al botón “calcular” del módulo 3.8. Enseguida los resultados aparecerán en el mismo módulo, tal y como se incluyen en la tabla 4-3.

Tabla 4-3 parámetros de forma de onda para el registro de NNBP

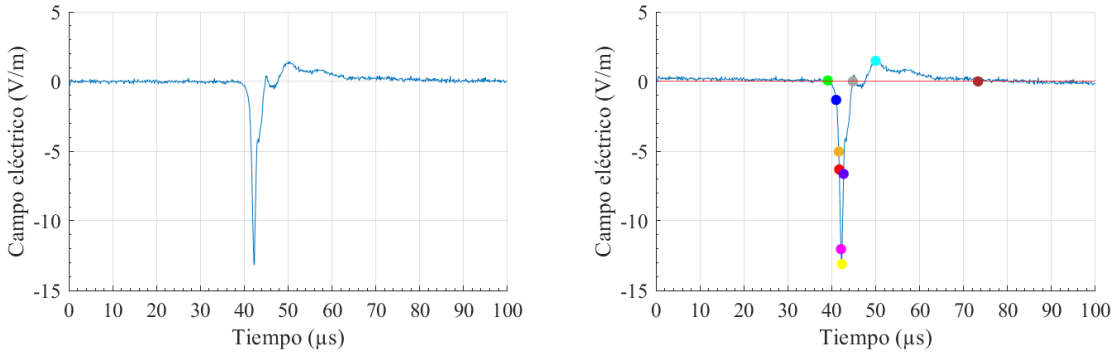
Parámetro	Valor
Tiempo de ascenso de 0 a 100%	0.60 µs
Tiempo de ascenso de 10 a 90 %	0.30 µs
Tiempo de cruce por cero	2.90 µs
Tiempo a la mitad del máximo pico	1.20 µs
Duración del frente de ascenso lento	0.30 µs
Duración del frente de ascenso rápido	0.30 µs
Duración del pulso	20.80 µs
Magnitud del pico	15.34 V/m
Magnitud del pico opuesto	2.53 V/m
Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico	0.16

Fuente: autor

4.4.2. Ejemplo 2: Caracterización de parámetros de un PNBP

La segunda señal es un PNBP extraído del registro “W_161121_221225_Ezb”. Su forma de onda es bipolar con una primera cresta con un pequeño pico después del pico de mayor magnitud, mientras la segunda cresta presenta pequeñas oscilaciones (NBP tipo 3). El proceso para caracterizar esta señal es el mismo que el ejemplo anterior. En la figura 4-16 se observa la gráfica de registro analizado y

sus puntos característicos. Por su parte, la posición de cada punto se observa en la tabla 4-4, y los parámetros de la forma de onda en la tabla 4-5.



(a) (b)

Figura 4-16 PNBP obtenido en el registro "W_161121_221225_Ezb": (a) al ingresarlo en el aplicativo; (b) luego de encontrar los puntos característicos.

Fuente: autor

Tabla 4-4 puntos característicos del registro de PNBP

Puntos	Posición
A	38.6 µs
B	41 µs
C	41.6 µs
D	41.7 µs
E	42.1 µs
F	42.3µs
G	42.7µs
H	45.5µs
I	50 µs
J	73.7 µs

Fuente: autor

Tabla 4-5 parámetros de forma de onda para el registro PNBP

Parámetro	Valor
Tiempo de ascenso de 0 a 100%	3.70 µs
Tiempo de ascenso de 10 a 90 %	1.10 µs
Tiempo de cruce por cero	6.90 µs
Tiempo a la mitad del máximo pico	1 µs
Duración del frente de ascenso lento	0.70 µs
Duración del frente de ascenso rápido	3 µs
Duración del pulso	35.10 µs
Magnitud del pico	13.18 V/m
Magnitud del pico opuesto	1.45 V/m
Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico	0.11

Fuente: autor

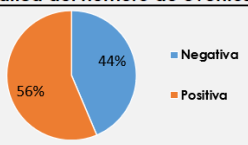
Para guardar los resultados en la base de datos se ha diseñado un archivo tipo Excel® marcada como "BD_NBPs" que almacenará cada uno de los parámetros identificados en los NBPs y facilitará el cálculo de indicadores estadísticos. Para esto, se debe dar clic al botón *"guardar"* del módulo 3.9 y seleccionar el archivo.

Esta hoja de cálculo está compuesta por dos pestañas, *"Resultados"* y *"Estadísticas"*. La pestaña *"Resultados"* almacenará los parámetros obtenidos por el aplicativo, el nombre del registro, la polaridad de la señal y tipo de NBP. Por su parte, la pestaña *"Estadísticas"* incluye los registros almacenados en la pestaña *"Resultados"* agrupados según la polaridad (positiva, negativa o ambas polaridades) y el tipo de NBPs. Adicionalmente, se calcularán indicadores estadísticos para cada parámetro de la forma de onda, tales como: media aritmética, media geométrica, desviación estándar, máximos y mínimos. En la figura 4-17 se incluye un vistazo de los datos guardados en la pestaña "Resultados", mientras en la figura 4-18 se visualiza parte del contenido de la pestaña "Estadísticas".

Nombre de la señal	Polaridad	Tipo de NBP	tiempo de ascenso [0-100%] (µs)	tiempo de ascenso [10-90%](µs)	Tiempo de cruce por cero (µs)	Tiempo del ancho del pico completo a media altura (µs)	Frente lento (µs)	Frente rapido (µs)	Duracion del pulso (µs)	Magnitud del pico normalizado a 100 km (V/m)	Magnitud del pico (V/m)	Magnitud del pico opuesto (V/m)	Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico
W_161125_220049_Ezb.mat	Negativo	1	1,10	0,60	3,30	1,50	0,40	0,70	18,30	-	22,74	3,62	6,28
W_161125_220059_Ezb.mat	Negativo	1	1,00	0,50	3,00	1,10	0,50	0,50	17,40	-	23,60	4,31	5,48
W_161125_220151_Ezb.mat	Negativo	1	1,50	0,50	4,10	1,40	0,80	0,70	18,10	-	20,26	3,90	5,19
W_161125_220315_Ezb.mat	Negativo	1	0,90	0,50	3,40	1,20	0,40	0,50	21,10	-	16,22	2,27	7,14
W_161121_185645_Ezb.mat	Negativo	2	1,10	0,50	3,80	1,00	0,60	0,50	22,00	-	20,79	2,77	7,52
W_161121_185706_Ezb.mat	Negativo	2	0,60	0,30	2,90	1,20	0,30	0,30	20,80	-	15,34	2,53	6,08
W_161121_185713_Ezb.mat	Negativo	2	1,30	0,70	3,30	1,30	0,60	0,70	21,70	-	20,79	3,50	5,94
W_161121_185726_Ezb.mat	Negativo	2	0,90	0,40	2,80	1,00	0,40	0,50	21,00	-	17,97	2,83	6,35
W_161121_185757_Ezb.mat	Negativo	2	0,60	0,30	2,70	0,90	0,20	0,40	8,40	-	12,86	2,03	6,34
W_161121_185804_Ezb.mat	Negativo	2	1,10	0,50	2,70	1,10	0,60	0,50	21,90	-	21,59	3,35	6,44

Resultados | Estadisticas

Figura 4-17 Pestaña resultados de la plantilla ParametrosCalculados.xlsx
Fuente: autor

Polaridad	Número de eventos	Porcentaje	Gráfica del número de eventos
Negativa	24	44%	
Positiva	31	56%	
Total	55	0%	

Tipo de NBPs	Numero de eventos						Graficas de barras
	Polaridad Negativa	%	Polaridad Positiva	%	Ambas polaridades	%	
1	4	17%	4	13%	8	15%	
2	20	83%	4	13%	24	44%	
3	0	0%	16	52%	16	29%	
4	0	0%	0	0%	0	0%	
5	0	0%	5	16%	5	9%	
6	0	0%	0	0%	0	0%	
7	0	0%	1	3%	1	2%	
8	0	0%	0	0%	0	0%	
9	0	0%	0	0%	0	0%	
10	0	0%	0	0%	0	0%	
11	0	0%	1	3%	1	2%	
Total	24	100%	31	100%	55	100%	

Resultados | Estadisticas

(a)

Nota: la figura continua en la siguiente página.

Pulsos bipolares angostos de ambas polaridades					Número de eventos	55
Tipo	Parámetros característicos	medidas estadísticos				
		Mínimo (µs)	Máximo (µs)	Media aritmética (µs)	Media geométrica (µs)	Desviación estándar (µs)
Tiempo	tiempo de ascenso [0-100%] (Tr [0-100%])	0,50	7,40	1,98	1,56	1,52
	tiempo de ascenso [10-90%] (Tr [10-90%])	0,20	3,50	1,06	0,82	0,77
	Tiempo de cruce por cero (Tz)	2,20	15,60	5,36	4,81	2,62
	Tiempo del ancho del pico completo a media altura (FWMH)	0,60	3,30	1,37	1,29	0,51
	Frente lento (Ts)	0,20	5,80	1,22	0,81	1,29
	Frente rapido (Tf)	0,10	1,90	0,76	0,65	0,41
	Duracion del pulso (Tp)	8,40	49,50	21,09	20,13	6,71
Tipo	Parámetros característicos	medidas estadísticos				
		Mínimo (V/m)	Máximo (V/m)	Media aritmética (V/m)	Media geométrica (V/m)	Desviación estándar (V/m)
Magnitud	Magnitud del pico (Ep)	1,19	23,60	10,44	7,73	7,11
	Magnitud del pico normalizado a 100 km (Ep)	0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!
	Magnitud del pico opuesto (Eos)	0,45	4,31	1,78	1,44	1,11
	Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico (Eos/Ep)	2,50	10,07	5,62	5,37	1,68

Resultados | Estadisticas

(b)

Figura 4-18 Pestaña estadísticas de la plantilla BD_NBPs.xlsx: (a) Sección del número de eventos; (b) resultados de los parámetros de la forma de onda para ambas polaridades.

Fuente: autor

5. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE NBPs

En este capítulo se presenta el proceso de validación de la herramienta computacional HMS_NBPs. Adicionalmente, se incluyen los resultados de la caracterización realizada a las cincuenta y cinco señales de NBPs que fueron identificadas en el banco de señales disponible (Sri Lanka, 2016). Estos resultados se comparan con investigaciones realizadas otras regiones del mundo. Para cada parámetro se evaluarán, junto con el valor máximo y el mínimo, tres medidas estadísticas: media geométrica (MG), media aritmética (MA) y desviación estándar (DS).

5.1. Clasificación de los registros

La base de datos analizada está conformada por 55 señales de campo eléctrico generada por NBPs, de los cuales 31 (56.36%) son de polaridad positiva (PNBPs) y 24 (43,64%) de polaridad negativa (NNBPs). Estos registros fueron catalogados según su forma de onda y polaridad. En la figura 5-1 se observa la distribución de la clasificación.

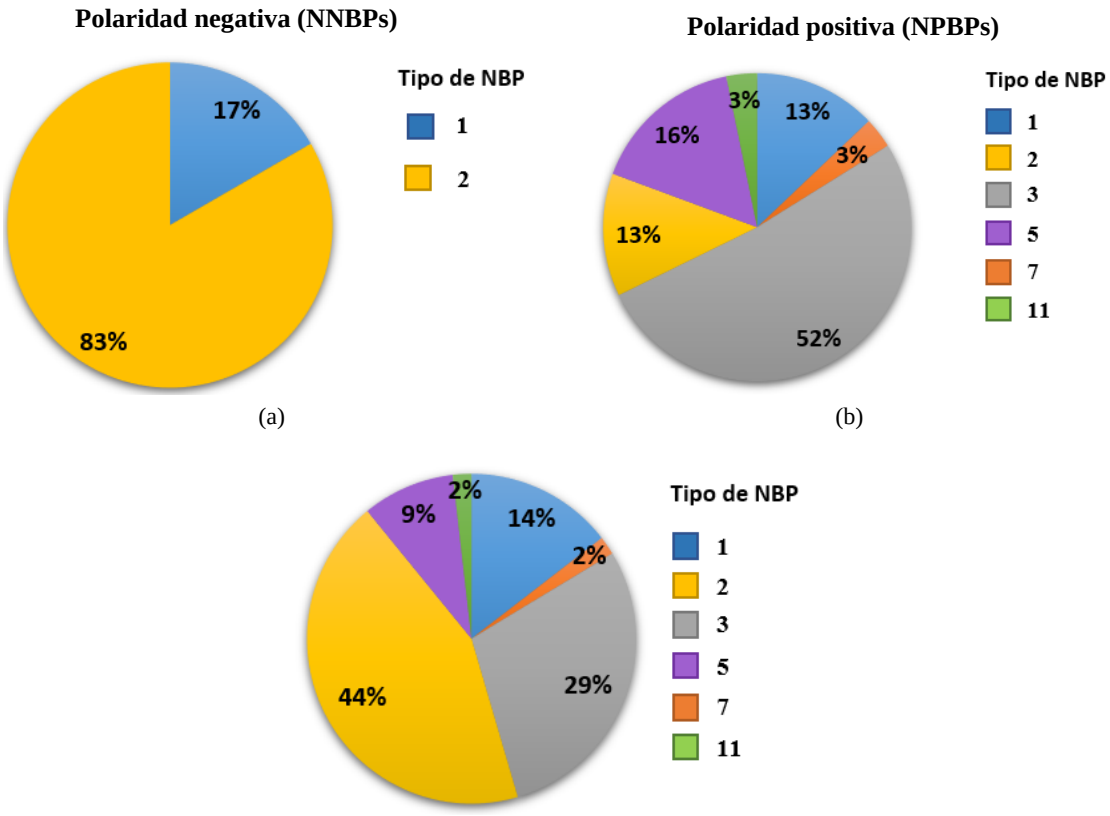


Figura 5-1 distribución de los de los tipos de NBPs: (a) polaridad negativa; (b) polaridad positiva; (c) ambas polaridades

Fuente: autor

De acuerdo a las señales tomadas como referencia y reportadas en investigaciones previas [21], [63], las formas de onda de los NNBPs analizadas en este trabajo están conformadas solo por dos tipos. Buena parte de ellas se caracterizan por tener un único pico en la primera cresta y una segunda cresta de polaridad contraria, con o sin presencia de pequeñas oscilaciones. Por otro lado, los PNBPs son más diversos, identificándose seis tipos de forma de onda. El tipo 3 y 5 (ver Tabla 3-3) tienen una mayor presencia en la polaridad negativa y se caracterizan por exhibir un segundo pico en la primera cresta después del pico de mayor magnitud.

5.2. Validación de la herramienta computacional

Este proceso se realizó a partir de la caracterización de las cincuenta y cinco señales de NBPs de forma manual y luego con la herramienta computacional HMS_NBPs. Posteriormente, se estimó la diferencia porcentual de cada uno de los parámetros calculados usando ambos procedimientos. Esta prueba mostró valores iguales en todos los parámetros, a excepción de la duración del pulso con una diferencia de estimación promedio de 32.44% y una desviación estándar de 13.68%. Estas diferencias se asocian a la selección del punto F ya que en algunas señales se presenciaban varios cruces por la referencia luego de pasar el máximo de la segunda cresta. Este punto puede ser ajustado dentro de la herramienta, de manera que haciendo este ajuste manualmente no se tendría ninguna diferencia porcentual. En el anexo G se sintetizan los resultados obtenidos con ambos procedimientos.

Respecto a los tiempos de caracterización obtenidos con la herramienta HMS_NBPS, se evidenció que cada registro se procesa en 73 segundos promedio (desviación estándar de 8 s), con una duración total de 63 minutos para los 55 registros. La reducción de tiempo es considerable en comparación con procedimientos manuales, disminuyendo hasta una séptima parte. En el anexo F se incluye una tabla que muestra la duración del proceso de caracterización para cada registro.

Adicionalmente, como ya se mencionó en la introducción de este capítulo, en las siguientes secciones se compararán los resultados de este estudio con aquellos obtenidos en otras regiones del mundo. Para esto, serán contrastados indicadores estadísticos y aspectos adicionales como: número de registros obtenidos, ubicación geográfica y temporada de la campaña de medición. En total se revisaron 17 investigaciones seleccionadas a partir de una búsqueda rigurosa en diversas bases de datos.

5.3. Parámetros analizados y resultados generales

En total se analizaron siete parámetros temporales y tres de magnitud. Sin embargo, debido a que no todos los parámetros referidos en este estudio son incluidos en las publicaciones, en algunos de ellos se deja el espacio sin diligenciar. Los parámetros analizados fueron: tiempo de ascenso de 0 a 100% (Tr [0-100%]), tiempo ascenso de 10 a 90 % (Tr [10-90%]), tiempo de cruce por cero (Tz), tiempo a la mitad del máximo pico (FWMH), duración del frente de ascenso lento (Ts), duración del frente de

ascenso rápido (Tfr), duración del pulso (Tp), magnitud del pico (Ep), magnitud del pico opuesto (Eos) y relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico (Eos/Ep).

Los resultados son presentados para ambas polaridades, evaluando el valor máximo (MAX), el valor mínimo (MIN) y tres medidas estadísticas adicionales: la media aritmética (MA), la media geométrica (MG) y la desviación estándar (DE). En la tabla 5-1 se muestra el consolidado de los resultados obtenidos de la caracterización del banco de señales de NBPs recolectadas en Weligatta-Sri Lanka durante la temporada octubre–noviembre de 2016. Adicionalmente, agrupados por polaridad, se presenta el análisis de resultados y su comparación con trabajos previos.

Tabla 5-1 Síntesis de los resultados estadísticos obtenidos para los parámetros de las señales de NBP analizadas

	N° de eventos	medidas estadísticas	Parámetros temporales							Parámetros de magnitud		
			Tr [0-100%] (µs)	Tr [10-90%] (µs)	Tz (µs)	FWMH (µs)	Ts (µs)	Tfr (µs)	Tp (µs)	Ep (V/m)	Eos (V/m)	Eos/Ep
Polaridad Negativa (NNBPs)	24	MIN	0.60	0.30	2.20	0.60	0.20	0.30	10.75	1.20	0.11	8.40
		MAX	1.60	0.70	4.30	1.50	1.10	0.70	23.60	4.31	0.20	22.20
		MA	0.93	0.45	3.14	1.07	0.43	0.49	17.47	2.76	0.16	19.13
		MG	0.89	0.44	3.10	1.05	0.40	0.48	17.05	2.64	0.16	18.86
		DE	0.26	0.09	0.47	0.60	0.20	0.10	3.67	0.77	0.02	2.72
Polaridad positiva (PNBPs)	31	MIN	0.50	0.20	3.80	0.60	0.40	0.10	1.19	0.45	0.10	9.20
		MAX	7.40	3.50	15.60	3.30	5.80	1.90	14.87	3.56	0.40	49.50
		MA	2.79	1.54	7.08	1.60	1.83	0.96	5.01	1.02	0.23	21.62
		MG	2.40	1.34	6.76	1.51	1.42	0.83	4.19	0.90	0.21	20.16
		DE	1.59	0.74	2.30	0.55	1.44	0.44	3.40	0.65	0.07	8.30

Fuente: autor

5.4. Caracterización de NNBPs

5.4.1. Tiempo de ascenso de 0 a 100% (Tr [0-100%])

En la Figura 5-2 y la Tabla 5-2 se observa el histograma y los resultados obtenidos en este trabajo y en otras investigaciones, respectivamente. La media aritmética (MA) del parámetro Tr [0-100%] para este estudio fue de 0.93 µs ± 0.26 µs, con valores entre 0.60 µs y 1.60 µs. Este valor es el más bajo

reportado en comparación con otras investigaciones, siendo hasta una tercera parte de lo obtenido en Indonesia [89], [90] y China [29]. Lo mismo ocurre con la media geométrica (MG) cuyo valor fue 0.89 µs, inferior a la obtenida en Indonesia (3.0 µs) [90]. Estas regiones son cercanas a la zona costera, al igual que Weligatta, aunque se observa una diferencia en la latitud respecto a China.

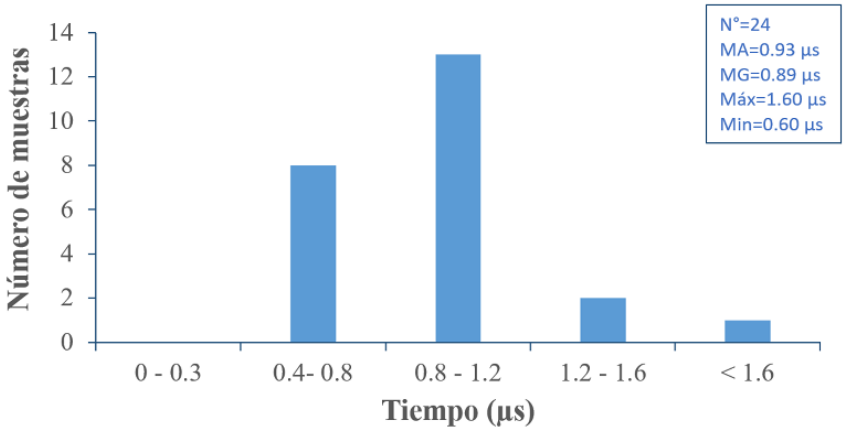


Figura 5-2 Histograma del tiempo de ascenso de 0 a 100% de NNBPs
Fuente: autor

Tabla 5-2 Estadísticas del tiempo de ascenso de 0 a 100% para NNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (µs)	DS (µs)	MG (µs)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	24	0.93	0.26	0.89
[89]	Padang, Indonesia	-	2015 y 2016	28	3.02	1.15	-
[90]	Padang, Indonesia	~0°N	2015	13	3.24	1.20	3.0
[29]	Shanghái, China	31.001°N	2004	67	2.6	0.5	-

Fuente: autor

5.4.2. Tiempo ascenso de 10 a 90 % (Tr [10-90%])

El histograma de los resultados de este estudio se observa en la Figura 5-3, mientras la comparación con otras investigaciones se tiene en la tabla 5-3. Los NNBPs registrados exhibieron una MA para el parámetro Tr [10-90%] de 0.45 µs ± 0.09 µs y una MG de 0.44 µs. Estas medias son similares a las presentadas para Sri Lanka por Gunasekara et al. [23], [107] (0.58 µs y 0.49 µs, respectivamente). Los valores de MA obtenidos en otras regiones varían entre 1.60 µs a 2.32 µs, obteniendo valores similares en zonas cercanas al ecuador (Malasia con 1.60 µs [24] e Indonesia 1.64 µs [90]). No obstante, al tener una latitud similar a Sri Lanka las diferencias pueden deberse a condiciones climáticas cambiantes y a diversas temporadas de lluvias.

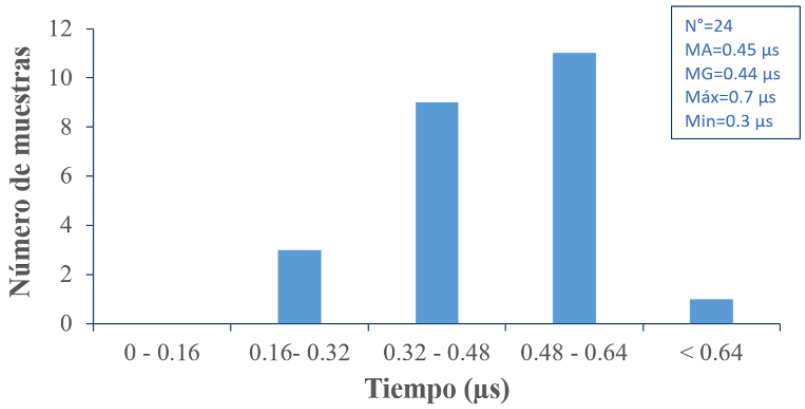


Figura 5-3 Histograma del tiempo de ascenso de 0 a 90% de NNBPs
Fuente: autor

Tabla 5-3 Estadísticas del tiempo de ascenso de 10 a 90 % de NNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (µs)	DS (µs)	MG (µs)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	24	0.45	0.09	0.44
[23]	Matara, Sri Lanka	5.95 °N	2013	142	0.58	0.17	0.56
[107]	Matara, Sri Lanka	5.95 °N	2013	139	0.49	0.10	0.48
[90]	Padang, Indonesia	~0° N	2015	13	1.64	0.51	1.56
[108]	Guangdong, China	-	2007	10398	2.32	1.27	-
[24]	Jonor, Malasia	~1° N	2009	75	1.60	1.0	-
[66]	Florida, U.S.A	-	1989	10	1.82	0.87	-

Fuente: autor

5.4.3. Tiempo de cruce por cero (Tz)

Los resultados consolidados para este parámetro se muestran en la Figura 5-4 y la Tabla 5-4. Las anteriores temporadas de medición realizadas en Sri Lanka reportaron valores de MA muy similares a la obtenida en este trabajo (3.14± 0.47 µs), con diferencias porcentuales del 4.14 % con Gunasekara et al. (2016) [23] y 9.87% con Gunasekara et al. (2014) [107]. Lo mismo ocurre con la MG (3.10 µs), exhibiendo diferencias de 4.19% y 9.68%, respectivamente. Con respecto a lo publicado en otras regiones del mundo, se pueden observar resultados diversos sin una tendencia clara. Un ejemplo de esto se observa para las regiones de baja y media altitud como es el caso de Malasia (MA = 4.03 µs [92] y MA = 9.0 µs[24]) y China (MA = 4.6 µs [29] y MA = 8.3 µs [93]).

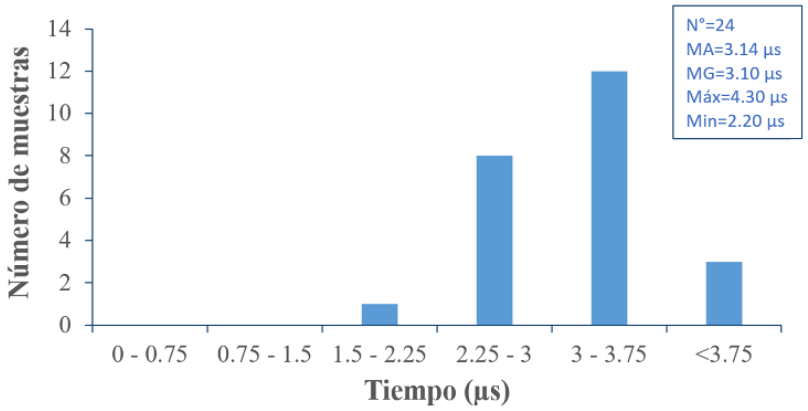


Figura 5-4 Histograma del parámetro de tiempo de cruce por cero de NNBPs
Fuente: autor

Tabla 5-4 Estadísticas del tiempo de cruce por cero de NNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (µs)	DS (µs)	MG (µs)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	24	3.14	0.47	3.10
[23]	Matara, Sri Lanka	5.95 °N	2013	142	3.01	0.54	2.97
[107]	Sri Lanka	5.95°N	2013	139	2.83	0.43	2.8
[89]	Padang, Indonesia	-	2015 y 2016	28	4.91	1.02	-
[93]	Jianghuai, China	-	2012	1395	8.3	1.4	-
[90]	Padang, Indonesia	~0° N	2015	13	5.23	1.14	5.11
[92]	Jonor, Malasia	~1° N	2012	38	4.03		-
[24]	Jonor, Malasia	~1° N	2009	75	9.0	4.5	-
[108]	Guangdong, China	-	2007	10398	6.42	2.60	-
[29]	Shanghái, China	31.001°N	2004	67	4.6	0.7	-

Fuente: autor

5.4.4. Tiempo a la mitad del máximo pico (FWMH)

La MA y la MG reportadas para la FWMH se sintetizan en la Figura 5-5 y la Tabla 5-5. En este estudio, dichas medidas estadísticas (1.07 µs y 1.05 µs respectivamente) fueron las menores respecto a cualquier otro valor incluido en la Tabla 5-5. La menor diferencia se observó con la investigación realizada en Sri Lanka por Gunasekara *et al* [107], exhibiendo una distancia de 10.3% en la MA y 11.4% en la MG. Entre tanto, se encontraron similitudes con regiones de diferente latitud como

Shanghái, China (31°N) con una MA de 2.2 µs [29] y Malasia (~1° N) con 2 µs [92] y 2.2 µs [24]. Adicionalmente, se puede observar que varias regiones ubicadas lejos del ecuador reportaron valores altos de FWMH (dos veces o más), como en el caso de U.S.A [22] y China [93], [108].

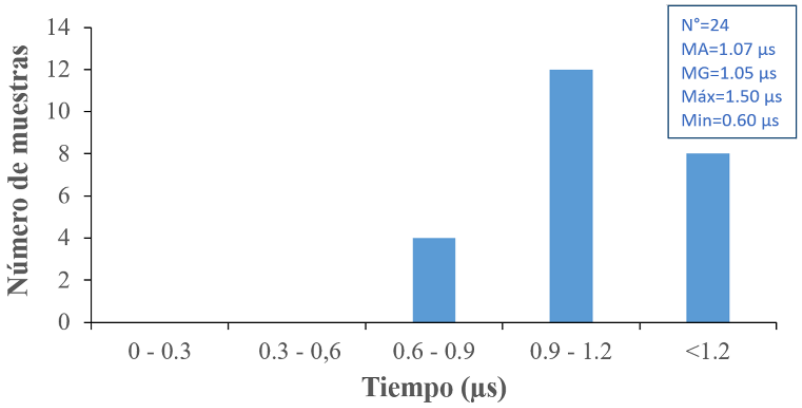


Figura 5-5 Histograma del tiempo a la mitad del máximo pico de NNBPs
Fuente: autor

Tabla 5-5 Estadísticas del tiempo a la mitad del máximo pico de NNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (µs)	DS (µs)	MG (µs)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	24	1.07	0.60	1.05
[23]	Matara, Sri Lanka	5.95 °N	2013	142	1.38	0.25	1.35
[107]	Sri Lanka	5.95°N	2013	139	1.18	0.17	1.17
[93]	Jianghuai, China	-	2012	1395	4.9	1.2	-
[92]	Jonor, Malasia	~1° N	2012	38	2	-	-
[108]	Guangdong, China	-	2007	10398	3.17	1.29	-
[24]	Jonor, Malasia	~1° N	2009	75	2.2	0.7	-
[29]	Shanghái, China	31.001°N	2004	67	2.2	0.3	-
[22]	Nuevo México, U.S.A	-	1996	24	4.7	1.3	-
[66]	Florida, U.S.A	-	1989	10	1.83	0.63	-
[20]	Florida, U.S.A	-	1985 y 1987	18	2.4	1.4	-

Fuente: autor

5.4.5. Duración del frente de ascenso lento (Ts)

La Figura 5-6 y la Tabla 5-6 muestran los resultados consolidados para este parámetro. Muy pocas investigaciones analizan y calculan la Ts en los NBPs, esto se debe a que es necesario calcular la derivada del campo eléctrico para mejorar la estimación. El Ts para NNBPs solo se ha reportado en dos investigaciones, ambas realizadas en Sri Lanka.

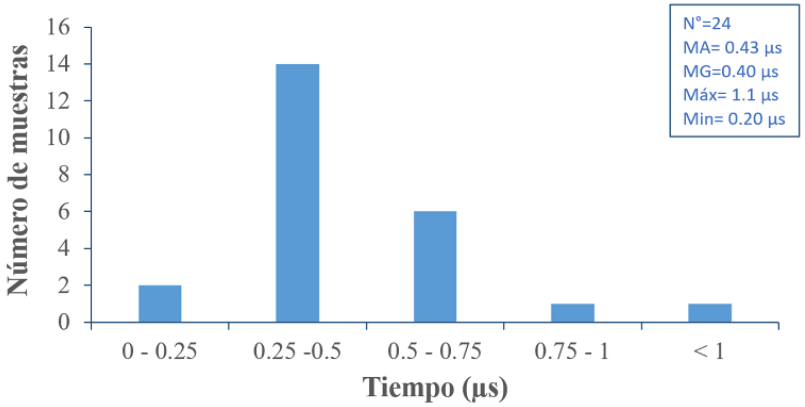


Figura 5-6 Histograma de la duración del frente de ascenso lento de NNBPs
Fuente: autor

Tabla 5-6 Estadísticas de la duración del frente de ascenso lento de NNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (µs)	DS (µs)	MG (µs)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	24	0.43	0.20	0.40
[23]	Matara, Sri Lanka	5.95 °N	2013	142	0.20	0.07	0.19
[107]	Sri Lanka	5.95°N	2013	139	0.18	0.08	0.16

Fuente: autor

La MA del Ts reportada en otras investigaciones (0.20 µs [23] y 0.18 µs [107]) es muy similar a la obtenida en este estudio durante 2016. Lo anterior, puede deberse a que la campaña de medición se realizó en la misma región y durante la misma época del año (cuatro trimestres). Para la MA obtenida en este estudio (0.43 ± 0.20 µs) el valor fue al menos dos veces mayor a las reportadas previamente. Asimismo, ocurre con la MG que tiene un valor de 0.40 µs en comparación de los 0.19 µs [23] y 0.16 µs [107].

5.4.6. Duración del frente de ascenso rápido (Tfr)

Este parámetro puede ser obtenido restando el tiempo de ascenso 0 a 100% (Tr) y la duración del frente lento (Ts). En ningún artículo o documento de investigación donde se han caracterizado formas de onda de NBPs se ha incluido este parámetro. Por tal motivo, no se pudo hacer la comparación con otros estudios. Los resultados para los NNBPs se muestran en la Figura 5-7, exhibiendo 0.49 µs ±

0.10 µs para la MA con valores entre 0.3 µs - 0.7 µs y una MG de 0.48 µs. El histograma muestra una concentración de señales con Tfr entre 0.5 µs y 0.6 µs.

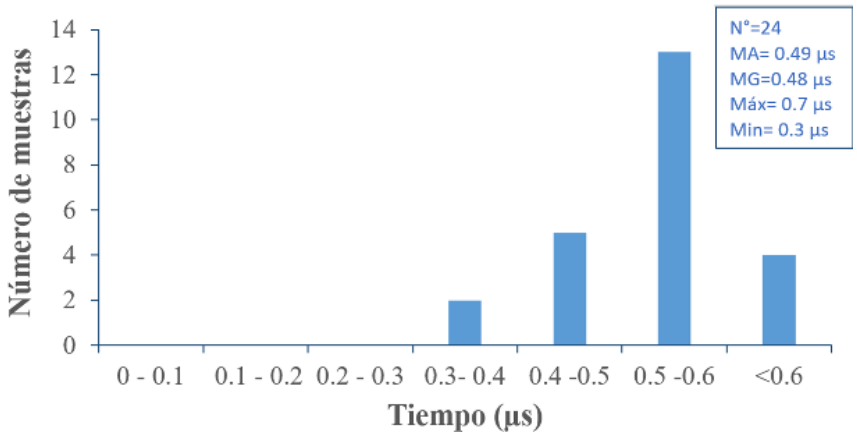


Figura 5-7 Histograma de la duración del frente de ascenso rápido para NNBPs
Fuente: autor

5.4.7. Duración del pulso (Tp)

El histograma del Tp para los NNBPs se observa en la Figura 5-8, mientras los resultados de la revisión bibliográfica se incluyen en la Tabla 5-7. Los resultados reportados en Sri Lanka por este trabajo (MA = 19.13 µs ± 2.72 µs; MG = 18.86 µs) son cercanos a los presentados por Gunasekara *et. al* en [23] con una diferencia por debajo del 2%. De igual modo, frente a Gunasekara *et. al* (2016) [107] se tiene una diferencia inferior al 3% en ambas medias.

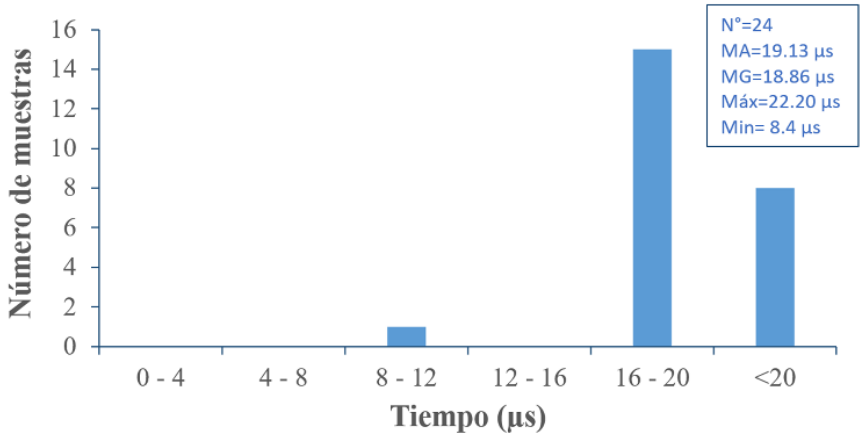


Figura 5-8 Histograma de la duración del pulso de NNBPs
Fuente: autor

Respecto a las otras regiones, el mayor Tp se reportó en la región de Jianghuai- China (30.3 µs) [93]. Este valor casi duplica al reportado en Shanghái – China (16 µs) [29]. Entre tanto, Malasia y U.S.A, que tienen una diferencia considerable de latitud, tuvieron resultados similares (25.3 µs [92] y 24.6 µs [92] con 25.8 µs [22]). Por su parte, en Indonesia se obtuvieron los valores de MA más bajos con 12.95 µs [89] y 15.06 µs [90].

Tabla 5-7 Estadísticas de la duración del pulso de la señal de campo eléctrico de NNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (µs)	DS (µs)	MG (µs)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	24	19.23	2.72	18.86
[23]	Matara, Sri Lanka	5.95°N	2013	142	19.21	3.06	18.97
[107]	Sri Lanka	5.95°N	2013	139	18.63	3.16	18.36
[89]	Padang, Indonesia	-	2015 y 2016	28	12.95	5.34	-
[90]	Padang, Indonesia	~0° N	2015	13	15.06	6.38	13.90
[93]	Jianghuai, China	-	2012	1395	30.3	5.1	-
[92]	Jonor, Malasia	~1° N	2012	38	25.3	19.8	-
[24]	Jonor, Malasia	~1° N	2009	75	24.6	17.1	-
[29]	Shanghái, China	31.001°N	2004	67	16	1.4	-
[22]	Nuevo México, U.S.A	-	1996	24	25.8	16.7	-
[20]	Florida, U.S.A	-	1985 y 1987	18	20 - 30		-

Fuente: autor

5.4.8. Magnitud del pico (Ep)

En la Figura 5-9 se observa el histograma de Ep para los NNBPs. En el presente trabajo se encontraron entre valores entre 10.8 V/m y 23.6 V/m, con una MA de 17.47 V/m ± 3.67 V/m y una MG de 17.05 V/m. Para este parámetro no se realizó comparación ya que no se encontraron trabajos previos.

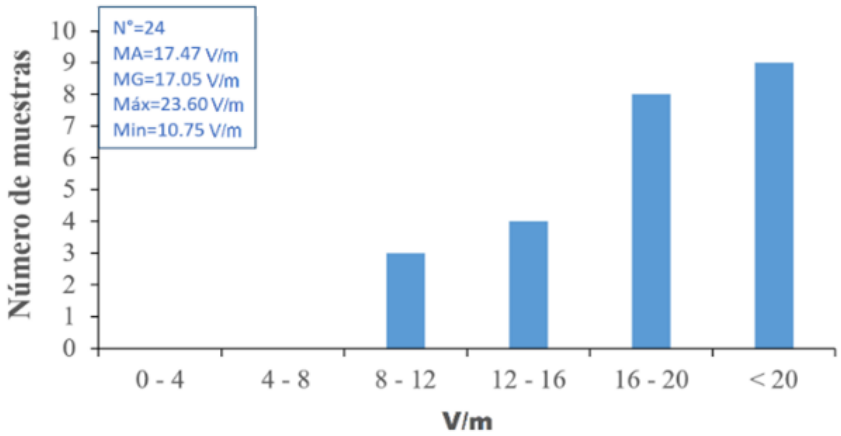


Figura 5-9 Histograma de la magnitud del pico para NNBPs

Fuente: autor

5.4.9. Magnitud del pico opuesto (Eos)

El histograma de este parámetro se observa en la Figura 5-10. Los valores de Eos se encuentran entre 1.20 V/m y 4.31 V/m, exhibiendo una concentración entre 1.6 V/m y 4 V/m para más del 80% de las muestras analizadas. En este caso, la MA fue 2.76 V/m ± 0.77 V/m, mientras la MG fue 2.64 V/m. Al igual que con algunos parámetros ya analizados, tampoco se pudo realizar comparación con otras investigaciones.

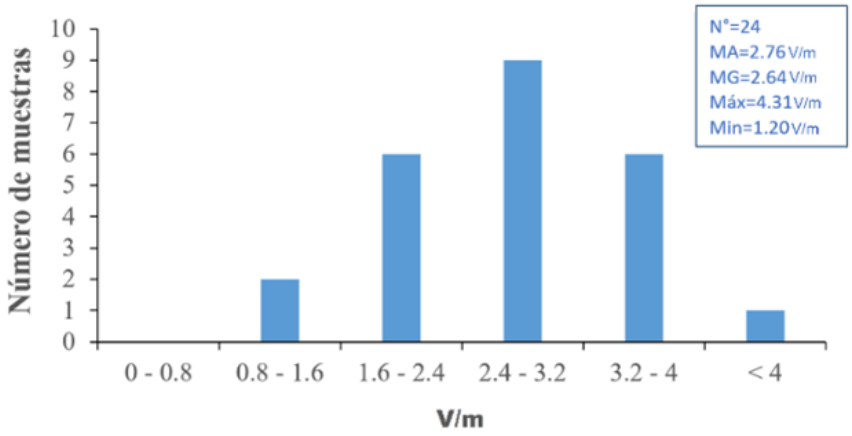


Figura 5-10 Histograma de la magnitud del pico opuesto para NNBPs
Fuente: autor

5.4.10. Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico (Eos/Ep)

Se observa en la Figura 5-11 y la Tabla 5-8 que la relación Eos/Ep en los NNBPs analizados durante este estudio son muy similares, tanto en MA como en MG (0.16), a aquellos reportados por Gunasekara et al. [23], [107] también en Sri Lanka. Los valores reportados en las investigaciones mencionadas se encuentran entre 0.17 y 0.19. Comparando estos resultados con las otras regiones se observa que en Sri Lanka el valor obtenido es cercano al estudio realizado en la Florida, U.S.A [20] pero inferior a las presentadas en Indonesia [90], Malasia [24], [29], China [29] Y U.S.A [22], donde se reportaron valores similares.

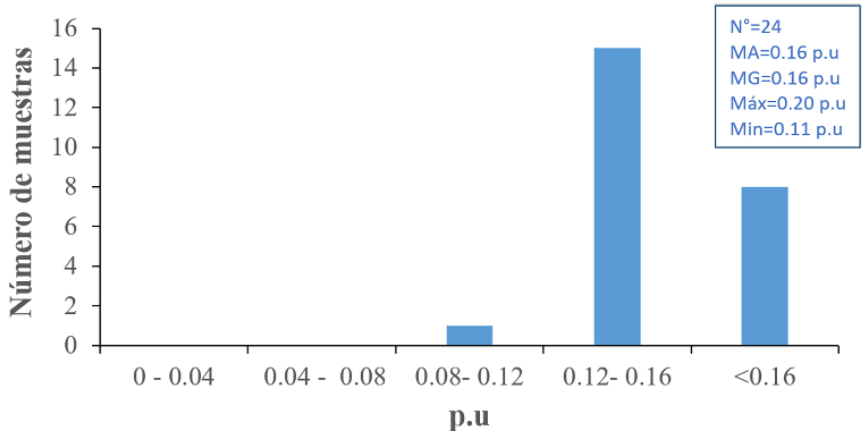


Figura 5-11 Histograma de la relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico de NNBPs
Fuente: autor

Tabla 5-8 Estadísticas de la relación entre la amplitud del sobre pico relativo y el pico de NNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (p.u)	DS (p.u)	MG (p.u)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	24	0.16	0.02	0.16
[23]	Matara, Sri Lanka	5.95°N	2013	142	0.19	0.06	0.18
[107]	Sri Lanka	5.95°N	2013	139	0.17	0.04	0.17
[90]	Padang, Indonesia	~0° N	2015	13	0.31	0.07	-
[92]	Jonor, Malasia	~1° N	2012	38	0.34	-	-
[24]	Jonor, Malasia	~1° N	2009	75	0.28	-	-
[29]	Shanghái, China	31.001°N	2004	67	0.34	0.7	-
[22]	Nuevo México, U.S.A	-	1996	24	0.37	-	-
[20]	Florida, U.S.A	-	1985 y 1987	18	0.11	-	-

Fuente: autor

5.5. Caracterización de PNBPs

5.5.1. Tiempo de ascenso de 0 a 100% (Tr [0-100%])

En la Figura 5-12 y la Tabla 5-9 se observa el histograma del parámetro Tr [0-100%] analizado en este estudio y la síntesis de resultados presentados en otras investigaciones. La MA obtenida en este trabajo fue de 2.79 µs ± 1.59 µs, con valores que oscilan entre 0.50 µs y 7.40 µs, mientras la MG fue de 2.40 µs. El valor de MA es muy inferior al obtenido en Sri Lanka en el año 1985 [21] lo cual puede deberse a la baja resolución del sistema de medida usado en aquel entonces. Si se compara con los valores presentados en Indonesia [89] y China [29] se observan diferencias de 34% y 21% respectivamente.

Espacio dejado en blanco de manera intencional

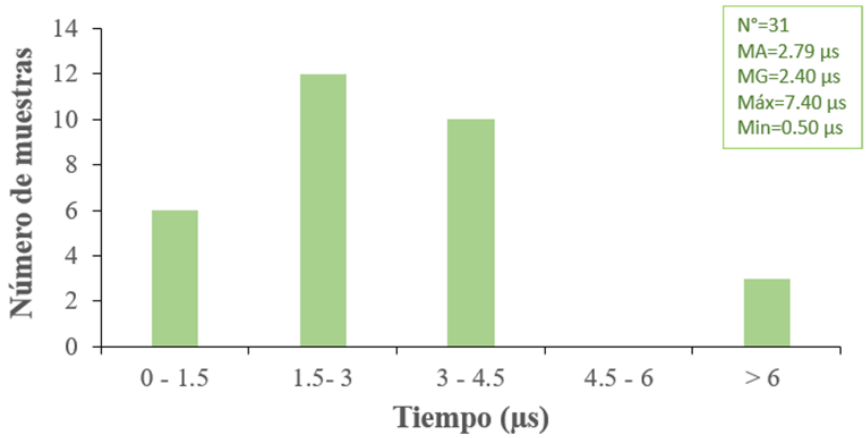


Figura 5-12 Histograma del tiempo de ascenso de 0 a 100% de PNBPs.
Fuente: autor

Tabla 5-9 Estadísticas del tiempo de ascenso de 0 a 100% de PNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (µs)	DS (µs)	MG (µs)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	31	2.79	1.59	2.24
[21]	Sri Lanka	8°N	1985 [*]	26	4	1.3	-
[89]	Padang, Indonesia	-	2015 y 2016	103	1.84	0.48	-
[29]	Shanghái, China	31.001°N	2004	10	2.2	0.2	-

Nota: [*] año de publicación, no se reportó año de la campaña de medición.
Fuente: autor

5.5.2. Tiempo ascenso de 10 a 90 % (Tr [10-90%])

La síntesis estadística de lo obtenido este estudio se muestra en la Figura 5-13, mientras la comparación con otras investigaciones se incluye en la Tabla 5-10. El Tr [10-90%] presenta una MA de 1.54 µs ± 0.74 µs y una MG de 1.34 µs. En comparación con trabajos anteriores, se observa similitud con la MA reportada en Florida y una ligera diferencia con los valores obtenidos por Gunasekara et al. (2016) [23], cuya diferencia fue de 10.4% para la MA y 3% para la MG. Sin embargo, contrastando con Gunasekara et al. (2008) [25] la MA difiere casi dos veces, aunque este último es semejante a lo obtenido en Malasia [24].

Espacio dejado en blanco de manera intencional

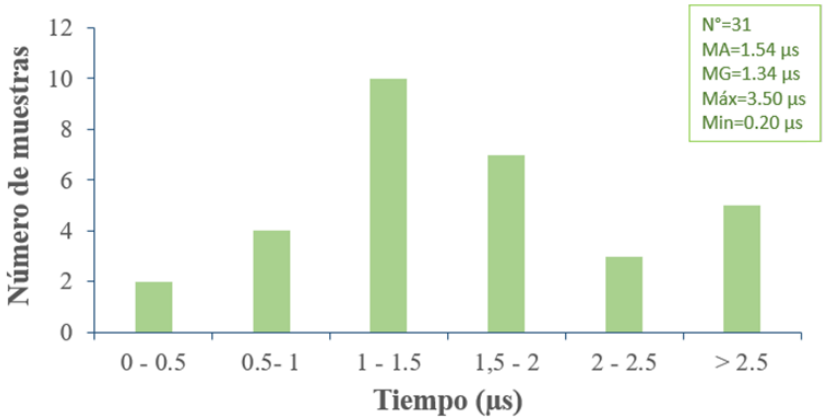


Figura 5-13 Histograma del tiempo de ascenso de 0 a 90% de PNBPs
Fuente: autor

Tabla 5-10 Estadísticas del tiempo de ascenso de 10 a 90 % de PNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (µs)	DS (µs)	MG (µs)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	31	1.54	0.74	1.34
[23]	Matara, Sri Lanka	5.95°N	2013	40	1.38	0.47	1.30
[25]	Sri Lanka	6.91° N	2005 y 2006	25	2.6	1.1	-
[108]	Guangdong, China	-	2007	4473	2.06	1.14	-
[24]	Jonor, Malasia	~1° N	2009	107	2.7	1.6	-
[66]	Florida, U.S.A	-	1989	156	1.54	1.04	-

Fuente: autor

5.5.3. Tiempo de cruce por cero (Tz)

Los resultados consolidados para este parámetro se muestran en la Figura 5-14 y la Tabla 5-11. Se observa que la MA de este trabajo (7.08 µs) se encuentra en el rango de lo presentado para Sri Lanka en años anteriores (4.66 µs – 13 µs). Por su parte, lo reportado para la MA en regiones de latitudes medias como China (6.7 µs [93], 5.46 µs [108] y 3.8 µs [29]) y U.S.A (6.0 µs [38]) es mayor a lo registrado en latitudes cercanas al Ecuador como Malasia (1.71 µs [92] y 3.26 µs [24]).

Espacio dejado en blanco de manera intencional

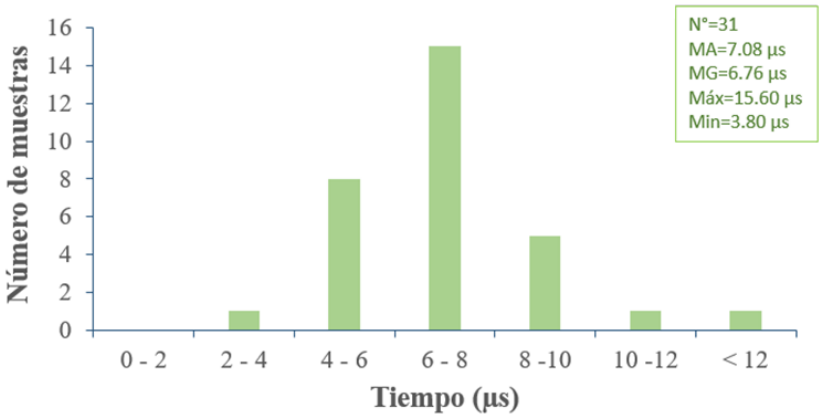


Figura 5-14 Histograma del parámetro de tiempo de cruce por cero de PNBPs
Fuente: autor

Tabla 5-11 Estadísticas del tiempo de cruce por cero PNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (µs)	DS (µs)	MG (µs)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	31	7.08	2.30	6.76
[23]	Matara, Sri Lanka	5.95 °N	2013	40	4.66	1.29	4.5
[25]	Sri Lanka	6.91° N	2005 y 2006	25	5.78	2.1	-
[21]	Sri Lanka	8°N	1985 [*]	26	13	4.9	-
[63]	Sri Lanka	-	1978	-	<10	-	-
[89]	Padang, Indonesia	-	2015 y 2016	103	4.20	0.68	-
[93]	Jianghuai, China	-	2012	144	6.7	1.2	-
[92]	Jonor, Malasia	~1° N	2012	38	1.71	-	-
[108]	Guangdong, China	-	2007	4473	5.46	1,79	-
[24]	Jonor, Malasia	~1° N	2009	107	3.26	-	-
[38]	U.S.A	-	2010 [*]	48	6.0	-	5.6
[29]	Shanghái, China	31.001°N	2004	10	3.8	0.3	-

Nota: [*] año de publicación, no se reportó año de la campaña de medición.
Fuente: autor

5.5.4. Tiempo a la mitad del máximo pico (FWMH)

La MA y la MG reportadas para la FWMH se incluyen en la Figura 5-15 y la Tabla 5-12. La MA obtenida en esta investigación (1.60 µs ± 0.55 µs) es menor que la presentada en otros estudios, siendo a su vez 1.2 veces inferior a la reportada por Gunasekara et al. (2016) [23] y 1.5 veces a la de Sharma et al. (2008) [25]. Lo mismo ocurre con la MG (1.51 µs), cuya relación es 1.26 veces menor a la presentada con Gunasekara et al. (2016) [23]. En cuanto a lo obtenido en otras regiones, se puede apreciar que en Malasia los resultados de la MA varían según la temporada de medición (1.65 µs [92] y 2.40 µs [24]). Por su parte, Jianghuai y Shanghái, aunque están ubicadas a similar latitud, también muestran valores diferentes (MA = 1.90 µs y MA = 3.8 µs, respectivamente). Esto puede deberse a que sus relieves son distintos (zona montañosa y zona costera).

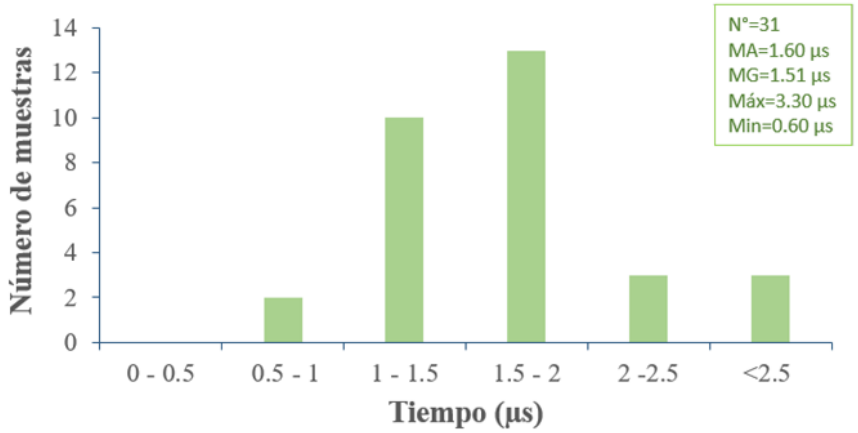


Figura 5-15 Histograma del tiempo a la mitad del máximo pico de PNBPs
Fuente: autor

Tabla 5-12 Estadísticas del tiempo a la mitad del máximo pico de PNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (µs)	DS (µs)	MG (µs)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	31	1.60	0.55	1.51
[23]	Matara, Sri Lanka	5.95 °N	2013	40	1.93	0.33	1.91
[25]	Sri Lanka	6.91° N	2005 y 2006	25	2.4	1.6	-
[93]	Jianghuai, China	-	2012	144	3.8	0.80	-
[92]	Jonor, Malasia	~1° N	2012	38	1.65		-
[108]	Guangdong, China	-	2007	4473	2.89	1.02	-
[24]	Jonor, Malasia	~1° N	2009	107	2.40	1.40	-
[29]	Shanghái, China	31.001°N	2004	10	1.90	0.10	-
[66]	Florida, U.S.A	-	1989	156	1.60	0.63	-

Fuente: autor

5.5.5. Duración del frente de ascenso lento (Ts)

El histograma de este parámetro (ver Figura 5-16) muestra una MA y una MG de 1.83 µs y 1.42 µs. Al comparar estos valores con lo presentado en la Tabla 5-13 se observa que la MA es similar a lo encontrado por Sharma et. al (2008) [25], mientras el estudio Gunasekara et. al (2016) [23] reportó un valor casi 4 veces menor.

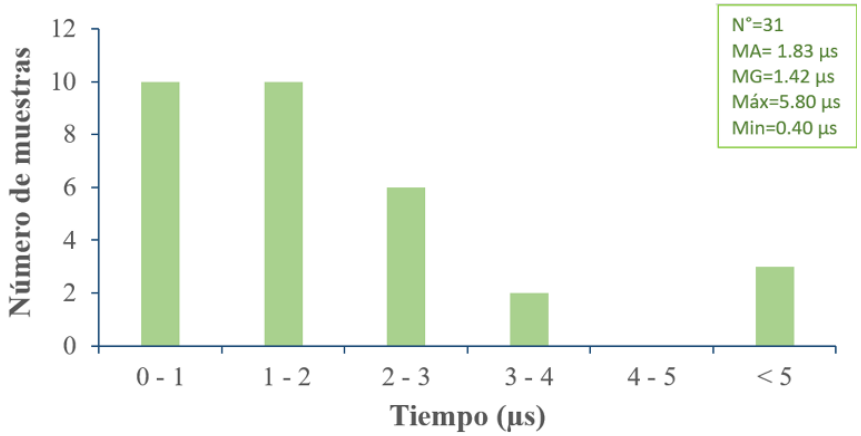


Figura 5-16 Histograma del parámetro de la duración del frente de ascenso lento de PNBPs
Fuente: autor

Tabla 5-13 Estadísticas de la duración del frente de ascenso lento de PNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (µs)	DS (µs)	MG (µs)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	31	1.83	1.44	1.42
[23]	Matara, Sri Lanka	5.95 °N	2013	40	0.48	0.25	0.42
[25]	Sri Lanka	6.91° N	2005 y 2006	25	1.84	0.89	-

Fuente: autor

5.5.6. Duración del frente de ascenso rápido (Tfr)

Al igual que con los NNBPs, debido a la falta de investigaciones asociadas a la caracterización de este parámetro no se pudo realizar una comparación. No obstante, los resultados para los PNBPs se muestran en la Figura 5-17 con una variación para el Tfr entre 1.90 µs y 0.10 µs, una MA de 0.96 µs ± 0.44 µs y una MG de 0.83 µs.

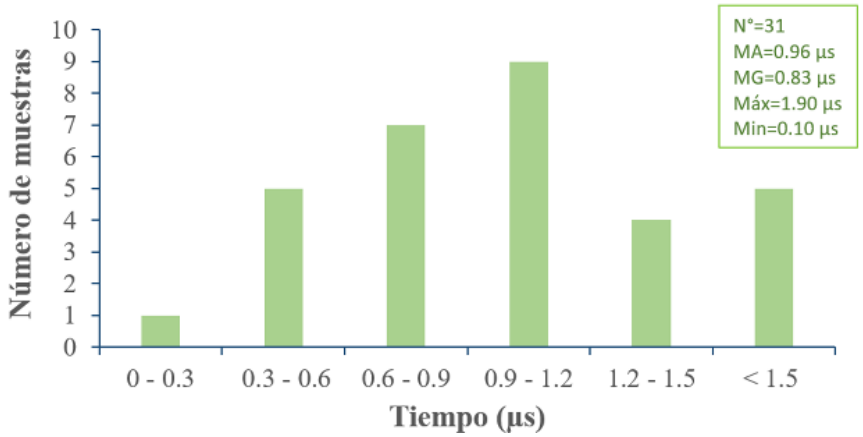


Figura 5-17 Histograma de la duración del frente de ascenso rápido para PNBPs
Fuente: autor

5.5.7. Duración del pulso (Tp)

La MA de la Tp (21.62 ± 8.30 µs) mostrada junto con el histograma de la Figura 5-18, no se asemeja a ningún otro estudio realizado en Sri Lanka, tal y como se aprecian al comparar con los valores dispuestos en la Tabla 5-14. Le Vine (1980) [63], el primer investigador en reportar los NBPs, estimó que la Tp podría variar en el rango de 10-20 µs. Cooray y Lundquist, quienes realizaron la primera campaña de medición en Sri Lanka (1985) [21], encontraron el mayor valor reportado a la fecha (75 µs). En el caso de Sharma et. al (2008) [25] y Gunasekara et. al (2016) [23], se obtuvieron resultados inferiores al de este estudio con una MA de 13.3 µs y 16.42 µs, respectivamente.

Entre tanto, los estudios realizados en Malasia presentan una diferencia apreciable con una MA de 3.4 µs reportada en 2013 [92] y 30.2 µs en 2010 [24]. Asimismo, los resultados presentados en China (12.1 µs [29] y 21.9 µs [93]), Indonesia (14.93 µs) [89] y U.S.A (24 µs) [38] difieren entre sí y no se aprecia alguna relación de latitud o condiciones geográficas.

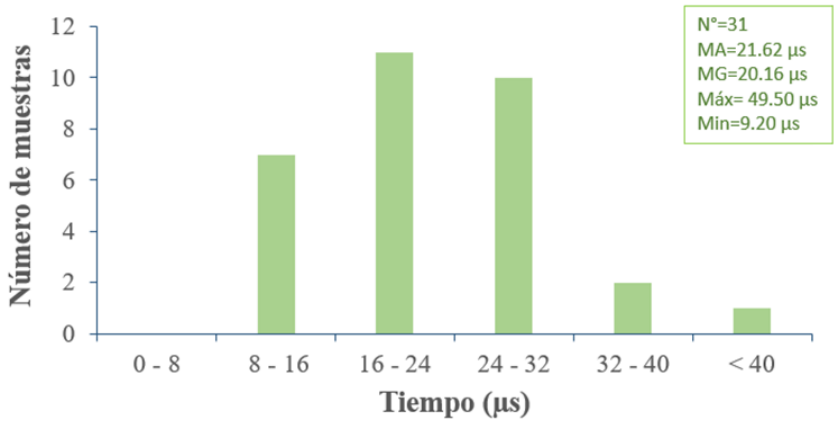


Figura 5-18 Histograma de la duración del pulso de PNBPs
Fuente: autor

Tabla 5-14 Estadísticas de la duración del pulso de PNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (µs)	DS (µs)	MG (µs)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	31	21.62	8.83	20.16
[23]	Matara, Sri Lanka	5.95 °N	2013	40	16.42	8.43	14.73
[25]	Sri Lanka	6.91° N	2005 y 2006	25	13.3	16.7	-
[21]	Sri Lanka	8°N	1985 **[*]**	26	75	25.9	-
[63]	Sri Lanka	-	1978	-	10-20	-	-
[89]	Padang, Indonesia	-	2015 y 2016	103	14.93	2.58	-
[93]	Jianghuai, China	-	2012	144	21.9	3.1	-
[92]	Jonor, Malasia	~1° N	2012	38	13.4	7.5	-
[24]	Jonor, Malasia	~1° N	2009	107	30.2	12.3	-
[38]	U.S.A	-	2010 **[*]**	48	24	-	23
[29]	Shanghái, China	31.001°N	2004	10	12.1	1.3	-

Nota: [*] año de publicación, no se reportó año de la campaña de medición.

Fuente: autor

5.5.8. Magnitud del pico (Ep)

En la Figura 5-19 se observa el histograma de Ep para los PNBPs. En esta investigación se encontraron valores entre 1.19 V/m y 14.87 V/m, con una MA de 5.01 V/m y una MG de 4.19 V/m. Para este parámetro no se realizó comparación ya que no se reportó en trabajos previos.

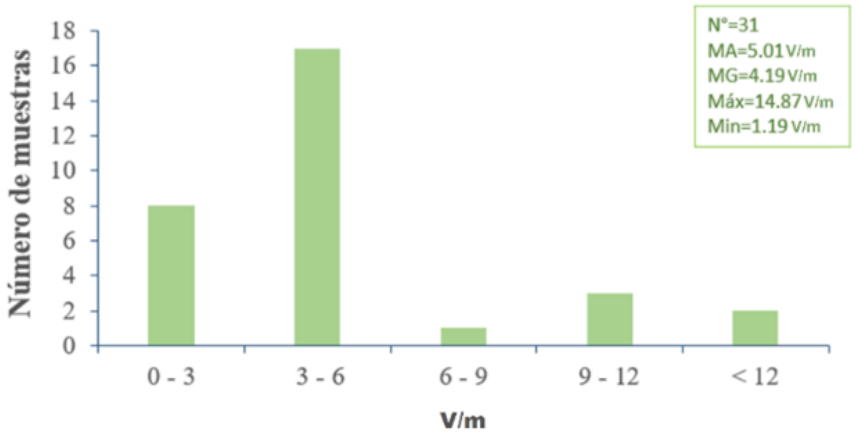


Figura 5-19 Histograma de la magnitud del pico para PNBPs

Fuente: autor

5.5.9. Magnitud del pico opuesto (Eos)

La estadística del parámetro Eos se presenta en la figura 5-20 exhibiendo un valor mínimo de 0.45 V/m y un máximo de 3.56 V/m. Por su parte, la MA y la MG fueron de 1.02 V/m y 0.90 V/m, respectivamente.

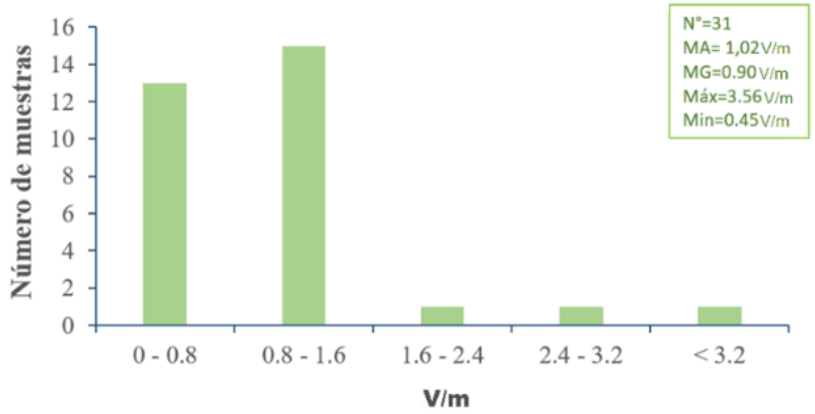


Figura 5-20 Histograma de la magnitud del pico opuesto para PNBPs
Fuente: autor

5.5.10. Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico (Eos/Ep)

La Figura 5-21 y la Tabla 5-15 muestran el histograma obtenido en este trabajo y los resultados de otras investigaciones para la relación Eos/Ep, respectivamente. Lo obtenido durante la caracterización realizada en 2022 para la MA es inferior a los reportado previamente en Sri Lanka. En este caso, la menor diferencia se obtuvo con respecto al estudio publicado en 1985 (42.9%). Los resultados presentados en regiones tropicales y subtropicales no exhiben relación entre sí, mostrado variaciones en la Eos/Ep entre 0.16 y 1.48.

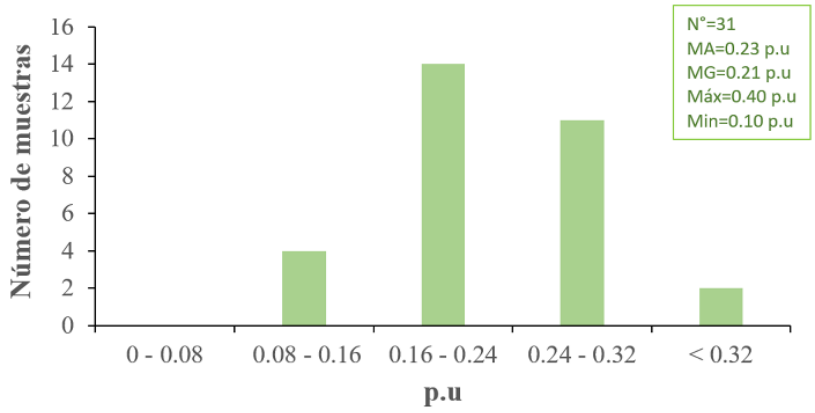


Figura 5-21 Histograma de la relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico de PNBPs
Fuente: autor

Tabla 5-15 Estadísticas del parámetro relación entre la amplitud del sobre pico relativo y el pico de PNBPs

Referencia	Lugar	Latitud	Año de la campaña	N° de eventos	MA (p.u)	DS (p.u)	MG (p.u)
Este estudio	Weligatta, Sri Lanka	6.208° N	2016	31	0.21	0.07	0.23
[23]	Matara, Sri Lanka	5.95 °N	2013	40	0.37	0.33	0.34
[25]	Sri Lanka	6.91° N	2005 y 2006	25	0.35	-	-
[21]	Sri Lanka	8°N	1985 [*]	26	0.30	-	-
[92]	Jonor, Malasia	~1° N	2012	38	0.48	-	-
[24]	Jonor, Malasia	~1° N	2009	107	0.27	-	-
[38]	U.S.A	-	2010 [*]	48	0.16	-	0.17
[29]	Shanghái, China	31.001°N	2004	10	0.37	0.4	-

Nota: [*] año de publicación, no se reportó año de la campaña de medición.

Fuente: autor

6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El desarrollo de esta monografía se dividió en tres etapas: diseño e implementación de la Herramienta de Manipulación de Señales de NBPs (HMS_NPBs), caracterización de registros de NBPs y comparación de resultados con investigaciones realizadas en otras regiones del mundo. De esta manera, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas.

6.1. Conclusiones

- El software HMS_NBPs® facilita el proceso de identificación y caracterización de señales de campo eléctrico producidas por Pulsos Bipolares Angostos (NBPs), reduciendo considerablemente (casi el 70%) los tiempos requeridos para el tratamiento y análisis de señales. Adicionalmente, cuenta con módulos que permiten realizar una inspección minuciosa en registros de campo eléctrico con el fin de identificar, seleccionar y guardar otros tipos de eventos asociados a rayos (líderes, descargas preliminares, return strokes, entre otros).

- Los 55 Pulsos Bipolares Angostos (NBPs), identificados del banco de registros disponible (Sri Lanka, 2016), fueron separadas por polaridad y clasificados según las formas de onda propuestas por Leal en [30]. Esta clasificación mostro que los Pulsos Bipolares Angostos de polaridad positiva (PNBPs) son ligeramente más frecuentes que los Pulsos Bipolares Angostos negativos (NNBPs). Asimismo, se logró identificar seis tipos de forma de onda en los PNBPs en contraste con solo dos para los NNBPs. Estos resultados podrían sugerir que algunas formas de onda son más predominantes según polaridad. Para confirmar esta hipótesis es necesario realizar más estudios de caracterización de estos eventos.

- Los resultados de caracterización de NBPs obtenidos en este trabajo son similares a los reportados previamente en la región de Sri Lanka, especialmente para los pulsos de polaridad negativa. Particularmente, en los NNBPs se evidenció una diferencia inferior al 10% en parámetros tales como: tiempo de ascenso de 10 a 90 %, tiempo de cruce por cero, tiempo a la mitad del máximo pico, duración del pulso y relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico, para Pulsos Bipolares Angostos de polaridad negativa (NNBPs). Esta misma diferencia se identificó en el tiempo de ascenso de 10 a 90 % y el frente de ascenso lento de los PNBPs.

- Los resultados presentados en este estudio fueron contrastados con investigaciones realizadas en China, Indonesia, Malasia y USA. Para buena parte de los parámetros caracterizados no se observó relación directa con la ubicación geográfica (latitud). No obstante, los parámetros de la forma de onda para NBPs podrían ser influenciados por otros factores tales como: características del terreno, distancia entre el evento y la estación de medición, la aparición cercana de otras descargas eléctricas atmosféricas, entre otros. Es necesario adelantar nuevas campañas de medición para confirmar esta hipótesis.

6.2. Recomendaciones y trabajos futuros

- El tiempo de muestreo para la adquisición de los registros analizados en el presente trabajo fue de 100 ns. Esta configuración fue establecida para medir simultáneamente descargas nube-tierra (CG), descargas intranube (IC) y pulsos bipolares angostos (NBPs). Sin embargo, se recomienda para futuras campañas de medición estudiar exclusivamente este tipo de descargas usando un muestreo entre 5 y 20 ns.

- Para ejecutar el algoritmo de identificación de NBPs en el software HMS_NBPs® se recomienda ajustar el tamaño de la ventana a 100 µs y un pretrigger de 50 µs. Estos valores coinciden con las señales típicas presentadas en el capítulo 3 y permiten realizar la etapa de comparación fácilmente. En caso de establecer otros valores, el tamaño de la ventana no debe ser inferior a 50 µs y el pretrigger en 5 µs. Lo anterior, para no omitir señales potenciales de NBPs.

- Realizar un estudio de caracterización de formas de onda de campo eléctrico de NBPs en la Sabana de Bogotá, comparando los resultados con otras investigaciones. Este estudio aportaría nueva información del fenómeno físico, ya que nuestra geografía es distinta a las otras regiones tropicales, tanto en altitud, relieve y clima. Infortunadamente debido a la pandemia recientemente vivida en el mundo, esta temporada de medición no pudo ser realizada como parte de los aportes de esta investigación.

- Desarrollar una herramienta computacional basada en técnicas de Machine Learning, redes neuronales, u otros algoritmos de decisión autónoma. Esto permitirá una clasificación e identificación más amplia de las formas de onda de campo eléctrico y los eventos asociados a rayos nube-tierra e intra-nube.

- Explorar la viabilidad de implementar un sistema de medición con interferómetros que complemente la estación de medición EMIR-UD. Este sistema de medición permitiría mapear la posición de la fuente de la radiación y observar su evolución temporal.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] R. I. Albrecht, S. J. Goodman, D. E. Buechler, R. J. Blakeslee, and H. J. Christian, "Where Are the Lightning Hotspots on Earth?," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 97, no. 11, pp. 2051–2068, Nov. 2016, doi: 10.1175/BAMS-D-14-00193.1.

[2] D. Aranguren, "Desempeño de Sensores de Campo Eléctrostático en Sistemas de Alerta de Tormentas," Universidad Nacional de Colombia, 2011.

[3] E. E. Olarte, "Sistema de información y monitoreo de tormentas eléctricas en Colombia," Universidad Nacional de Colombia, 2012.

[4] O. Escobar, "Lightning Magnetic Field Measuring System in Bogota Colombia," Universidad Nacional de Colombia, 2013.

[5] A. A. Villa Garzon, "Localización de tormentas eléctricas usando redes de sensores puntuales de campo electroestático.," Universidad Nacional - sede Medellin, 2015.

[6] R. J. Andres, "Diseño, implementación y validación de un sistema de detección de impulsos de VHF producidos por descargas eléctricas tipo rayo Ing. José Andrés Roncancio Guzmán," 2019.

[7] A. L. Mayorga and J. Rojas, "Protección contra rayos. Sistemas de protección externa para edificaciones de uso final," Universidad industrial de Santander, 2011.

[8] E. Y. Arévalo Díaz and E. H. Moreno Perez, "Sistema De Apantallamiento Contra Descargas Atmosféricas En Campos Abiertos," Universidad de la salle, 2016.

[9] H. Enrique and R. Cubides, "Técnicas avanzadas para el tratamiento y procesamiento de señales de campos electromagnéticos generados por rayos," Universidad Nacional de Colombia. – Sede Bogotá, 2018.

[10] D. del Rio, C. Younes, and J. Pulgarin, "Lightning activity behavior over Bogota - Colombia due to urban effect," in *2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA)*, Sep. 2015, pp. 270–274, doi: 10.1109/SIPDA.2015.7339333.

[11] D. Aranguren, J. López, J. Inampués, H. Torres, and H. Betz, "Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography," *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 154, pp. 182–189, 2017, doi: 10.1016/j.jastp.2016.08.010.

[12] H. Torres and O. Castaño, "Las series de tiempo en la investigación espacio-temporal sobre descargas eléctricas atmosféricas en Colombia," *Rev. Colomb. Estadística*, vol. 12, no. 23–24, pp. 139–166, 1991.

[13] H. Torres, E. Perez, C. Younes, D. Aranguren, J. Montana, and J. Herrera, "Contribution to Lightning Parameters Study Based on Some American Tropical Regions Observations," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 8, no. 8, pp. 4086–4093, Aug. 2015, doi: 10.1109/JSTARS.2015.2428217.

[14] H. Rojas, A. Cruz, and C. Cortez, "Características de los campos eléctricos generados por rayos medidos en la Sabana de Bogotá, Colombia," *UIS Ing.*, vol. 16, no. 2, pp. 243–252, 2017.

[15] H. E. Rojas, F. Santamaría, O. F. Escobar, and F. J. Román, "La investigación del rayo en Colombia: Parámetros del rayo, sistemas de protección, evaluación de riesgos y sistemas de alerta," *Ing. y Desarro.*, vol. 35, no. 1, pp. 240–261, Jan. 2017, doi: 10.14482/inde.35.1.8951.

[16] F. Santamaría, C. A. Cortés, and F. J. Román, "Uso de la Transformada de Ondeletas (Wavelet Transform) en la Reducción de Ruidos en las Señales de Campo Eléctrico producidas por Rayos," *Inf. tecnológica*, vol. 23, no. 1, pp. 65–78, 2012, doi: 10.4067/S0718-07642012000100008.

[17] J. A. Lopez *et al.*, "First data of the Colombia lightning mapping array — COLMA," in *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Sep. 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICLP.2016.7791436.

[18] D. M. Le Vine, "Sources of the strongest RF radiation from lightning," *J. Geophys. Res.*, vol. 85, no. C7, p. 4091, 1980, doi: 10.1029/JC085iC07p04091.

[19] N. A. . Ahmad, “broadband and HF radiation from cloud flashes and narrow bipolar pulses,” University of Uppsala, 2011.
[20] J. C. Willett, J. C. Bailey, and E. P. Krider, “A class of unusual lightning electric field waveforms with very strong high-frequency radiation,” *J. Geophys. Res.*, vol. 94, no. D13, p. 16255, 1989, doi: 10.1029/JD094iD13p16255.
[21] V. Cooray and S. Lundquist, “Characteristics of the radiation fields from lightning in Sri Lanka in the tropics,” *J. Geophys. Res.*, vol. 90, no. D4, p. 6099, 1985, doi: 10.1029/JD090iD04p06099.
[22] D. A. Smith *et al.*, “A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 104, no. D4, pp. 4189–4212, Feb. 1999, doi: 10.1029/1998JD200045.
[23] T. A. L. N. Gunasekara, M. Fernando, U. Sonnadara, and V. Cooray, “Characteristics of Narrow Bipolar Pulses observed from lightning in Sri Lanka,” *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 138–139, pp. 66–73, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.jastp.2015.12.010.
[24] N. Azlinda Ahmad, M. Fernando, Z. A. Baharudin, V. Cooray, H. Ahmad, and Z. Abdul Malek, “Characteristics of narrow bipolar pulses observed in Malaysia,” *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 72, no. 5–6, pp. 534–540, 2010, doi: 10.1016/j.jastp.2010.02.006.
[25] S. R. Sharma, M. Fernando, and V. Cooray, “Narrow positive bipolar radiation from lightning observed in Sri Lanka,” *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 70, no. 10, pp. 1251–1260, 2008, doi: 10.1016/j.jastp.2008.03.002.
[26] T. Wu, Y. Takayanagi, S. Yoshida, T. Funaki, T. Ushio, and Z. Kawasaki, “Spatial relationship between lightning narrow bipolar events and parent thunderstorms as revealed by phased array radar,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 40, no. 3, pp. 618–623, 2013, doi: 10.1002/grl.50112.
[27] F. Lü, B. Zhu, H. Zhou, V. A. Rakov, W. Xu, and Z. Qin, “Observations of compact intracloud lightning discharges in the northernmost region (51°N) of China,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, no. 10, pp. 4458–4465, May 2013, doi: 10.1002/jgrd.50295.
[28] Y. Wang, G. Zhang, Y. Li, R. Zhang, and Y. Liu, “Characteristic of Compact intracloud discharges on Qinghai-Tibet plateau and Northern part of China,” no. June, pp. 15–20, 2014.
[29] B. Zhu, H. Zhou, M. Ma, and S. Tao, “Observations of narrow bipolar events in East China,” *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 72, no. 2–3, pp. 271–278, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.jastp.2009.12.002.
[30] A. F. R. Leal, V. A. Rakov, and B. R. P. Rocha, “Compact intracloud discharges: New classification of field waveforms and identification by lightning locating systems,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 173, no. April, pp. 251–262, 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.04.016.
[31] L. García and A. Santa, “Diseño y construcción de un módulo de adquisición automática para un sistema de medición de campo eléctrico producido por descargas atmosféricas,” Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2021.
[32] Y. Zhu, P. Bitzer, V. Rakov, and Z. Ding, “A Machine-Learning Approach to Classify Cloud-to-Ground and Intracloud Lightning,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 48, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.1029/2020GL091148.
[33] V. Cooray, *The Lightning Flash*. Institution of Engineering and Technology, 2014.
[34] A. S. Cruz-Bernal, H. Torres-Sánchez, H. Aranguren-Fino, and J. C. Inampués-Borda, “Lightning mortality rate in Colombia for the period1997 –2014,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 2, pp. 65–74, Mar. 2018, doi: 10.18273/revuin.v17n2-2018006.
[35] R. Abeywardhana, M. Fernando, U. Sonnadara, and V. Cooray, “Time Derivative of Electric Field Radiation Generated by Compact Intra-cloud Discharge,” *Int. Conf. Light. Prot.*, no. February 2017, pp. 1–5, 2016.
[36] M. R. Ahmad, “Interaction of Lightning Flashes with Wireless Communication Networks,” University Uppsala Sweden, 2014.
[37] T. Wu, W. Dong, Y. Zhang, and T. Wang, “Comparison of positive and negative compact

intracloud discharges," *J. Geophys. Res.*, vol. 116, no. D3, p. D03111, Feb. 2011, doi: 10.1029/2010JD015233.
[38] A. Nag, V. A. Rakov, D. Tsalikis, and J. A. Cramer, "On phenomenology of compact intracloud lightning discharges," *J. Geophys. Res.*, vol. 115, no. D14, p. D14115, Jul. 2010, doi: 10.1029/2009JD012957.
[39] H. Torres-sánchez, *El rayo: mitos, leyendas, ciencia y tecnología.* Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, 2002.
[40] D. de J. Perez Perez, "Eficiencia de los sistemas de localización del rayo en zonas montañosas," Universidad nacional sede Manizales, 2014.
[41] D. Fernando and D. R. Trujillo, "Evaluación del efecto urbano sobre los parámetros del rayo. Caso Colombiano," Universidad Nacional de Colombia - sede Manizales, 2018.
[42] F. Santamaria, "Caracterizacion de las descargas electricas atmosfericas en bogota y comparacion con registros tomados en otros lugares del mundo," Universidad Nacional de Colombia -Sede Bogota, 2006.
[43] M. I. C. Niño Carranza, "Caracterización de descargas de retorno (return strokes) positivas producidas por rayos nube-tierra a partir de la medición de los campos eléctricos en la Sabana de Bogotá, Colombia," Universidad Nacional de Colombia, 2019.
[44] C. A. GRANADOS VIVAS, "Caracterización de descargas preliminares producidas por rayos nube-tierra en Bogotá, Colombia," Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogota, 2020.
[45] A. F. R. Leal, V. A. Rakov, E. R. Alves, and M. N. G. Lopes, "Estimation of –CG lightning distances using single-station E-field measurements and machine learning techniques," in *2019 International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA)*, Sep. 2019, pp. 1–8, doi: 10.1109/SIPDA47030.2019.9004484.
[46] World Meteorological Organization, *International Cloud Atlas: Volume I-Manual on the Observations of Clouds and Other Meteors*. Ginebra- Suiza: Secretariat of the World Meteorological Organization, 1975.
[47] M. Y. Luque, "Electrificación de las nubes de tormenta: el mecanismo no-inductivo," Universidad Nacional de Cordoba, 2019.
[48] Aquae Fundacion, "Nubes." https://www.fundacionaquae.org/.
[49] V. A. Rakov and M. A. Uman, *Lightning*. Cambridge University Press, 2003.
[50] Y. Baba and V. A. Rakov, *Electromagnetic Computation Methods for Lightning Surge Protection Studies*. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2016.
[51] Western Oregon University, "Clouds." https://people.wou.edu/~hfledderjohann07/mywebsite/vertdevelop.html.
[52] G. C. Simpson, "On the electricity of rain and its origin in thunderstorm," *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, vol. A209, no. 379–413, 1909.
[53] C. T. R. Wilson, "On some determinations of the sign and magnitude of electric discharges in light_ning flashes," *Proc. R. Soc. London*, vol. A92, no. 555, 1916.
[54] G. C. Simpson and F. J. Scrase, "The distribution of electricity in thunderclouds," *Proc. R. Soc. London. Ser. A - Math. Phys. Sci.*, vol. 161, no. 906, pp. 309–352, Aug. 1937, doi: 10.1098/rspa.1937.0148.
[55] E. R. Williams, "The tripole structure of thunderstorms," *J. Geophys. Res.*, vol. 94, no. D11, p. 13151, 1989, doi: 10.1029/JD094iD11p13151.
[56] Encyclopedia Britannica, "Thunderstorm electrification." https://www.britannica.com/science/thunderstorm/Thunderstorm-electrification.
[57] D. R. Poelman, *On the science of lightning: an overview*. Royal Meteorological Institute of Belgium, 2010.
[58] X. M. Shao and P. R. Krehbiel, "The spatial and temporal development of intracloud lightning," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 101, no. D21, pp. 26641–26668, Nov. 1996, doi: 10.1029/96JD01803.
[59] M. Akita and Z. Kawasaki, "VHF broadband interferometer observations and micro-structure

of lightning discharge," in *2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2010, pp. 1134–1137, doi: 10.1109/APEMC.2010.5475746.
[60] V. Cooray, *An Introduction to Lightning*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015.
[61] R. Mardiana, Z. Kawasaki, and T. Ushio, "Interferometer Observations of an Intracloud Lightning Discharge," in *2006 IEEE 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials*, Jun. 2006, pp. 490–493, doi: 10.1109/ICPADM.2006.284222.
[62] W. Rison *et al.*, "Observations of narrow bipolar events reveal how lightning is initiated in thunderstorms," *Nat. Commun.*, vol. 7, no. 1, p. 10721, Apr. 2016, doi: 10.1038/ncomms10721.
[63] David M. Le Vine, "Sources of the strongest RF radiation from lightning," *J. Geophys. Res. Ocean.*, vol. 85, no. C7, pp. 4091–4095, 1980, doi: https://doi.org/10.1029/JC085iC07p04091.
[64] P. E. Argo *et al.*, "Observations and Inferred Physical Characteristics of Compact Intracloud Discharges." Space and Atmospheric Sciences, Los Alamos National Laboratory Los Alamos, New Mexico, U.S.A., 1999.
[65] D. M. Suszcynsky and M. J. Heavner, "Narrow Bipolar Events as indicators of thunderstorm convective strength," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 30, no. 17, p. n/a-n/a, Sep. 2003, doi: 10.1029/2003GL017834.
[66] P. J. Medelius, E. M. Thomson, and J. S. Pierce, "E and DE/DT waveshapes for narrow bipolar pulses in intracloud lightning," 1991, [Online]. Available: https://ntrs.nasa.gov/citations/19910023296.
[67] W. Rison, R. J. Thomas, P. R. Krehbiel, T. Hamlin, and J. Harlin, "A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 26, no. 23, pp. 3573–3576, Dec. 1999, doi: 10.1029/1999GL010856.
[68] D. A. Smith *et al.*, "A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records," *Radio Sci.*, vol. 39, no. 1, p. n/a-n/a, Feb. 2004, doi: 10.1029/2002RS002790.
[69] T. Wu, S. Yoshida, and T. Ushio, "Is Narrow Bipolar Event a Type of Isolated Lightning Discharge?," 2014.
[70] M. R. Ahmad, M. R. M. Esa, and V. Cooray, "Occurrence of Narrow Bipolar Event as Part of Cloud-to-Ground Flash in Tropical Thunderstorms∗," 2014.
[71] T. Wu, S. Yoshida, T. Ushio, Z. Kawasaki, and D. Wang, "Lightning-initiator type of narrow bipolar events and their subsequent pulse trains," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 119, no. 12, pp. 7425–7438, Jun. 2014, doi: 10.1002/2014JD021842.
[72] Feifan Liu, W. Wenwei, B. Zhu, and M. Ma, "Analysis of negative narrow bipolar events associated with blue discharges in active deep convection," 2018.
[73] E. M. Wescott, D. Sentman, D. Osborne, D. Hampton, and M. Heavner, "Preliminary results from the Sprites Aircraft Campaign: Blue jets," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 1209–1212, May 1995, doi: 10.1029/95GL00582.
[74] H. Zhang *et al.*, "On the Terrestrial Gamma-Ray Flashes Preceding Narrow Bipolar Events," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 48, no. 8, Apr. 2021, doi: 10.1029/2020GL092160.
[75] M. Marisaldi *et al.*, "Detection of terrestrial gamma ray flashes up to 40 MeV by the AGILE satellite," *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, vol. 115, no. A3, p. n/a-n/a, Mar. 2010, doi: 10.1029/2009JA014502.
[76] J. R. Dwyer and D. M. Smith, "A comparison between Monte Carlo simulations of runaway breakdown and terrestrial gamma-ray flash observations," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 32, no. 22, p. n/a-n/a, Nov. 2005, doi: 10.1029/2005GL023848.
[77] F. Lyu, S. A. Cummer, Z. Qin, and M. Chen, "Lightning Initiation Processes Imaged With Very High Frequency Broadband Interferometry," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 124, no. 6, pp. 2994–3004, Mar. 2019, doi: 10.1029/2018JD029817.
[78] M. G. Stock, P. R. Krehbiel, J. Lapierre, T. Wu, M. A. Stanley, and H. E. Edens, "Fast positive

breakdown in lightning," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 122, no. 15, pp. 8135–8152, Aug. 2017, doi: 10.1002/2016JD025909.
[79] J. N. Tilles *et al.*, "Fast negative breakdown in thunderstorms," *Nat. Commun. 2019 101*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, Apr. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-09621-z.
[80] A. Huang, S. A. Cummer, and Y. Pu, "Lightning Initiation From Fast Negative Breakdown is Led by Positive Polarity Dominated Streamers," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 48, no. 8, Apr. 2021, doi: 10.1029/2020GL091553.
[81] M. G. Stock, P. R. Krehbiel, J. Lapierre, T. Wu, M. A. Stanley, and H. E. Edens, "Fast positive breakdown in lightning," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 122, no. 15, pp. 8135–8152, Aug. 2017, doi: 10.1002/2016JD025909.
[82] T. M. P. Briels, J. Kos, G. J. J. Winands, E. M. Van Veldhuizen, and U. Ebert, "Positive and negative streamers in ambient air: measuring diameter, velocity and dissipated energy," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 23, p. 234004, Nov. 2008, doi: 10.1088/0022-3727/41/23/234004.
[83] C. D. Ahrens and H. Robert, *Essencial of meteorology - An invitation to the atmosphere*, Eighth edi. Boston - USA: CENGAGE learning, 2018.
[84] F. González Medrano, *Las comunidades vegetales de México*. México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Intituto de Ecologia.
[85] J. Shonk, *Introducing meteorology - A guide to wather*, Second edi. London: Dunedin, 2020.
[86] S. Emeis, *Wind Energy Meteorology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
[87] J. R. Holton, *An introducton to dinamic meteorology*, Fourth Edi. Elsevier academic press, 2004.
[88] S. Bandara, T. Marshall, S. Karunarathne, and M. Stolzenburg, "Electric field change and VHF waveforms of Positive Narrow Bipolar Events in Mississippi thunderstorms," vol. 243, no. 105000, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105000.
[89] P. Emeraldi and A. Hazmi, "Observed preliminary breakdown pulses of intracloud discharges," in *2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, Oct. 2017, vol. 2017-Janua, pp. 488–492, doi: 10.1109/ICHVEPS.2017.8225896.
[90] A. Hazmi, P. Emeraldi, M. I. Hamid, and N. Takagi, "Research on positive narrow bipolar events in Padang," in *2016 3rd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 2016, pp. 156–159, doi: 10.1109/ICITACEE.2016.7892429.
[91] T. A. L. N. Gunasekara, M. Fernando, U. Sonnadara, and V. Cooray, "Horizontal electric fields of lightning return strokes and narrow bipolar pulses observed in Sri Lanka," *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 173, no. December 2017, pp. 57–65, 2018, doi: 10.1016/j.jastp.2018.04.010.
[92] M. R. Ahmad, M. R. Mohd Esa, and V. Cooray, "Narrow bipolar pulses and associated microwave radiation," *Prog. Electromagn. Res. Symp.*, no. August, pp. 1087–1090, 2013.
[93] L. Feifan, M. Dong, Z. Baoyou, M. Ming, and L. Peng, "Characteristics of narrow bipolar Events," in *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Sep. 2016, vol. 91, no. 5, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICLP.2016.7791483.
[94] H. Liu, W. Dong, T. Wu, D. Zheng, and Y. Zhang, "Observation of compact intracloud discharges using VHF broadband interferometers," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 117, no. 1, pp. 1–8, 2012, doi: 10.1029/2011JD016185.
[95] H. Liu, D. Wansheng, Q. Tao, and W. Shi, "A time-domain analysis on waveform change of lightning electric fiel and identification of discarges types," *Meteorol. Mon.*, vol. 35, no. 3, pp. 49–59, 2009.
[96] C. Gomes, *Lightning*, vol. 780. Singapore: Springer Singapore, 2021.
[97] A. Galván and M. Fernando, "Operative characteristics of a parallel-plate antenna to measure vertical electric fields from lightning flashes," *Uppsala Univ.*, vol. Report UUR, 2000.

[98] D. Johari, V. Cooray, M. Rahman, P. Hettiarachchi, and M. M. Ismail, “Features of the first and the subsequent return strokes in positive ground flashes based on electric field measurements,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 150, pp. 55–62, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.04.031.

[99] M. Ismail, M. Rahman, V. Cooray, M. Fernando, P. Hettiarachchi, and D. Johari, “On the Possible Origin of Chaotic Pulse Trains in Lightning Flashes,” *Atmosphere (Basel).*, vol. 8, no. 12, p. 29, Feb. 2017, doi: 10.3390/atmos8020029.

[100] D. Johari, V. Cooray, M. Rahman, P. Hettiarachchi, and M. Ismail, “Characteristics of Preliminary Breakdown Pulses in Positive Ground Flashes during Summer Thunderstorms in Sweden,” *Atmosphere (Basel).*, vol. 7, no. 3, p. 39, Mar. 2016, doi: 10.3390/atmos7030039.

[101] O. F. Escobar Alvarado, “Lightning magnetic field measuring system in Bogotá,” Universidad Nacional de Colombia, 2013.

[102] H. Nakamura and T. Asakawa, “Device Support For SL1000 Digitizer Modules.” Yokogawa Electric Corporation, 2009.

[103] H. E. Rojas, C. A. Rivera, J. Chaves, C. A. Cortes, F. J. Roman, and M. Fernando, “New circuit for the measurement of lightning generated electric fields,” in *2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)*, Oct. 2017, pp. 188–194, doi: 10.1109/SIPDA.2017.8116922.

[104] F. Lü, B. Zhu, M. Ma, L. Wei, and D. Ma, “Observations of narrow bipolar events during two thunderstorms in Northeast China,” *Sci. China Earth Sci.*, vol. 56, no. 8, pp. 1459–1470, Aug. 2013, doi: 10.1007/s11430-012-4484-2.

[105] B. Zhu, S. Tao, and Y. Tan, “Initial observations of the lightning Narrow Bipolar pulses with very powerful VHF radiation,” *acta Meteorol. Sin.*, vol. 65, no. 1, pp. 124–130, 2007.

[106] F. Santamaría, C. A. Cortés, and F. J. Román, “Uso de la Transformada de Ondeletas (Wavelet Transform) en la Reducción de Ruidos en las Señales de Campo Eléctrico producidas por Rayos,” *Inf. tecnológica*, vol. 23, no. 1, pp. 65–78, 2012, doi: 10.4067/S0718-07642012000100008.

[107] T. A. L. N. Gunasekara, U. Mendis, M. Fernando, U. Sonnadara, and V. Cooray, “Electric field signatures of narrow negative bipolar pulse activities from lightning observed in Sri Lanka,” in *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Oct. 2014, pp. 624–628, doi: 10.1109/ICLP.2014.6973199.

[108] T. Wu, D. Wansheng, and H. Liu, “Characteristics of electrical wave of narrow bipolar event,” *Plateau Meteorol.*, vol. 30, no. 3, pp. 823–830, 2011.

ANEXOS

Anexo A: Manual de la Herramienta de Manipulación de Señales de NBPs (HMS_NPBS)



AUTORES:
Ing. SAMUEL LEANDRO JIMÉNEZ
Prof. Dr.-Ing. HERBERT ENRIQUE ROJAS

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

INGENIERÍA ELÉCTRICA

Grupo de Investigación en Sistemas Eléctricos y Eficiencia Energética

Universidad Distrital Francisco José de caldas
Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica
Grupo de investigación en Sistemas Eléctricos y Eficiencia Energética (GISE3)
2022

ÍNDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN 7

1.1 Descripción del software 7

1.2 Requerimientos del sistema 8

1.3 Interfaz gráfica 8

1.4 Listado de funciones operativas 13

1.5 Instalación del software 15

2 MENÚ GENERAL Y BARRA DE NAVEGACIÓN 17

2.1 Menú general: Pestaña Opciones 17

2.2 Menú general: Pestaña Ayuda 17

2.3 Barra de navegación 18

2.4 Botón de Ayuda 18

3 SECCIÓN 1: IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS 19

3.1 Módulo 1.1: Cargar archivo 22

3.2 Módulo 1.2: Información de señal inicial 24

3.3 Módulo 1.3: Gráfica de la señal 24

3.4 Módulo 1.4: Selección semiautomática de eventos 26

3.5 Módulo 1.5.1: Selección manual de eventos 27

3.6 Módulo 1.5.2: Guardar archivo 29

4 SECCIÓN 2: VISUALIZACIÓN DE REGISTROS 31

4.1 Módulo 2.1: Número de señales capturadas 31

4.2 Módulo 2.2: Desplazamiento de registros 31

4.3 Módulo 2.3: Guardar archivo 32

4.4 Módulo 2.4: Gráfica del evento NBP 33

4.5 Módulo 2.5: Información del registro 33

5 SECCIÓN 3: CARACTERIZACIÓN DE NBP 35

5.1 Módulo 3.1: Grafica de la señal/registro de NBP 37

5.2 Módulo 3.2: Cargar registro 37

5.3 Módulo 3.3: Información del registro 37

5.4 Módulo 3.4: Asignación de características del registro 38

5.5 Módulo 3.5: Selección del tipo de NBP 39
5.6 Módulo 3.6: Selección de puntos 39
5.7 Módulo 3.7: Selección del punto C 41
5.8 Módulo 3.8: Estimación de los parámetros 42
5.9 Módulo 3.9: Guardar datos 42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Interfaz grafica de la sección de identificación de eventos 10
Figura 1-2 Interfaz grafica de la sección de visualización de registros..... 11
Figura 1-3 Interfaz grafica de la sección de caracterización de NBPs..... 12
Figura 1-4 Icono de la herramienta computacional..... 16
Figura 2-1 Visualización del menú general..... 17
Figura 2-2 Visualización de la pestaña “Opciones” del menú general 17
Figura 2-3 Ventana emergente para validar el cierre del aplicativo..... 17
Figura 2-4 Visualización de la pestaña “Opciones” del menú genera 18
Figura 2-5 Visualización de la barra de navegación 18
Figura 2-6 Visualización del botón de ayuda..... 18
Figura 3-1 Flujograma selección señales de campo eléctrico que coinciden con las características de los NBPs..... 22
Figura 3-2 Visualización del módulo 1.1..... 22
Figura 3-3 Selección del archivo de carga para el módulo 1.1 23
Figura 3-4 Advertencias de la herramienta al cargar un archivo. 23
Figura 3-5 Señal de campo eléctrico de eventos atmosféricos..... 24
Figura 3-6 Workspace de un registro en formato *.mat que contiene las matrices de tiempo (t) y magnitud (x)..... 24
Figura 3-7 Visualización del módulo 1.2..... 24
Figura 3-8 Visualización de módulo 1.3 y su menú superior..... 25
Figura 3-9 Visualización de la herramienta ‘Importar grafica’..... 25
Figura 3-10 Visualización de la herramienta ‘Cepillo’ 26
Figura 3-11 Visualización del módulo 1.4..... 26
Figura 3-12 Ventana de advertencia sobre proceso satisfactorio..... 27
Figura 3-13 Visualización al cargar el archivo. 28
Figura 3-14 Visualización al realizar zoom a la gráfica..... 28
Figura 3-15 Visualización del módulo 1.3 luego de presionar la opción marcar en diferentes secciones 28
Figura 3-16 Visualización del módulo 1.5.2..... 29
Figura 3-17 Selección de carpeta donde se guardará el archivo 29
Figura 3-18 Mensaje del proceso de guardado realizado correctamente 29
Figura 4-1 Visualización del módulo 2.1..... 31
Figura 4-2 Visualización cambio de registro en el módulos 2.2 y 2.4. 32
Figura 4-3 Visualización del módulo 2.3..... 32
Figura 4-4 Visualización del módulo 2.4..... 33
Figura 4-5 Visualización del módulo 2.5..... 33
Figura 5-1 Flujograma de la caracterización de señales de campo eléctrico de NBPs 36
Figura 5-2 Visualización del módulo 3.1..... 37

Figura 5-3 Visualización del módulo 3.2 37
Figura 5-4 Visualización del módulo 3.3 38
Figura 5-5 Visualización del módulo 3.4 38
Figura 5-6 PNBP con el nivel de referencia 39
Figura 5-7 Visualización del módulo 3.5 39
Figura 5-8 Visualización del módulo 3.6 40
Figura 5-9 Módulo 3.1 luego de presionar el botón “Encontrar puntos” del módulo 3.6 40
Figura 5-10 Modificación de punto A a un PNBP 40
Figura 5-11 Visualización del módulo 3.7 41
Figura 5-12 Registros asociados a un PNBP 41
Figura 5-13 Registros asociados a un NNBP. 42
Figura 5-14 Visualización del módulo 3.8. 42
Figura 5-15 Visualización del módulo 3.9 43
Figura 5-16 Selección de archivo módulo 3.9 43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Requerimientos de cómputo para la instalación de la herramienta computacional 8
Tabla 1-2 Listado de las funciones operativas del aplicativo..... 13
Tabla 3-1 Clasificación de las formas de onda de campo eléctrico de NBPs 19
Tabla 5-1 Descripción de los puntos característicos para estimar los parámetros (tiempo y magnitud) de las señales de campo eléctrico generado por NBPs..... 35
Tabla 5-2 Parámetros temporales y de magnitud de la forma de onda de campo eléctrico de NBPs 35

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del software

Los Pulsos Bipolares Angostos (Narrow Bipolar Pulses: NBPs), también conocidos como Compact Intracloud Discharges (CID) o Narrow Bipolar Events (NBEs), son descargas atmosféricas intranube (IC) que se caracterizan por su corta duración a una escala de microsegundos [1]. Adicionalmente, son la fuente natural más fuerte de radiación de radiofrecuencia, incluso mayor de las descargas nube-tierra (CG). Inicialmente, se pensaba que los NBPs ocurrían de forma aislada, actualmente se conoce que también pueden aparecer ocasionalmente antes o después de una descarga atmosférica [2]-[4]. Recientemente, los NBPs ha sido investigados por su posible relación con varios tipos de Eventos Transitorios Luminosos (Transient Luminous Events: TLEs), fenómenos eléctricos que ocurren por encima de las nubes de tormenta. Entre estos fenómenos se encuentran: los eventos luminosos azules (Blue Luminous Events: BLUEs) [5]-[8], Las descargas terrestres de rayos gamma (terrestrial gamma-ray flashes: TGFs) [9] y los Duendes (Emissions of Light and Very Low Frequency Perturbations from Electromagnetic Pulse Sources: Elves) [10].

Colombia presenta una alta actividad de rayos debido a que se encuentra ubicada dentro de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), región donde los vientos cálidos y húmedos de los hemisferios norte y al sur chocan favoreciendo la formación de nubes de tormenta (mismas nubes en las que se producen los NBPs). Actualmente, el Grupo de Investigación GISE3 obtiene registros de campo eléctrico generado por NBPs gracias a la implementación de la Estación automatizada de medición indirecta de rayos (EMIR - UD) la cual está instalada en el Campus de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, ubicado en la zona sur de Bogotá, Colombia [11].

En este contexto, la herramienta computacional HMS_NPBs (Herramienta de Manipulación de Señales de NBPs) facilita la identificación de las formas de onda de campo eléctrico producidas por NBPs en los registros obtenidos usando la estación de medición. Adicionalmente, permite caracterizar ágilmente (menos de 90 segundos) las señales bajo estudio mediante la obtención de parámetros temporales y de magnitud. Esta herramienta se desarrolló en el entorno ***App Designer®***, basado en el lenguaje de programación de ***MATLAB®,*** ideado para realizar cálculos científicos y de ingeniería**.**

El software HMS_NPBs está compuesto por treinta y seis (36) funciones operativas y aproximadamente 5µlíneas de código distribuidas en veinte (20) módulos. Estas funciones y sus bloques de programación en conjunto permiten al usuario:

a. Realizar una inspección minuciosa de señales de campo eléctrico generado por rayos (flashes nube-tierra o intranube) y otras perturbaciones electromagnéticas del tipo transitorio.
b. Identificar, seleccionar, recortar y guardar nuevos registros a partir de las señales ingresadas.
c. Analizar gráficamente los registros obtenidos en el orden de los milisegundos hasta algunas decenas de microsegundos.

d. Explorar y hallar potenciales registros de NBPs dentro de las señales ingresadas.
e. Caracterizar señales de campo eléctrico generado por NBPs mediante la obtención de parámetros temporales y de magnitud.
f. Guardar los resultados del proceso de la caracterización de NBPs en una base de datos (archivo tipo Excel).

1.2. Requerimientos del sistema

Para instalar y ejecutar la herramienta computacional es necesario el uso de un equipo de cómputo con las prestaciones que se observan la Tabla 1-1.

Tabla 1-1. Requerimientos de cómputo para la instalación de la herramienta computacional

Requerimiento	Características
Sistema operativo	• Windows 10 (version 1803 o superior) • Windows 7 Service pack 1 • Linux Ubuntu 20.04, 18.04 o 16.04 LTS • Linux Debian 10 o Debian 9 • macOS Big Sur (11) • macOS Catalina (10.15) • macOS Mojave (10.14)
Compilador	Matlab® compiler runtime versión 9.10 (compatible con Matlab® R2021a de 32 o 64 bit)
Procesador	Cualquier procesador Intel o AMD con velocidad superior a 1.2 GHz
Memoria RAM	4 GB (mínimo) – 8 GB (recomendado)
Espacio libre en disco duro	700 MB
Tarjeta gráfica (GPU)	No se requiere una tarjeta gráfica específica

Fuente: autores y adaptado de [12]-[14]

1.3. Interfaz gráfica

La herramienta computacional desarrollada posee una interfaz gráfica compuesta por una serie de componentes visuales e interactivos: menú general, barra de navegación, sección de identificación de eventos, visualización de registros y caracterización de NBP. Los componentes dentro de la ventana principal del aplicativo cambiarán dependiendo de la sección escogida en la barra de navegación. Solamente el menú general y la barra de navegación se encontrarán fijos. Inicialmente, la sección de identificación de eventos está compuesta por cinco módulos como se muestra en la figura 1-1:

- Módulo 1.1: Cargar archivo
- Módulo 1.2: Información del registro
- Módulo 1.3: Grafica del registro
- Módulo 1.4: Guardar archivo
- Módulo 1.5.1: Grafica del registro

- Módulo 1.5.2: Información del registro

Por su parte, la sección de visualización de registros eventos está compuesta por cinco módulos como se muestra en la figura 1-2:

- Módulo 2.1: Número de señales capturadas
- Módulo 2.2: Desplazamiento de registros
- Módulo 2.3: Guardar archivo
- Módulo 2.4: Grafica del evento
- Módulo 2.5: Información del registro

Finalmente, la sección de caracterización de NBPs está por nueve módulos, tal y como se aprecia en la figura 1-3:

- Módulo 3.1: Gráfica del registro de NBP
- Módulo 3.2: Cargar registro
- Módulo 3.3: Información del registro
- Módulo 3.4: Asignación del nivel de referencia
- Módulo 3.5: Selección del tipo de NBPs
- Módulo 3.6: Selección de puntos
- Módulo 3.7: Verificación del punto C
- Módulo 3.8: Calculo de parámetros
- Módulo 3.9: Guardar datos

En los siguientes capítulos se explicará detallada el funcionamiento y proceso de ejecución de cada una de las secciones, módulos y componentes que hacen parte la herramienta computacional.

Espacio dejado en blanco de manera intencional

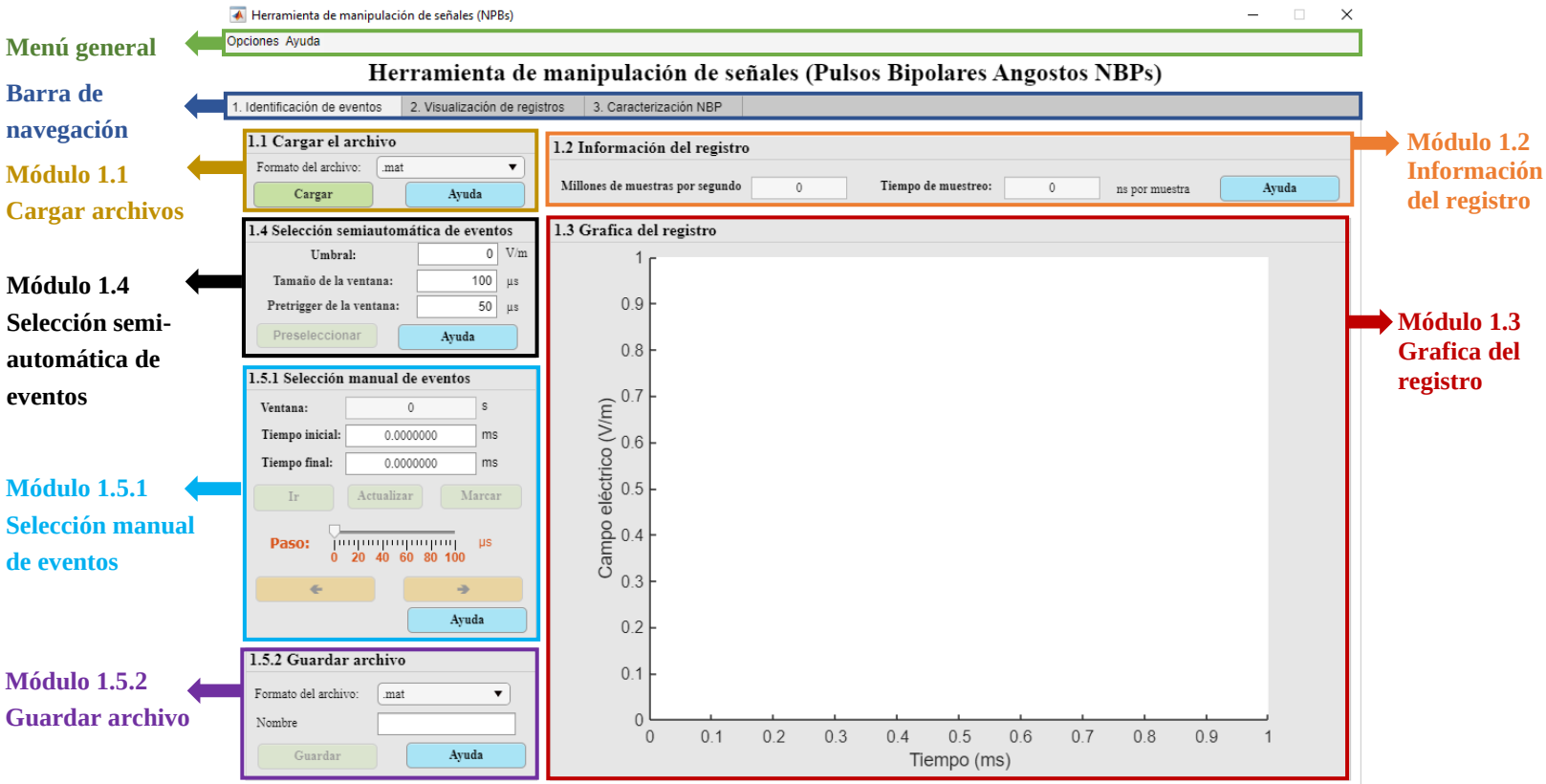


Figura 1-1 Interfaz grafica de la sección de identificación de eventos
Fuente: autores

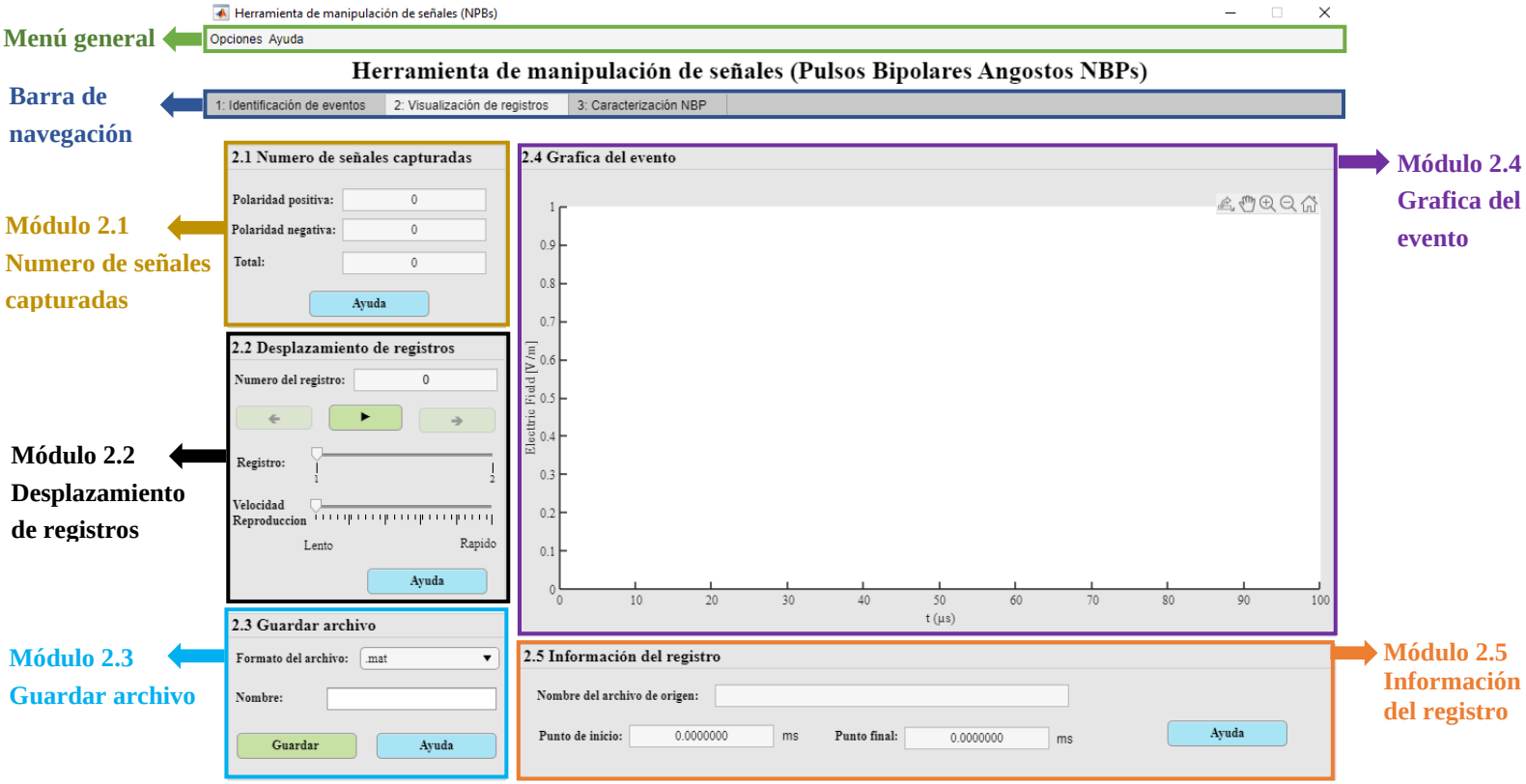


Figura 1-2 Interfaz grafica de la sección de visualización de registros
Fuente: autores

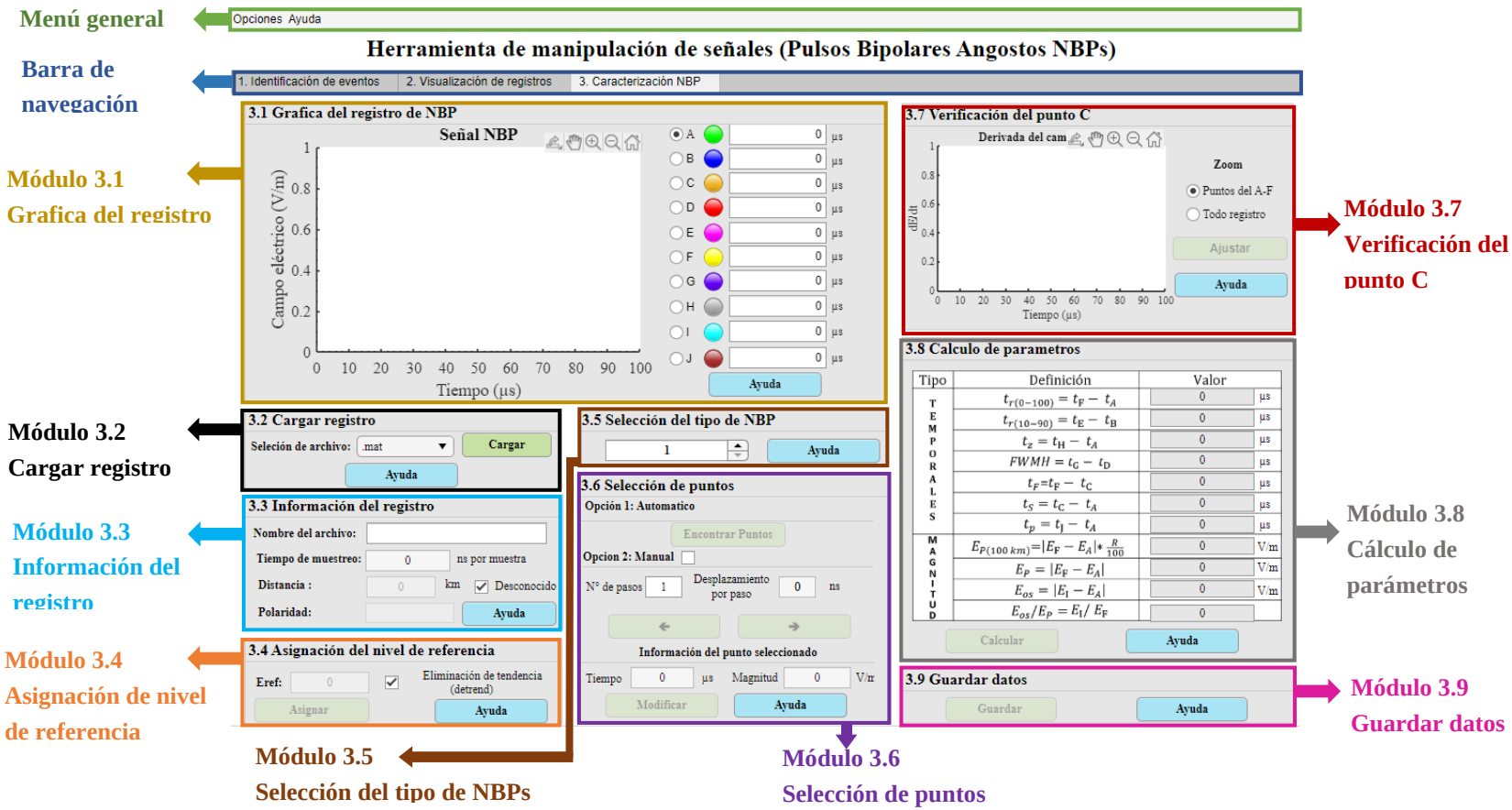


Figura 1-3 Interfaz grafica de la sección de caracterización de NBPs
Fuente: autores

1.4. Listado de funciones operativas

La herramienta de manipulación de señales de NBPs (HMS_NPBs) está compuesto por treinta y seis (36) funciones operativas. En la tabla 1-2 se describen cada una de estas, las cuales han sido incorporadas en los módulos que integran la interfaz y el aplicativo computacional.

Tabla 1-2 Listado de las funciones operativas del aplicativo

Módulo	Nombre de la función	Descripción
Generación de la interfaz	startupFcn	• Activa la propiedad de desplazamiento con barras laterales (scroll), en caso de que el tamaño de la pantalla sea menor que el de la interfaz • Inicializa variables necesarias para que las barras desplegables funcionen correctamente.
	app	Construye la ventana principal del software
	createComponents	Ubica todos los componentes en la ventana principal con sus respectivas propiedades
	runStartupFcn	Ejecuta las funciones app, créate-Components y startupFcn al ejecutar el software
Menú general	SalirMenuSelected	Abre una ventana emergente consultando al usuario si desea salir del aplicativo. En caso presionar el botón ***"si"*** el aplicativo se cerrara instantáneamente.
	LimpiarMenuSelected	Borra todas las variables globales y locales. Adicionalmente, limpia todas la gráficas, campos y opciones desplegables.
	ManualMenuSelected	Abre el manual del aplicativo
	AcercadesoftwareMenuSelected	Abre una ventana emergente con la información de contacto de los autores de la herramienta
Módulo 1.1: Cargar archivos	Formatodelarchivo1_1ValueChanged	Guarda el valor del formato seleccionado en la barra desplegable asociada
	CargarButton1_1Pushed	• Solicita al usuario seleccionar el archivo del registro • Obtiene los vectores de tiempo y magnitud del registro ingresado. • Grafica el registro ingresado en el módulo 1.3. • Calcula el tiempo y frecuencia de muestreo del registro e imprime la información en el módulo 1.2. • Activa la funcionalidad de los botones de los módulos 1.4, 1.5.1 y 1.5.2. • Obtiene el tiempo total del registro e imprime el dato en el campo ***ventana*** del módulo 1.5.1

Nota: la tabla continua en la siguiente página

Módulo	Nombre de la función	Descripción
Módulo 1.4: Selección de eventos	PreseleccionarButton1_4	Ejecuta el algoritmo de identificación de eventos a partir de los campos diligenciados en el módulo 1.4 .
Módulo 1.5.1: Selección manual de eventos	IrButton1_5_1Pushed	Ajusta los límites del eje horizontal de la gráfica del módulo 1.5, a partir de los valores de los campos *Tiempo inicial* y T*iempo final* del módulo 1.5.1
	ActualizarButton1_5_1Pushed	Actualiza los campos V*entana*, *Tiempo inicial* y *Tiempo final* del módulo 1.5.1, según los límites de la gráfica del módulo 1.3
	MarcarButton1_5_1ValueChanged	Imprime un punto rojo en el centro de la gráfica del módulo 1.3.
	ButtonDIzq1_5_1Pushed	Desplaza hacia la izquierda la señal vista en el módulo 1.3 según el valor de la barra deslizante *paso* de la sección 1.5.1
	ButtonDDer1_5_1Pushed	Desplaza hacia la derecha la señal vista en el módulo 1.3 según el valor de la barra deslizante *paso* de la sección 1.5.1
Módulo 1.5.2: Guardar archivo	Formatodelarchivo1_5_2ValueChanged	Guarda el valor del formato seleccionado en la barra desplegable del módulo 1.5.2
	GuardarButton1_5_2Pushed	Guarda una sección del registro ingresado entre los valores de los campos el tiempo inicial y tiempo final del módulo 1.5.1, en el formato indicado en la barra desplegable del módulo 1.5.2
Módulo 2.2: Desplazamiento de registros	• ButtonDizq2_2Pushed • ButtonDDer2_2Pushed	A partir del conjunto de señales encontradas por el algoritmo de identificación de eventos, cambia la señal vista en la gráfica del módulo 2.4 y los datos de esta señal en el módulo 2.5.
	Button_Play2_2	A partir del conjunto de señales encontradas por el algoritmo de identificación de eventos, cambia automáticamente la señal vista en la gráfica en el módulo 2.4 y los datos de esta señal en el módulo 2.5, con un intervalo de tiempo dado por la barra de *velocidad* del módulo 2.2.
Módulo 2.3: Guardar archivo	Formatodelarchivo2_3ValueChanged	Guarda el valor del formato seleccionado en la barra desplegable del módulo 2.3
	GuardarButton2_3Pushed	Guarda el registro visto en módulo 2.4 con el formato indicado en la barra desplegable del módulo 2.3
Módulo 3.2: Cargar registro	Selecindearchivo3_2ValueChanged	Guarda el valor del formato seleccionado en la barra desplegable del módulo 3.2
	CargarButton3_2Pushed	• Solicita al usuario seleccionar el archivo del registro • Obtiene los vectores de tiempo y magnitud del registro ingresado.

Nota: la tabla continua en la siguiente página

Módulo	Nombre de la función	Descripción
Módulo 3.2: Cargar registro	CargarButton3_2Pushed	• Calcula el tiempo de muestreo y posteriormente imprime la información en el módulo 3.3. • Identifica la polaridad del registro de NBP y posteriormente imprime la información del módulo 3.3 • Grafica el registro ingresado del módulo 3.1
Módulo 3.4: Asignación del nivel de referencia	CheckBoxDetrend3_4ValueChanged	Permite al usuario ingresar el valor del nivel de referencia (Eref) del registro o seleccionar el cálculo por medio de la función eliminación de tendencia (detrened)
	CheckBoxDistancia3_4ValueChanged	Permite al usuario ingresar el valor de la distancia entre la estación de medición y el lugar de la aparición del registro
	AsignarButton3_4Pushed	Asigna el valor de *nivel de referencia (Eref)* del módulo 3.4. En caso de la opción de eliminación de tendencia esté habilitado la herramienta calculara el nivel de referencia
Módulo 3.6: Selección de puntos	EncontrarPuntosButton3_6Pushed	Ejecuta el algoritmo de caracterización, encuentra los puntos característicos en la señal de NBP
	ButtonDIzq3_6Pushed	Desplaza la posición del punto característico que va ser modificado hacia la izquierda en la gráfica del módulo 3.6.
	ButtonDDer3_6Pushed	Desplaza la posición del punto característico que va ser modificado hacia la derecha en la gráfica del módulo 3.6.
	ModificarButton3_6Pushed	Modifica la posición del punto característico a los nuevos valores de la posición asignada por el usuario.
Módulo 3.7: Selección del punto C	EjecutarButton3_7Pushed	Grafica la derivada del registro ingresado en la en el módulo 3.7, ajustando los límites de la gráfica desde el punto inicial del NBP hasta el punto de mayor magnitud de la señal
Módulo 3.8: Calculo de parámetros	CalcularButton3_8Pushed	Calcula los parámetros temporales y de magnitud de la señal de NBP, e imprime los resultados en la tabla del módulo 3.8
Módulo 3.9: Guardar datos	GuardarButton3_9Pushed	Guarda los resultados obtenidos en el módulo 3.8 en la base de datos de tipo Excel
Todos los módulos	AyudaButtonPushed	Abre una ventana emergente con un enunciado sobre el funcionamiento general del módulo.

Fuente: autores

1.5. Instalación del software

Los archivos necesarios para la instalación o ejecución del programa se encuentran en la carpeta comprimida ***HMS_NPBs.rar***. Para instalar y ejecutar la herramienta se sugieren dos alternativas: (a)

mediante la transferencia de archivos; y (b) realizando la instalación directa usando ejecutables. A continuación, se explicará el procedimiento para cada caso.

- **Procedimiento 1 (transferencia de archivos)**

i. Si el equipo de cómputo tiene instalado el software Matlab® en la versión R2021 (o superior) se puede ejecutar la herramienta sin necesidad de realizar un proceso de instalación extenso. Para esto, se deben copiar los archivos dispuestos en la carpeta Archivos_HMS_NBPs y ubicarlos en la ruta por defecto de Matlab®, los archivos relacionados son:

- ✓ Interfaz gráfica de la herramienta ***HMS_NBPs.mlapp***
- ✓ Imagen de apoyo: TablaParamentros.png
- ✓ Archivo pdf: Manual general de la herramienta HMS_NPBs
- ✓ Archivo Excel: BD_NBPs.xlsx

NOTA: Para conocer la ruta por defecto de Matlab® se debe ingresar el comando ***pwd*** en el Command Windows.

ii. Abrir Matlab® (Cualquier versión desde la R2021 o superior).
iii. Dirigirse a la pestaña apps y posteriormente a la opción Design App. En pocos segundos se desplegará una nueva ventana.
iv. Oprimir la opción Open y posteriormente seleccionar el archivo HMS_NPBs.mlapp, luego se deberá oprimir el botón abrir. En pocos segundos se desplegará la interfaz gráfica.
v. Oprimir la opción Run.
vi. Inicia la ejecución de le herramienta y se puede manipular por el usuario.

- **Procedimiento 2 (Instalar el programa usando ejecutables)**

i. Ubicar la carpeta ***Instalador*** y ejecutar como administrador el archivo ***HMS_NPBs_Install.exe***.
ii. Seleccionar la(s) carpeta(s) donde se va(n) a instalar la herramienta y el Matlab® runtime.
iii. Aceptar los términos y condiciones de licencia de Matlab® runtime.
iv. Oprimir el botón ***install***. Se debe esperar unos minutos mientras se instala la herramienta.
v. Finalmente, aparecerá el icono de la herramienta en el escritorio del PC (ver la figura 1-4).
vi. La herramienta podrá ser abierta y utilizada al hacer doble click sobre el ícono.

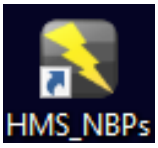


Figura 1-4 Icono de la herramienta computacional
Fuente: autores

2. MENÚ GENERAL Y BARRA DE NAVEGACIÓN

En la parte superior de la herramienta se encuentra el menú general que permite al usuario ejecutar una serie de funciones que se detallarán en las siguientes secciones. El menú general está compuesto por dos pestañas: "***Opciones***" y "***Ayuda***". En la figura 2-1 se muestra este menú.

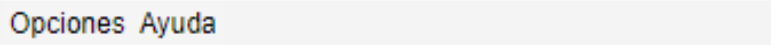


Figura 2-1 Visualización del menú general
Fuente: autores

2.1. Menú general: Pestaña Opciones

Al presionar la pestaña ***Opciones*** se despliegan dos (2) funciones: ***Limpiar*** y ***Salir*** (ver figura 2-2). La opción ***Limpiar*** elimina todas las variables calculadas previamente, vacía todos los campos diligenciados y borra las gráficas. En el caso de la opción ***Salir***, esta permite cerrar el aplicativo. Para ejecutar dicha opción el usuario deberá confirmar la petición en la ventana emergente que aparecerá luego de la solicitud de cierre (ver figura 2-3).

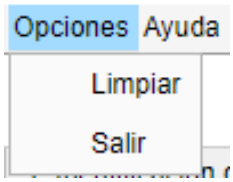


Figura 2-2 Visualización de la pestaña "Opciones" del menú general
Fuente: autores

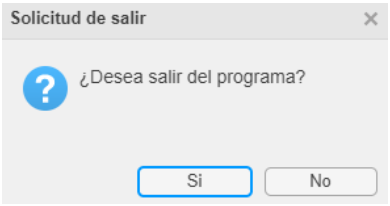


Figura 2-3 Ventana emergente para validar el cierre del aplicativo
Fuente: autores

2.2. Menú general: Pestaña Ayuda

Al presionar ***Ayuda*** en el menú general se desplegarán dos (2) opciones: ***Manual*** y ***Acerca de software*** (ver figura 2-4). La opción ***Manual*** permite abrir la guía de usuario (este documento), en el cual se explican las secciones que componen la herramienta computacional, los mensajes de advertencia y la correcta utilización del software. En el caso de la opción ***Acerca de software***, abre

una ventana emergente con la información de contacto de los autores y los datos generales del aplicativo.

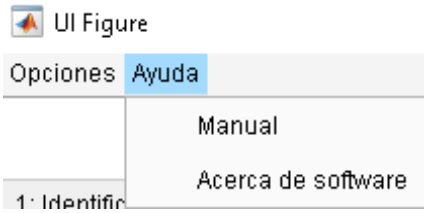


Figura 2-4 Visualización de la pestaña “Opciones” del menú genera
Fuente: autores

2.3. Barra de navegación

Bajo el menú general se encuentra la barra de navegación, la cual permite desplazarse rápidamente entre las secciones del aplicativo. Está compuesta por tres (3) pestañas: Identificación de eventos, Visualización de registros y Caracterización de NBP (ver figura 2-5). Para dirigirse a cualquiera de las secciones se debe oprimir la pestaña correspondiente.

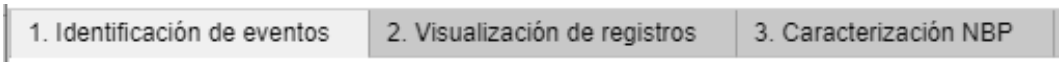


Figura 2-5 Visualización de la barra de navegación
Fuente: autores

2.4. Botón de Ayuda

El botón de ayuda se encuentra en todos los módulos de la herramienta, tal y como pudo observar en las figuras: 1-1, 1-2 y 1-3. Si el usuario tiene alguna inquietud acerca de cómo se debe utilizar un determinado módulo o, del significado de algún campo o termino, se puede dirigir al botón de ayuda. Al presionar dicho botón se abrirá una ventana emergente con la descripción y funcionamiento del módulo. En la figura 2-6 se observa el botón de ayuda.



Figura 2-6 Visualización del botón de ayuda
Fuente: autores

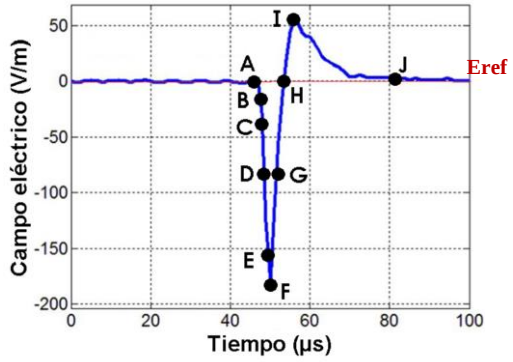
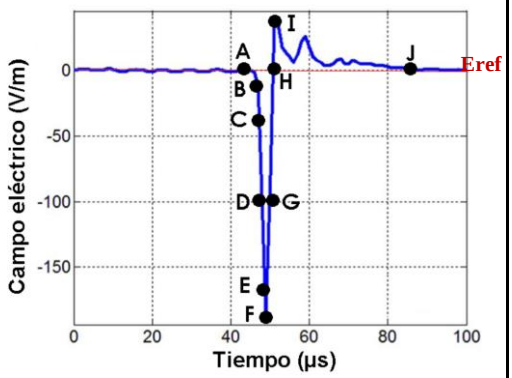
3. SECCIÓN 1: IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS

Las formas de onda de campo eléctrico generado por los NBPs se caracterizar por tener una primera cresta (pendiente de ascenso) de gran magnitud, seguida de una segunda cresta de menor magnitud y dirección opuesta a la primera (respecto a la referencia). Estos impulsos son generalmente clasificados por su polaridad, razón por la cual en este trabajo se emplea ***la convención de signos atmosféricos***. Esta convención menciona que, si la primera cresta es de valor negativo, el pulso será considerado de polaridad positiva (Positive narrow bipolar pulses; PNBPs). En caso contrario, si la primera cresta es de valor positivo el pulso será considerado de polaridad negativa (Negative narrow bipolar pulse; NNBPs).

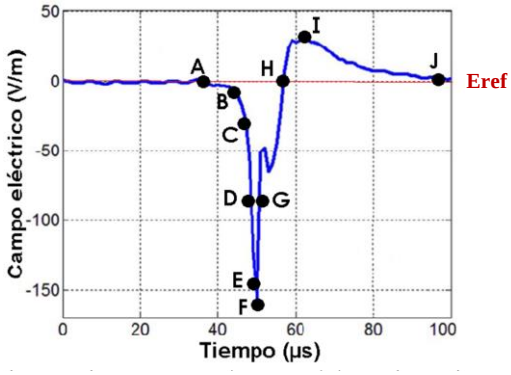
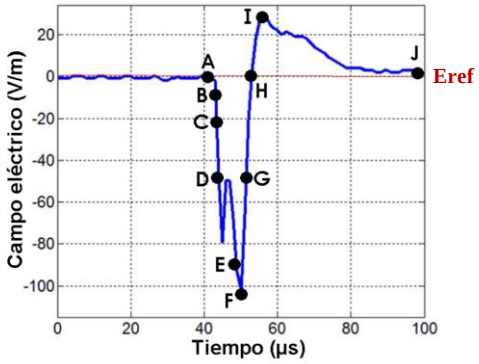
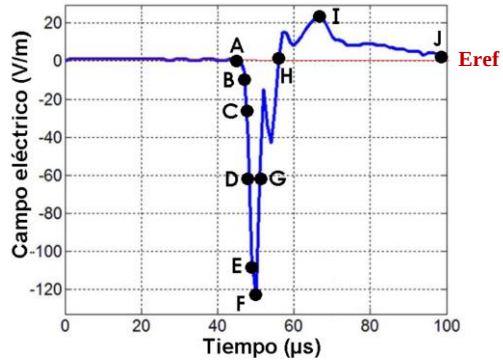
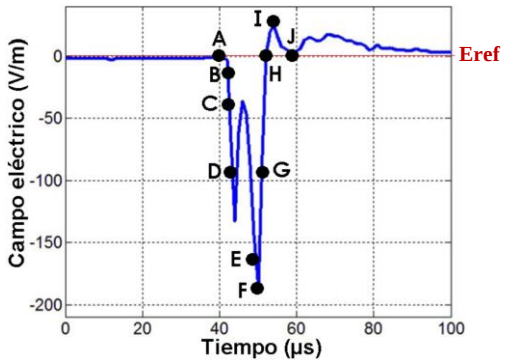
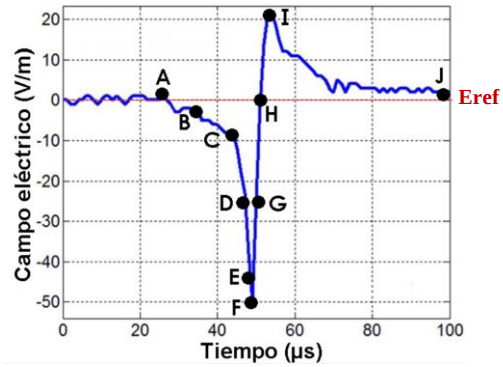
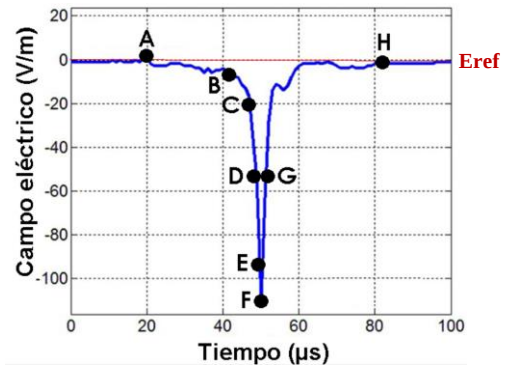
Hasta el momento, el estudio de clasificación más amplio y detallado sobre las formas de onda de campo eléctrico de los NBPs se realizó por Leal y otros investigadores en Florida - Estados Unidos, durante 2019 [15]. En este estudio se recopilaron mil veintidós (1022) señales de NBPs en rangos de hasta de 500 km con respecto a la estación de medición. A partir de esta clasificación, se determinaron las características que tienen en común las formas de onda de los NBPs. Adicionalmente, se desarrolló un algoritmo que facilita la identificación de NBPs.

De esta forma, y como marco de referencia para el desarrollo de la herramienta computacional y los algoritmos de caracterización, la tabla 3-1 sintetiza las formas de onda definidas para la identificación de los NBPs. Cabe mencionar que los algoritmos incluidos en la herramienta también pueden identificar formas de onda de otros tipos de eventos eléctricos atmosféricos tales como descargas preliminares y return strokes, entre otros. Esto se debe a que la aplicación computacional permite al usuario ingresar y ajustar varios parámetros de entrada, tales como: umbral, tamaño completo de la ventana y pretrigger de la ventana. A continuación, se explicará el funcionamiento de dichos algoritmos y su relación con los parámetros mencionados.

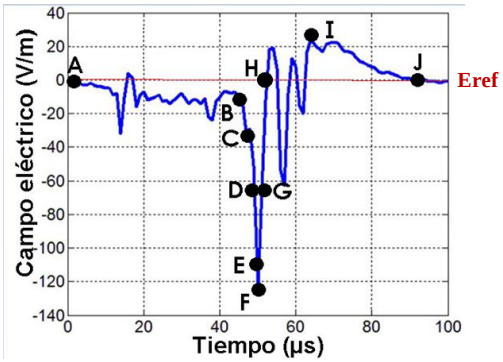
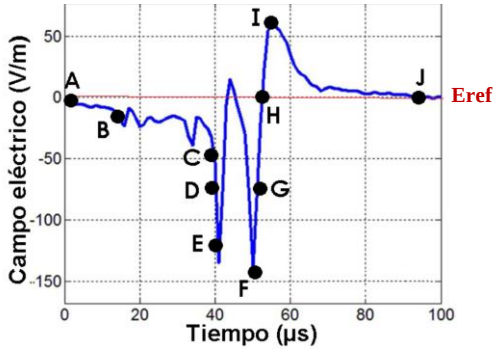
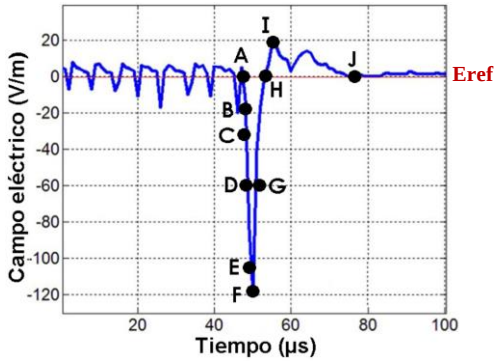
Tabla 3-1 Clasificación de las formas de onda de campo eléctrico de NBPs

NBP tipo 1: Forma bipolar, ambas crestas sin oscilaciones	**NBP tipo 2:** Forma bipolar cuya primera cresta no presenta oscilaciones y la segunda si
	

Nota: la tabla continua en la siguiente página

NBP tipo 3: Forma bipolar en la cual se presenta un pico pequeño después del máximo pico de la primera cresta, y la segunda no presenta oscilaciones	**NBP tipo 4:** Forma bipolar en la cual se presenta un pico pequeño antes del máximo pico de la primera cresta y la segunda no presenta oscilaciones
	
NBP tipo 5: Forma bipolar en la cual se presenta un pico pequeño después del máximo pico de la primera cresta, y la segunda presenta oscilaciones.	**NBP tipo 6:** Forma bipolar en la cual se presenta un pico pequeño antes del máximo pico de la primera cresta, y la segunda presenta oscilaciones.
	
NBP tipo 7: Forma bipolar en la cual se presenta un mayor frente lento y ambas crestas no presentan oscilaciones	**NBP tipo 8:** Forma de onda unipolar en la cual no se presenta la segunda cresta
	

Nota: la tabla continua en la siguiente página

NBP tipo 9: Forma bipolar en la cual se presenta un mayor frente lento. Adicionalmente, la segunda cresta presenta grandes oscilaciones	**NBP tipo 10:** Forma bipolar en la cual se presenta un mayor frente lento. Adicionalmente, la cresta inicial tiene múltiples picos, y la segunda no presenta oscilaciones
	
NBP tipo 11: Forma de onda bipolar precedida por un tren de pulsos más pequeño	
	

Fuente: Adaptado de [15]

El primer proceso que realiza el algoritmo de identificación de eventos es el reconocimiento de los vectores de tiempo y magnitud de la señal cargada (señal de entrada) en la herramienta computacional. Luego, se identifican los puntos de la señal que superen un valor de magnitud (tanto positivos como negativos). Este valor corresponde al parámetro de ingreso ***umbral***. Posteriormente, se selecciona una porción de la señal alrededor de cada punto definido por encima del umbral. Esta porción se denomina sub-ventana. El tamaño de esta sub-ventana lo determinará el parámetro ***tamaño de la ventana*** y su posición inicial será asociada con un tiempo previo al punto seleccionado. Dicho tiempo es el parámetro de ingreso ***pretrigger de la ventana.***

El algoritmo verificará si el punto seleccionado es el de mayor magnitud dentro de su sub-ventana, y en caso de que no se cumpla la sub-ventana será descartada, así con cada punto identificado. Del mismo modo, se verifica si la porción de la señal contenida en cada sub-ventana tiene cruce por el nivel de referencia antes y/o después del punto de mayor magnitud.

Finalmente, para el correcto reconocimiento de las formas de onda de NBPs el usuario deberá inspeccionar las sub-ventanas recopiladas por el algoritmo (consideradas como potencialmente válidas) y compararlas con las formas de ondas típicas presentadas en la tabla 3-1. El flujograma del algoritmo de identificación de eventos se muestra en la En la figura 3-1. En las siguientes secciones se describirán los módulos que permiten la ejecución del algoritmo de identificación de eventos.

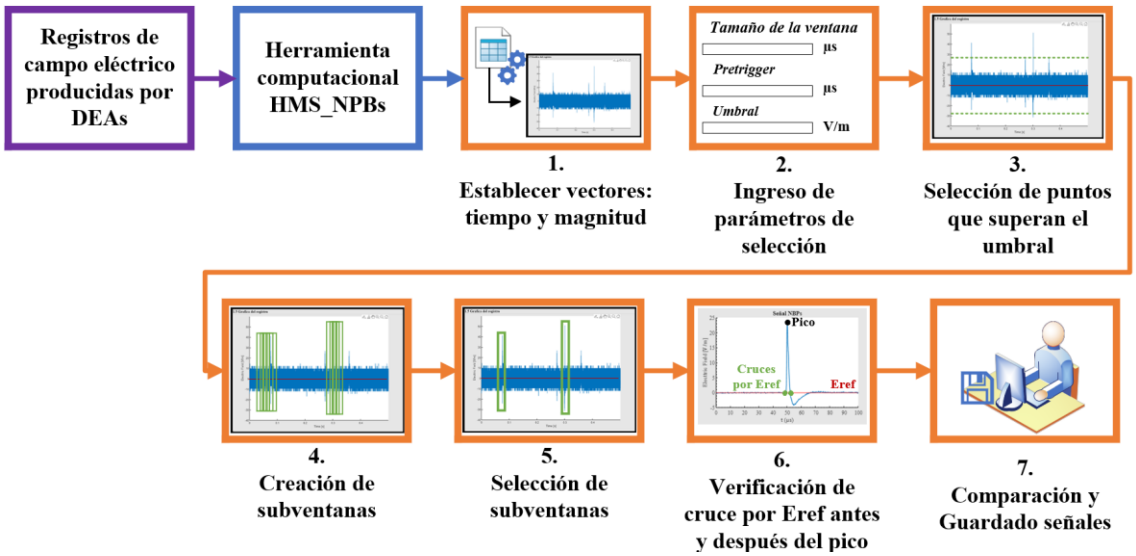


Figura 3-1 Flujograma selección señales de campo eléctrico que coinciden con las características de los NBPs
Fuente: autores

3.1. Módulo 1.1: Cargar archivo

Esté módulo permite cargar la señal capturada en el aplicativo y su apariencia se muestra en la figura 3-2. Para cargar el archivo, primero se debe seleccionar el formato de la barra desplegable, para lo cual puede estar en formato (*.mat), (*.csv) y (*.txt). Posteriormente, al presionar el botón ***Cargar*** inmediatamente aparecerá una ventana emergente solicitando al usuario seleccionar el archivo con el registro adquirido previamente (ver figura 3-3).



Figura 3-2 Visualización del módulo 1.1
Fuente: autores

Una vez seleccionado el archivo se debe oprimir el botón ***abrir***. En caso de que ocurra un error al cargar el archivo se mostrara una advertencia indicándole al usuario el tipo de error. Por ejemplo, para el caso asociado a la advertencia de la figura 3-4a el usuario no selecciono correctamente el archivo. Cuando esto ocurre deberá realizar nuevamente el procedimiento de carga mencionado anteriormente. Entre tanto, la advertencia de la figura 3-4b ocurre cuando se usan archivos *.mat, y

la herramienta no encuentra los vectores de tiempo (***t***) y magnitud del campo eléctrico (**x**) dentro el archivo cargado.

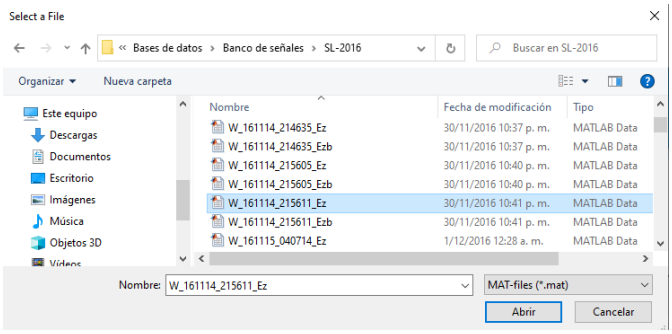


Figura 3-3 Selección del archivo de carga para el módulo 1.1
Fuente: autores

Por otra parte, Los vectores de tiempo y magnitud incluidos en archivos formato *.csv y *.txt tienen una estructura distinta a los del formato *.mat. Bajo esta situación, los datos se agrupan en una columna y están separados por comas. De esta manera, los primeros datos de cada fila corresponden al vector de tiempo y los que siguen al vector de magnitud (ver la figura 3-5). Si los archivos no tienen la disposición recién descrita la herramienta lanzará la advertencia que se muestra en la figura 3-4c.

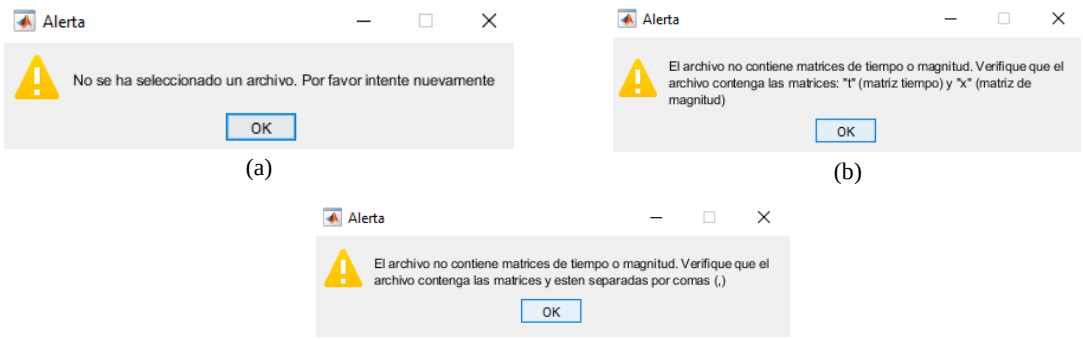
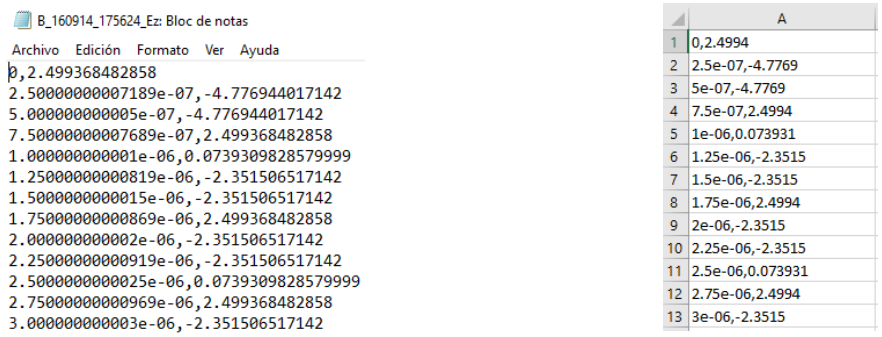


Figura 3-4 Advertencias de la herramienta al cargar un archivo. (a) No se seleccionó correctamente el archivo de la señal; (b) La herramienta no encuentra los vectores de tiempo y magnitud (para formato *.mat); (c) La herramienta no encuentra los vectores de tiempo y magnitud (para formatos *.txt y *.csv)
Fuente: autores

Ahora bien, para solucionar los errores de carga en los archivos *.mat el usuario deberá abrir el paquete de datos y verificar que los vectores se encuentren correctamente nombrados (ver la figura 3-6). Hay que tener en cuenta que para el funcionamiento los módulos 2 y 3 es necesario que se haya cargado previamente la señal en la herramienta. Mientras esto no ocurra, los botones de dichos módulos estarán inhabilitados hasta que se haya cargado el registro correctamente.



(a) (b)

Figura 3-5 Señal de campo eléctrico de eventos atmosféricos.
(a) archivo en formato *.txt; (b) archivo en formato *.csv
Fuente: autores

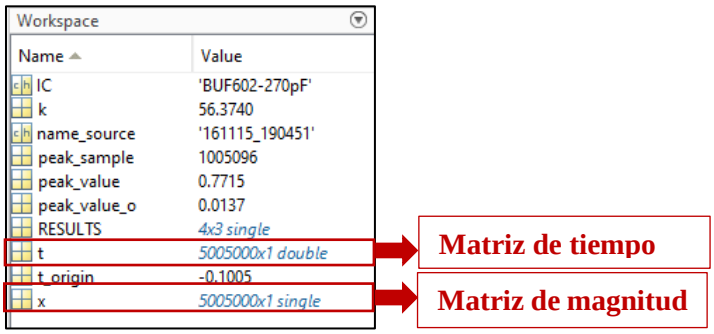


Figura 3-6 Workspace de un registro en formato *.mat que contiene las matrices de tiempo (t) y magnitud (x)
Fuente: autores

3.2. Módulo 1.2: Información de señal inicial

Al cargar el registro con el módulo 1.1, la herramienta lee y diligencia automáticamente los campos del módulo 1.2. Como se muestra en la figura 3-7 se pueden visualizar las siguientes características del registro:

- ***M muestras/s:*** número de muestras de la señal. La unidad es millones de muestras por segundo.
- ***Tiempo de muestreo***: intervalo de tiempo entre muestra y muestra.



Figura 3-7 Visualización del módulo 1.2
Fuente: autor

3.3. Módulo 1.3: Gráfica de la señal

Esté módulo se encarga de graficar la señal cargada con el módulo 1.1. Como se observa en la figura 3-8, si se acerca el puntero del mouse al borde superior derecho del módulo aparecerá un

menú con seis (6) opciones: *importar gráfica, cepillo, mano, aumentar/disminuir (zoom) y restaurar zoom.*

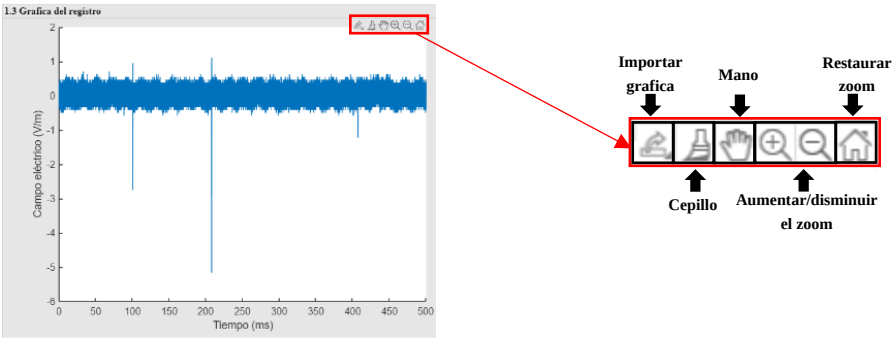


Figura 3-8 Visualización de módulo 1.3 y su menú superior.
Fuente: autores

La opción ***Importar gráfica*** tiene tres funciones principales ***Guardar como***, ***Copiar imagen*** y ***Copiar imagen como vector*** (Ver la figura 3-9). ***Guardar como*** permite almacenar el registro en tres formatos de imagen (*.png, *.jpg y *.tif) y en uno de documento impreso (*.pdf). ***Copiar imagen*** permite copiar la imagen. La opción ***Copiar imagen como vector*** cumple la misma función de ***Copiar imagen***, la diferencia es que la imagen copiada mantiene su calidad, incluso si se aumenta o disminuye sus dimensiones. Usando ***Copiar imagen como vector*** el tamaño del archivo aumenta.

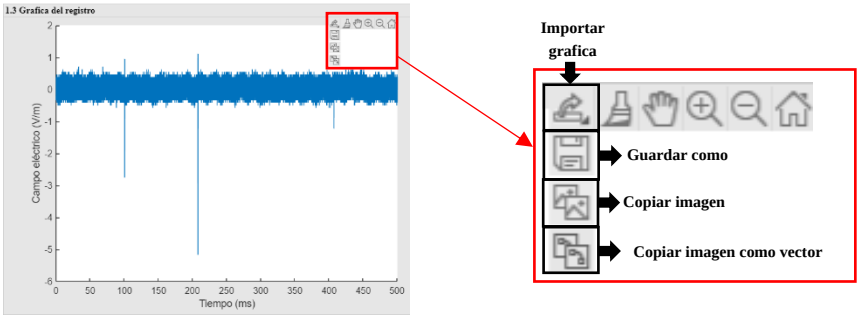


Figura 3-9 Visualización de la herramienta 'Importar grafica'
Fuente: autor

La ***herramienta Cepillo*** permite seleccionar una porción de la señal con de fin de indicar el rango de tiempo y magnitud en la que se encuentran los datos (ver la figura 3-10). Por su parte, la ***Herramienta mano*** sirve para desplazar la señal en cualquier dirección. Las opciones ***Aumentar/disminuir zoom*** amplía y disminuye la señal, y la opción ***restaurar zoom*** ajusta la señal a su versión inicial y se vea totalmente en la ventana gráfica.

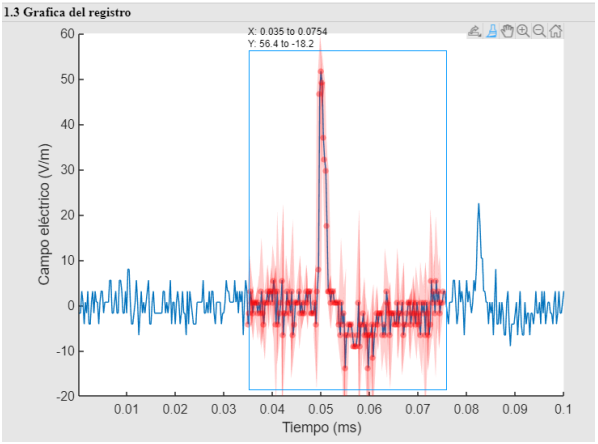


Figura 3-10 Visualización de la herramienta 'Cepillo'
Fuente: autores

3.4. Módulo 1.4: Selección semiautomática de eventos

El módulo 1.4. se encarga de ejecutar el algoritmo de identificación de eventos. Como se explicó en la introducción de este capítulo, se seleccionan aquellas porciones de la señal inicial (sub-ventanas) que cumplen con ciertas condiciones. En este módulo se encuentran los siguientes campos:

- ***Umbral:*** valor mínimo de magnitud con el cual el algoritmo filtra los datos del registro para su posterior análisis. En el caso de campo eléctrico la unidad será Voltios/metro (V/m).
- ***Tamaño de la ventana:*** duración en microsegundos (µs) de cada porción de señal (sub-ventana) seleccionada.
- ***Pretrigger de la ventana:*** tiempo en microsegundos (µs) previo al punto máximo contenido en la sub-ventana seleccionada.

Para ejecutar el algoritmo se deben diligenciar los anteriores parámetros y luego presionar el botón "***preseleccionar***". Para la identificación de NBPs, el valor del campo ***tamaño de la ventana*** deberá tener un mínimo de 50 µs, ya que un valor inferior podría omitir algunas señales. Como valores recomendados se sugieren un ***tamaño de ventana*** de 100 µs y un ***pretrigger de la ventana*** de 50 µs. Estos valores coinciden con las señales típicas presentadas en la tabla 3-1, características que facilitan la posterior comparación de señales. En la figura 3-11 se visualiza el módulo 1.4.

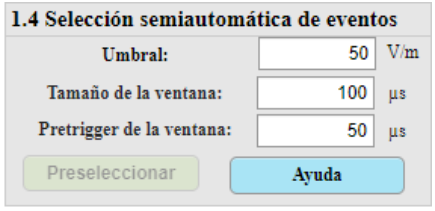


Figura 3-11 Visualización del módulo 1.4
Fuente: autores

En caso de identificar porciones de la señal con características de NBPs se abrirá una ventana emergente informando la cantidad de formas de onda encontradas por polaridad (ver figura 3-12a), de no ser así el mensaje de la ventana emergente indicará que no se hallaron NBPs y sugiere ingresar otro registro adquirido durante las mediciones (ver figura 3-12b).

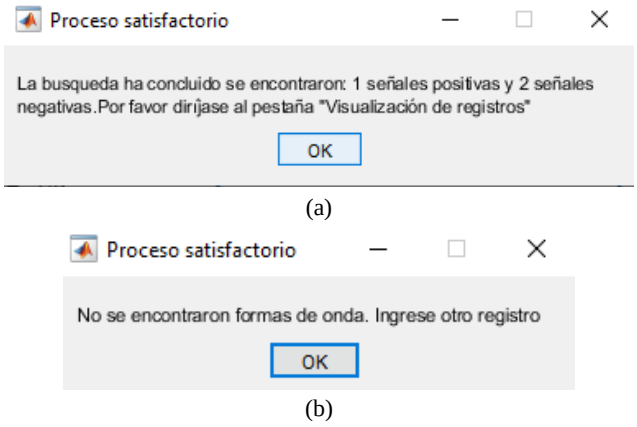


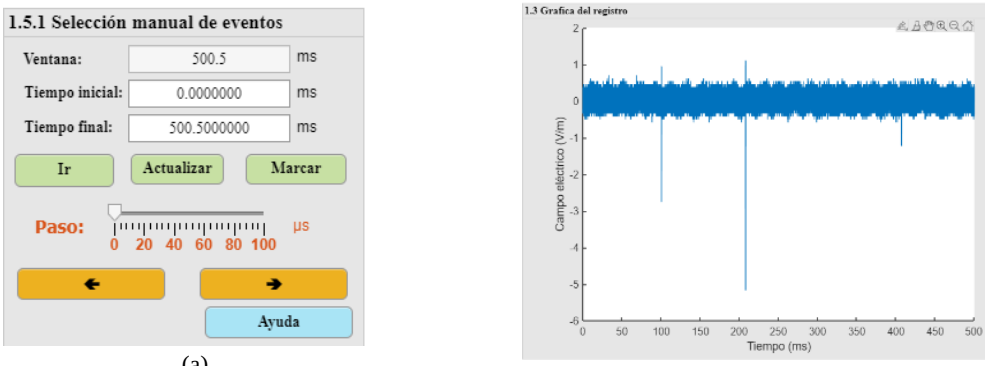
Figura 3-12 Ventana de advertencia sobre proceso satisfactorio. (a) En caso de haber encontrado eventos atmosféricos. (b) En caso de no haber encontrado eventos atmosféricos
Fuente: autores

3.5. Módulo 1.5.1: Selección manual de eventos

Esté módulo funciona junto con el módulo 1.3. De esta manera, se permite al usuario realizar una inspección visual a lo largo de la señal inicial (registro completo cargado con el módulo 1.1). El propósito de esta etapa es identificar las porciones de señal de campo eléctrico asociadas a eventos eléctricos atmosféricos. En la parte superior de este módulo se encuentran los siguientes campos:

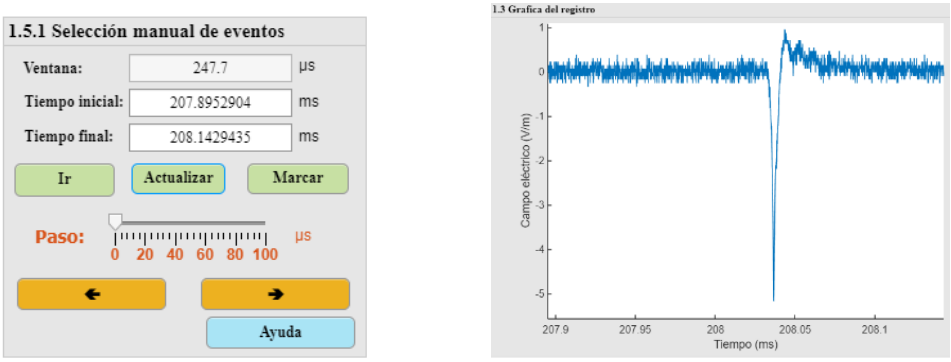
- ***Ventana:*** duración en milisegundos (ms) de la señal visualizada en el módulo 1.3.
- ***Tiempo inicial:*** tiempo en milisegundos (ms) donde se ubica el punto inicial de la señal inicial o la porción de señal.
- ***Tiempo final:*** tiempo en milisegundos (ms) donde se ubica el punto final de la señal inicial o la porción de señal.

Los anteriores campos son diligenciados automáticamente al momento de ingresar la señal por primera vez (ver la figura 3-13). Asimismo, si se desea observar una porción de la señal se deberán ingresar los límites en los campos ***Tiempo inicial*** y ***Tiempo final,*** luego presionar el botón ***"Ir"***. Esta misma tarea también se realiza usando el módulo 1.3. Sin embargo, los valores a ingresar en el módulo 1.5.1 se debe hacer manualmente, por lo que cada vez que se diligencien se debe presionar el botón ***"actualizar"*** (ver la figura 3-14).



(a) (b)

Figura 3-13 Visualización al cargar el archivo. (a) módulo 1.5.1; (b) módulo 1.3
Fuente: autores



(a) (b)

Figura 3-14 Visualización al realizar zoom a la gráfica. (a) módulo 1.5.1; (b) módulo 1.3
Fuente: autores

Si la gráfica con la señal inicial se encuentra ampliada, la herramienta permite su navegación utilizando los botones **"←"** y **"→"**, desplazando la gráfica hacia un punto determinado por la barra deslizable ***Paso.*** En caso tal que el registro contenga numerosas secciones o porciones de interés (posibles eventos de NBPs), el botón **"Marcar"** se encarga de señalar con un punto rojo dichas secciones del registro, indicando que estas zonas ya han sido examinadas (ver figura 3-15).

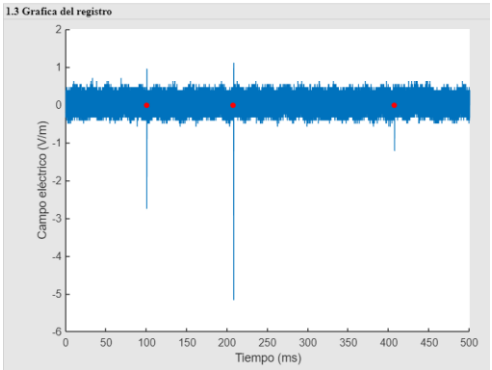


Figura 3-15 Visualización del módulo 1.3 luego de presionar la opción marcar en diferentes secciones
Fuente: autores

3.6. Módulo 1.5.2: Guardar archivo

Esté módulo permite guardar un segmento del registro inicial ingresado en el módulo 1.1. Este nuevo registro iniciará con el valor ***Tiempo inicial*** y finalizará con el ***Tiempo final***, ambos correspondientes al módulo 1.3. En la figura 3-16 se observa este módulo.



Figura 3-16 Visualización del módulo 1.5.2
Fuente: autores

Para guardar el archivo se debe diligenciar el nombre y seleccionar el tipo de formato. Una vez incluida la información el usuario deberá oprimir le botón ***Guardar.*** Posteriormente aparecerá una ventana emergente donde se deberá seleccionar la carpeta donde desea guardar el archivo (ver figura 3-17). Al finalizar el proceso aparecerá una ventana emergente informando que el archivo se guardó correctamente (ver figura 3-18).

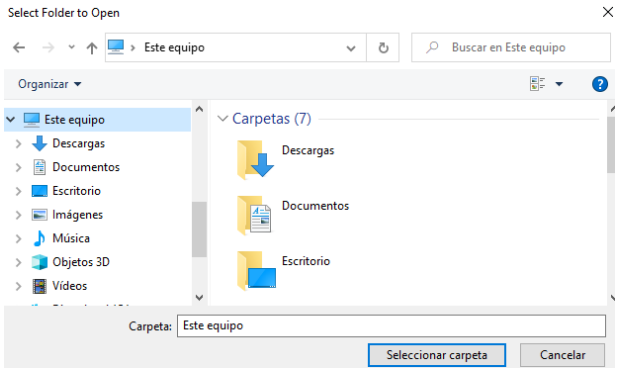


Figura 3-17 Selección de carpeta donde se guardará el archivo
Fuente: autores

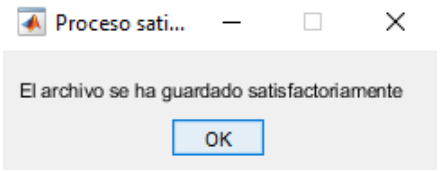


Figura 3-18 Mensaje del proceso de guardado realizado correctamente
Fuente: autores

4. SECCIÓN 2: VISUALIZACIÓN DE REGISTROS

Esta sección permite la comparación entre las porciones de señal (con potenciales NBPs) identificadas en la sección 1 y las formas de ondas típicas asociadas a NBPs. De esta forma, el usuario podrá seleccionar y guardar los registros de NBPs válidos. Para esto, la sección 2 incluye cinco (5) módulos que serán descritos a continuación.

4.1. Módulo 2.1: Número de señales capturadas

Este módulo presentado en la figura 4-1 incluye el número de señales encontradas por el algoritmo de identificación de señales de NBPs ejecutado en la ***Sección 1***. El módulo cuenta con los siguientes campos:

- ***Polaridad positiva:*** indica el número de señales de polaridad positiva identificadas.
- ***Polaridad negativa:*** indica el número de señales de polaridad negativa identificadas.
- ***Total:*** indica el número de señales de ambas polaridades obtenidas por el algoritmo.

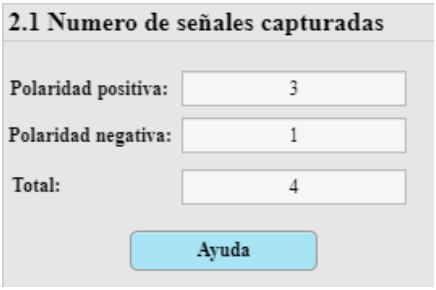


Figura 4-1 Visualización del módulo 2.1
Fuente: autores

4.2. Módulo 2.2: Desplazamiento de registros

Las señales encontradas durante la identificación de eventos son almacenadas y enumeradas por orden de tiempo. Inicialmente, la primera señal se graficará en el módulo 2.4 y se presentará su información en el módulo 2.5. En caso de tener más de un registro identificado, este se puede cambiar usando los botones "←", **"→"** o la barra desplazable de ***Registro***. Adicionalmente, el botón **"►"** permite cambiar de manera automática cada señal preliminar con un intervalo de tiempo establecido por la barra deslizable "***velocidad de reproducción".*** Esta función es de mucha utilidad si hay un gran número de registros seleccionados, evitando click repetitivos. En la figura 4-2 se observa un ejemplo del cambio de registro y su visualización en los módulos 2.2 y 2.4.

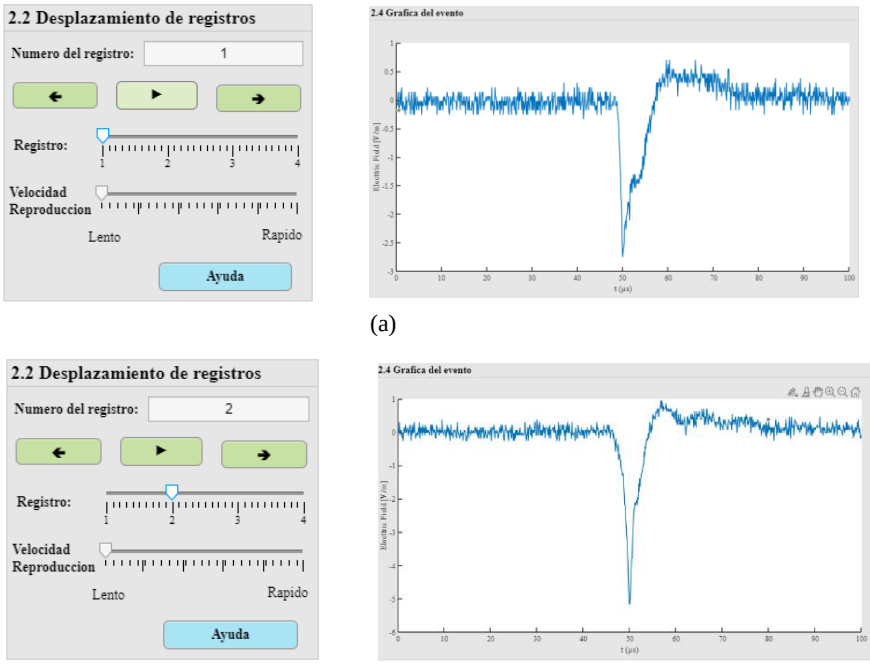


Figura 4-2 Visualización cambio de registro en el módulos 2.2 y 2.4. (a) primer registro; (b) segundo registro
Fuente: autores

4.3. Módulo 2.3: Guardar archivo

Como ya se ha mencionado, es importante tener en cuenta que para establecer si una señal corresponde a un NBP el usuario deberá comparar la forma de onda con las señales típicas incluidas en la tabla 3-1. Una vez establecido que la porción de señal bajo estudio es un registro de NBP se puede guardar usando el módulo 2.3 que se muestra en la figura 4-3. Esto se logra diligenciando el nombre el archivo y el tipo de formato (*.mat, *.csv o *.txt). Una vez diligenciada esta información se deberá oprimir le botón ***Guardar*** y aparecerá una ventana emergente donde se puede seleccionar la carpeta de destino. Finalmente, aparecerá una ventana indicando que el archivo se guardó correctamente. se observa el módulo 2.3.

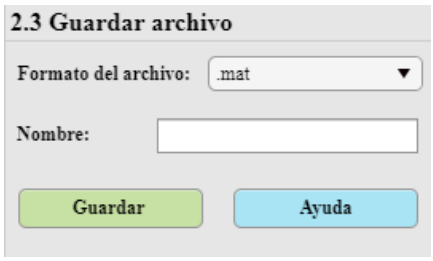


Figura 4-3 Visualización del módulo 2.3
Fuente: autores

4.4. Módulo 2.4: Gráfica del evento NBP

Este módulo se encarga de mostrar las señales halladas por el algoritmo de identificación de eventos. Para cambiar o pasar a otro registro de NBP se utilizará el módulo 2.2 (ver apartado 4.2). Adicionalmente, la funcionalidad del menú ubicado en la esquina superior derecha de la gráfica es similar a la descrita en el módulo 1.3. En la figura 4-4 se presenta este módulo.

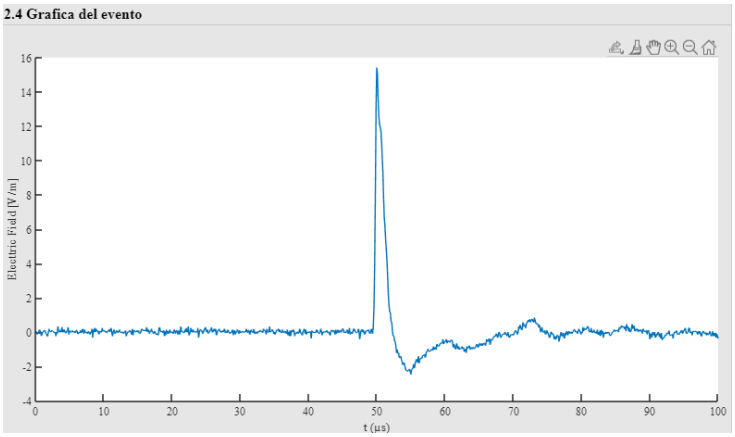


Figura 4-4 Visualización del módulo 2.4
Fuente: autores

4.5. Módulo 2.5: Información del registro

Este módulo se encarga de mostrar la información de la forma de onda visualizada en el módulo 2.4 y cuenta con los siguientes campos:

- ***Archivo de origen:*** nombre del registro (forma de onda) extraído de la señal inicial y seleccionado por el algoritmo.
- ***Tiempo de inicio:*** punto donde inicia el registro analizado dado en milisegundos (ms).
- ***Tiempo final:*** punto donde termina el registro analizado dado en milisegundos (ms).

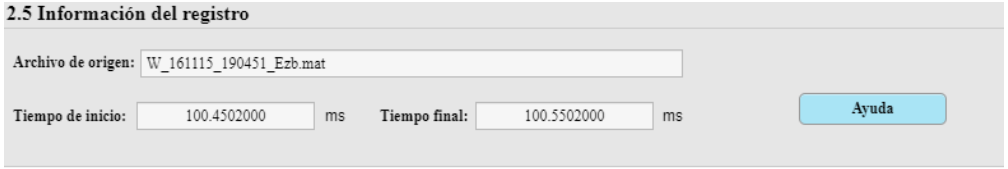


Figura 4-5 Visualización del módulo 2.5
Fuente: autores

5. SECCIÓN 3: CARACTERIZACIÓN DE NBP

Para la caracterización de las señales de campo eléctrico asociado a los NBPs es necesario, en primera instancia, identificar sus ***puntos característicos*** los cuales se identifican con una letra y son definidos en la tabla 5-1. Estos puntos coinciden con las formas de onda típicas incluidas en la tabla 3-1.

Tabla 5-1 Descripción de los puntos característicos para estimar los parámetros (tiempo y magnitud) de las señales de campo eléctrico generado por NBPs

Punto	Descripción
A	Punto de inicio del evento. La señal tiende a desviarse del nivel de referencia (Eref)
B	Punto en el cual alcanza el 10% de su pico máximo (positivo o negativo)
C	Punto donde la señal cambia abruptamente de pendiente
D	Punto en el cual alcanza el 50% de su pico máximo (positivo o negativo)
E	Punto en el cual alcanza el 90% de su pico máximo (positivo o negativo)
F	Punto en el cual alcanza su valor máximo (positivo o negativo)
G	Punto en alcanzar el 50% después del valor máximo (positivo o negativo)
H	Punto en el cual alcanza el valor de la referencia por primera vez.
I	Punto en el cual alcanza el valor máximo (positivo o negativo) de polaridad opuesta al punto F
J	Punto en el cual la señal finalmente regresa al nivel de referencia (Eref)

Fuente: autores

A partir de estos puntos característicos se pueden calcular los parámetros de tiempo y magnitud de las señales NBPs. En la tabla 5-2 se muestra la formula y la descripción de cada parámetro cuya estimación se incluyó en el software HMS_NPBs.

Tabla 5-2 Parámetros temporales y de magnitud de la forma de onda de campo eléctrico de NBPs

Parámetro		Formula	Descripción
TEMPORALES	Tiempo de ascenso de 0 a 100%	$t_{r(0-100)} = t_F - t_A$	Lapso que recorre la forma de onda desde el punto de deflexión inicial (**A**) hasta alcanzar su valor máximo (**F**)
	Tiempo de ascenso de 10 a 90 %	$t_{r(10-90)} = t_E - t_B$	Lapso que recorre la forma de onda para ir desde 10% (**B**) hasta 90% (**E**) del valor máximo de la señal (**F**)
	Tiempo de cruce por cero	$t_z = t_H - t_A$	Lapso que recorre la forma de onda desde el punto inicio de la señal (**A**) hasta el primer cruce con el nivel de referencia (**H**)
	Tiempo a la mitad del máximo pico	$FWMH = t_G - t_D$	Lapso de la primera cresta en que se cubre el primer y segundo punto en el que alcanza el 50% del pico inicial (**D** y **G**).
	Duración del frente de ascenso lento	$t_S = t_C - t_A$	Duración de la señal que va desde el punto de deflexión inicial (**A)** hasta donde cambia abruptamente de pendiente (**C**)
	Duración del frente de ascenso rápido	t_{Fr}=$t_F - t_C$	Lapso que va desde el momento que finaliza el frente lento (**C**) hasta alcanzar su valor máximo (**F**)
	Duración del pulso	$t_p = t_J - t_A$	Lapso que recorre la forma de onda desde el punto de deflexión inicial (**A**) hasta su punto final (**J**)

Continuación Tabla 5-2

MAGNITUD	Magnitud del pico	$E_P = \lvert E_F - E_{\text{ref}} \rvert$	Magnitud del pico inicial (positivo o negativo). Se mide con respecto al nivel de referencia (**Eref**)
	Magnitud del pico normalizado a 100 km	$E_{P(100\ km)} = \lvert E_F - E_{ref} \rvert * \frac{R}{100}$ **R** es la distancia desde el sistema de medición (km)	Magnitud del pico inicial (positivo o negativo), ajustado por la distancia. Se mide con respecto al nivel de referencia (**Eref**)
	Magnitud del pico opuesto	$E_{os} = \lvert E_I - E_{ref} \rvert$	Magnitud (positivo o negativo) del pico de polaridad opuesta posterior al primer cruce por cero. Se mide con respecto al nivel de referencia (**Eref**)
	Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico	$E_{os}/E_P = \lvert E_F / E_I \rvert$	Relación entre la magnitud del pico inicial (**F**) y el pico de polaridad inversa (**I**).

Fuente: autores

A partir de información presentada en las tablas 5-1 y 5-2, se desarrolló un segundo algoritmo para caracterizar las señales de campo eléctrico producidas por NBPs. En la figura 5-1 se observa el flujograma del algoritmo. Este inicialmente reconoce los vectores de tiempo y magnitud, luego asigna el nivel de referencia (Eref) de la señal bajo estudio, encuentra los puntos de mayor y menor magnitud (F y I), y establece la polaridad. En seguida, determina el punto inicial y final de la señal (A y J), el punto de cruce por cero (H), los primeros puntos en alcanzar el 10% (B), 50% (D) y 90% (E) de su pico máximo, y el segundo punto en alcanzar el 50% después del pico máximo (G). Posteriormente, el algoritmo estima la derivada del campo eléctrico y encuentra el punto de mayor pendiente (C) en el inicio de la señal. Finalmente, se calculan los parámetros y se guardaran en una base de datos. El procedimiento para la ejecución de estos procesos se explicará en este capítulo (sección 3).

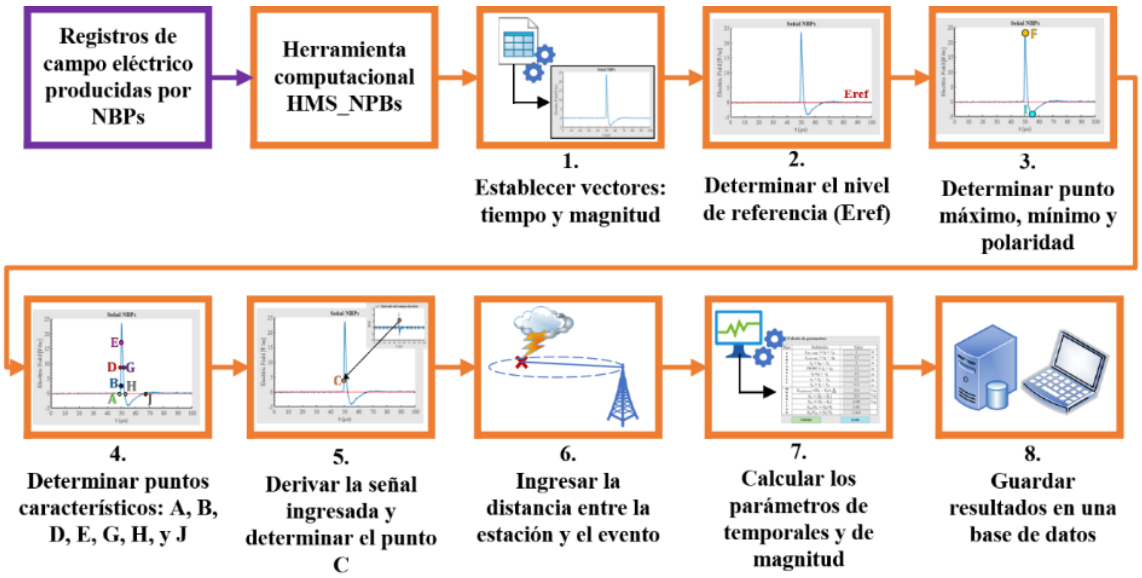


Figura 5-1 Flujograma de la caracterización de señales de campo eléctrico de NBPs
Fuente: autor

5.1. Módulo 3.1: Grafica de la señal/registro de NBP

Este módulo, cuya estructura se muestra en la figura 5-2, permite graficar la señal de NBP y trabaja a la vez con el módulo 3.2. En la sección izquierda se encuentra un conjunto de botones y campos utilizados para seleccionar los puntos característicos de la señal de NBP. Esta sección interactúa posteriormente con el módulo 3.6, por lo que en ese punto se explicará su funcionamiento.

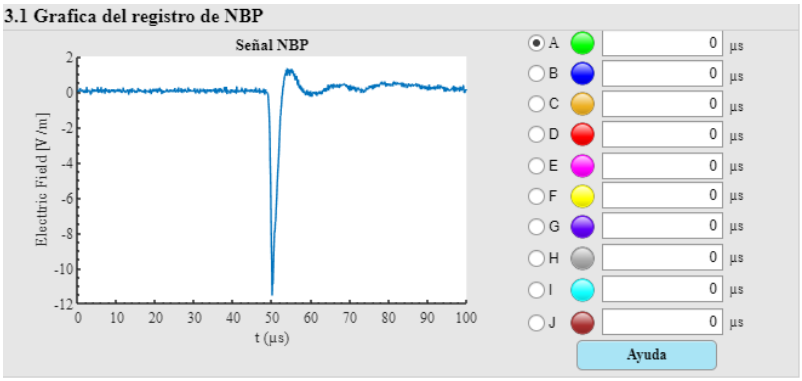


Figura 5-2 Visualización del módulo 3.1
Fuente: autores

5.2. Módulo 3.2: Cargar registro

Esté módulo permite cargar el registro de campo eléctrico de NBP en el aplicativo, los archivos ingresados pueden tener formatos (*.mat), (*.csv) o (*.txt). Hay que tener en cuenta que para el funcionamiento los demás módulos, es necesario cargar la señal en esta sección. Mientras esto no ocurra los botones restantes estarán inhabilitados. En la figura 5-3 se observa el módulo 3.2.



Figura 5-3 Visualización del módulo 3.2
Fuente: autores

Para cargar el archivo se debe seleccionar el formato de la barra desplegable y luego presionar el botón ***Cargar***, inmediatamente aparecerá una ventana emergente pidiendo al usuario seleccionar el archivo con la señal de NBP. Luego se debe oprimir el botón ***abrir***. Esté módulo maneja las mismas advertencias y condiciones mencionadas en el módulo 1.1.

5.3. Módulo 3.3: Información del registro

Permite observar algunas características de la señal cargada**.** Los campos que componen este módulo se muestran en la figura 5-4 y son:

- ***Nombre del archivo:*** Nombre del archivo ingresado.
- ***Tiempo de muestreo:*** intervalo de tiempo entre muestra y muestra, generalmente en nanosegundos (ns).
- ***Polaridad:*** *P*olaridad del NBPs según la convención de ***signos atmosféricos*** (descrito en el capítulo 3).
- ***Distancia:*** distancia en kilómetros (km) entre la estación de medición y el lugar de la ocurrencia del NBP. En caso tal que este dato no esté disponible se debe activar la casilla ***Desconocido.***



Figura 5-4 Visualización del módulo 3.3
Fuente: autores

5.4. Módulo 3.4: Asignación de características del registro

El nivel de referencia (Eref) es el valor de la componente DC de la señal. Este nivel de offset es responsable de desplazar la señal verticalmente. En la figura 5-5 se observa el módulo y sus componentes.

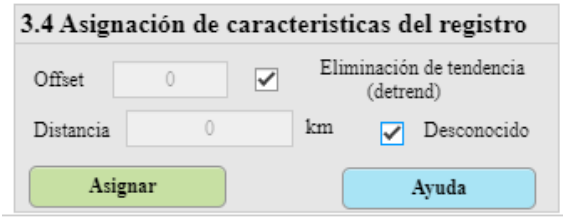


Figura 5-5 Visualización del módulo 3.4
Fuente: autores

En este caso, el usuario podrá ingresar el nivel de referencia en el campo ***"Eref"***, o seleccionar la opción "***eliminación de tendencia***", opción que permite calcular el offset usando el método de mínimos cuadrados. Al presionar el botón ***Asignar*** se mostrará en la gráfica de la señal una línea roja que representa el nivel referencia (ver la figura 5-6).

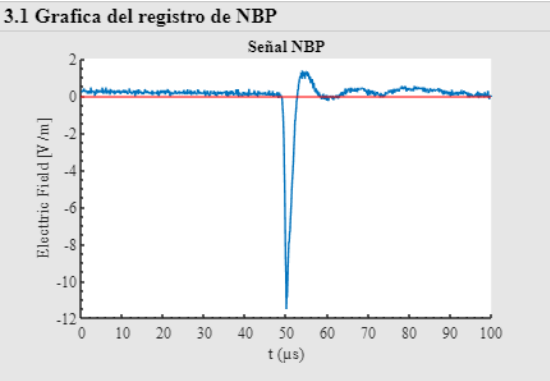


Figura 5-6 PNBP con el nivel de referencia
Fuente: autores

5.5. Módulo 3.5: Selección del tipo de NBP

Como se mencionó en el capítulo 3, las señales de campo eléctrico de NBPs se clasifican por tipo con ayuda de números (del 1 al 11). De esta manera, luego de una inspección visual y una comparación con las formas de onda de la tabla 3-1, este módulo permite ingresar a la herramienta computacional el tipo de NBP, tal y como se muestra en la figura 5-7. Cabe indicar que la selección del tipo de pulso NBP no influye en la ejecución del algoritmo de caracterización, simplemente es un dato adicional incluido por el usuario el cual será anexado en la base de datos.

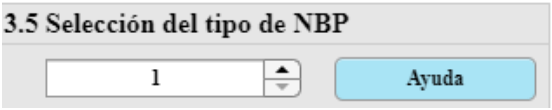


Figura 5-7 Visualización del módulo 3.5
Fuente: autores

5.6. Módulo 3.6: Selección de puntos

Este módulo se encarga de hallar los puntos característicos de las formas de onda de los NBPs teniendo en cuenta las definiciones incluidas en la tabla 5-1. En la figura 5-8 se observa el módulo y su composición. Al presionar el botón "Encontrar puntos" se ejecuta el algoritmo de caracterización localizando todos los puntos (desde A hasta J) y mostrando su posición en la gráfica del módulo 3.1. Como se puede observar en la figura 5-9, cada punto tiene un color característico. Esto facilita su identificación en la zona izquierda del módulo.

En caso de que se requiera cambiar la posición de algún punto característico (debido, por ejemplo, a un error de estimación), el usuario puede activar la casilla que se encuentra al lado derecho de la etiqueta ***"Opción 2: manual"*** y seleccionar el punto que considere en la gráfica (vista en el módulo 3.1) usando de los botones que se encuentran al lado izquierdo. Luego de esta acción, aparecerá un punto negro sobre la gráfica y una línea vertical punteada que representa la nueva posición.

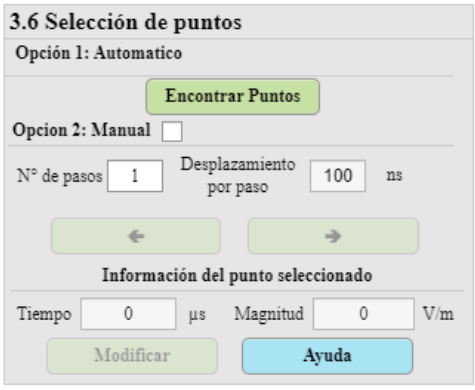


Figura 5-8 Visualización del módulo 3.6
Fuente: autores

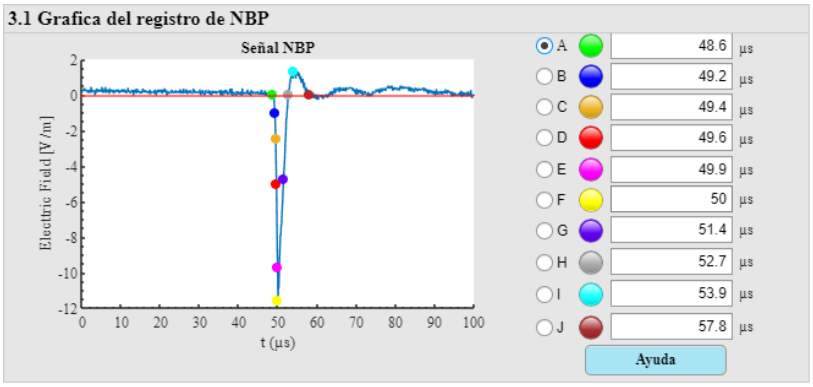


Figura 5-9 Módulo 3.1 luego de presionar el botón "Encontrar puntos" del módulo 3.6
Fuente: autores

Este nuevo punto puede ser movido hacia su nueva posición presionando los botones "←", "→" del módulo 3.6. Estos botones desplazan el punto en pasos que equivalen al tiempo de muestreo de la señal o a un número entero de pasos los cuales deben ser ingresados en el campo "**N° de pasos**". Una vez posicionado el nuevo punto se deberá presionar el botón **"Modificar"**. En la figura 5-10 se observa un ejemplo en el que se modifica de posición el punto A.

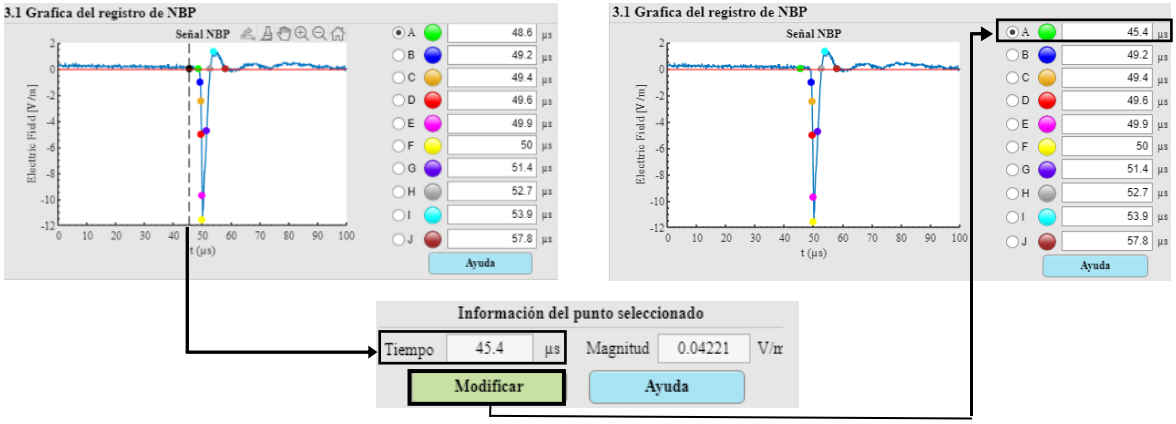


Figura 5-10 Modificación de punto A a un PNBP
Fuente: autores

5.7. Módulo 3.7: Selección del punto C

El módulo 3.7 permite verificar la correcta identificación del punto C, el cual se definió como el lugar donde la señal cambia abruptamente de pendiente. Este punto se encuentra entre el inicio de la señal (punto A) y el 50% de su pico máximo (punto D). Para determinarlo se requiere estimar la derivada de la señal y hallar la zona con mayor o menor valor dependiendo de la polaridad inicial del NBP (máxima para polaridad negativa y mínima para el positiva). Al momento de encontrar los puntos característicos de la forma de onda de manera automática se graficará la derivada de la señal en el módulo 3.7 que se muestra en la figura 5-11.

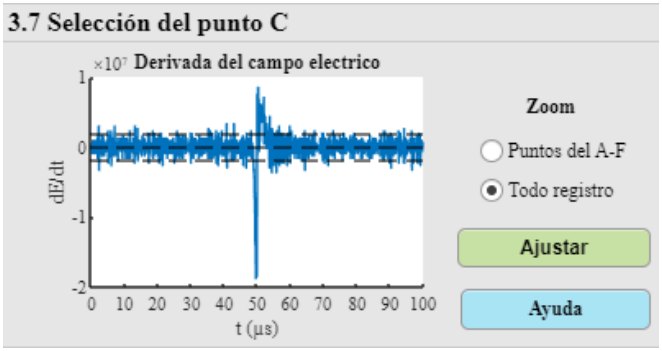
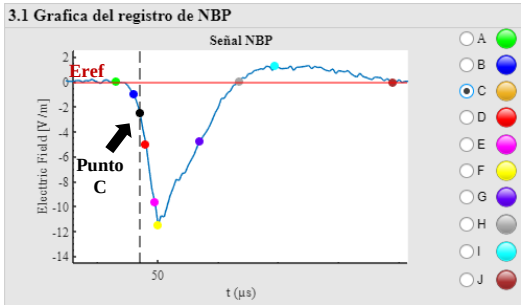
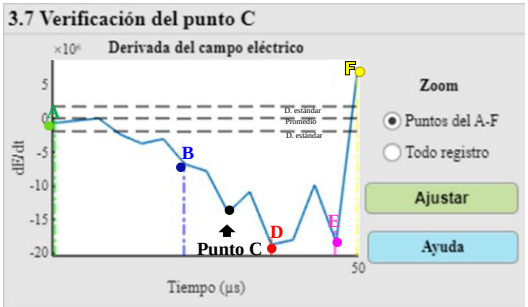


Figura 5-11 Visualización del módulo 3.7
Fuente: autores

El botón "Ajustar" del módulo 3.7 permite ajustar el tamaño de la gráfica según la opción deseada (entre los puntos del A-F o todo el registro). Adicionalmente, la gráfica contiene tres líneas horizontales punteadas que representan el valor promedio en magnitud de la señal y su desviación estándar. A diferencia de los otros puntos, al modificar el punto C aparecerá en la gráfica de la derivada un punto negro que representa la nueva ubicación. Al presionar los botones "←", "→" estos se desplazarán simultáneamente. En las figuras 5-12 y 5-13 se ilustra la ubicación del punto C para PNBPs y NNBPs, respectivamente.

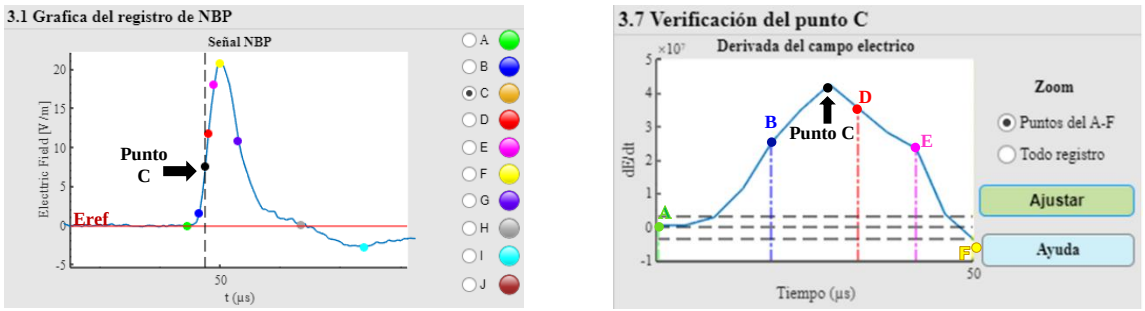


(a)



(b)

Figura 5-12 Registros asociados a un PNBP. (a) señal de campo eléctrico; (b) derivada del campo eléctrico
Fuente: autores

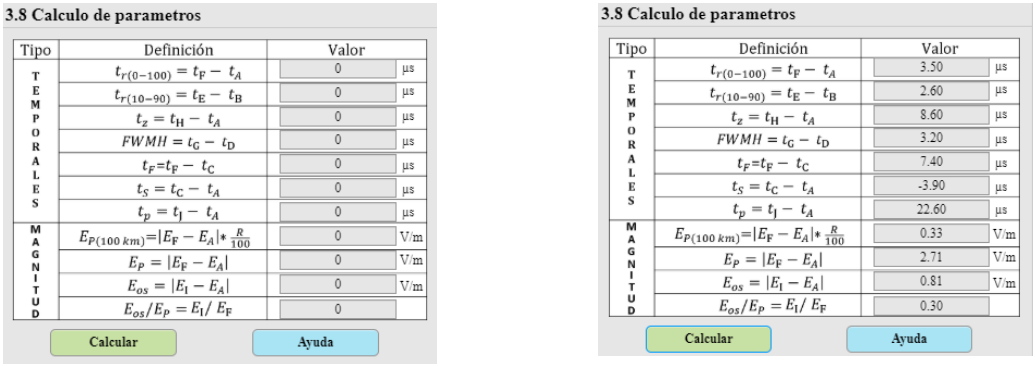


a) *b)*

Figura 5-13 Registros asociados a un NNBP. (a) señal de campo eléctrico; (b) derivada del campo eléctrico
Fuente: autores

5.8. Módulo 3.8: Estimación de los parámetros

Este módulo muestra los parámetros temporales y de magnitud de las señales de campo eléctrico producido por NBPs. Estos parámetros fueron descritos en la tabla 6-2. Los resultados son obtenidos al presionar el botón "***calcular***" y serán almacenados posteriormente en la base de datos. Se debe tener en cuenta que para la ejecución de este módulo es necesario haber determinado previamente los ***puntos característicos.*** En la figura 5-14 se observa el módulo 3.8 antes y después del cálculo de parámetros.



(a) (b)

Figura 5-14 Visualización del módulo 3.8. (a) antes de calcular los parámetros; (b) después de calcular los parámetros
Fuente: autores

5.9. Módulo 3.9: Guardar datos

Este módulo permite guardar los parámetros obtenidos en el módulo 3.8 los cuales serán consignados en una hoja de cálculo tipo Excel (formatos *.xlsx, *.xlsm, *.xls o *.csv). En este archivo se pueden incluir los resultados de varios registros de NBPs analizados, los cuales se irán guardando fila a fila. En la figura 5-15 se puede observar este módulo. Adicionalmente, para facilitar el cálculo de diversas medidas estadísticas para los parámetros estimados en las formas de onda de NBPs, se incluyó una plantilla llamada "BD_NBPs".



Figura 5-15 Visualización del módulo 3.9
Fuente: autores

Esta hoja de cálculo está compuesta por dos hojas, "***Resultados"*** y "***Estadísticas"***. La hoja ***Resultados*** contiene el nombre, polaridad y parámetros de todas las señales analizadas por la herramienta computacional. Por su parte, la hoja ***Estadísticas*** muestra los cálculos estadísticos de los registros caracterizados en la primera hoja. Estas medidas serán la desviación estándar, la media aritmética, la media geométrica, el máximo y el mínimo. Los datos estarán agrupados según la polaridad: positiva, negativa o ambas polaridades.

Finalmente, al presionar el botón ***"guardar"*** se abrirá una ventana emergente solicitando al usuario que seleccione el archivo en donde se guardarán los datos (ver la figura 5-16) y luego se deberá presionar el botón **"abrir"**. Luego de algunos segundos aparecerá un mensaje anunciando que los datos fueron guardados correctamente.

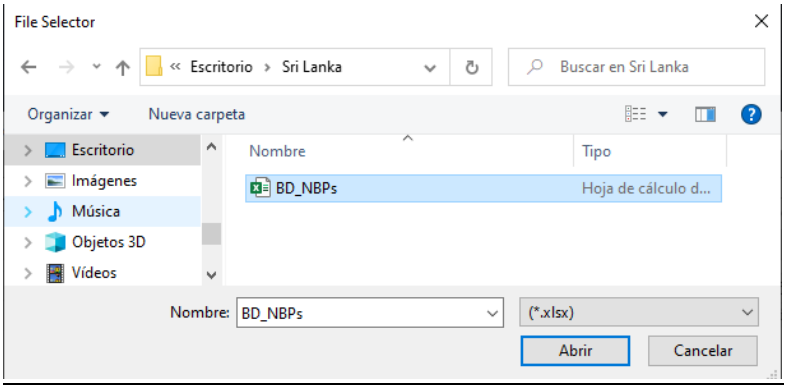


Figura 5-16 Selección de archivo módulo 3.9
Fuente: autores

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] N. A. . Ahmad, “broadband and HF radiation from cloud flashes and narrow bipolar pulses,” University of Uppsala, 2011.

[2] T. A. L. N. Gunasekara, M. Fernando, U. Sonnadara, and V. Cooray, “Characteristics of Narrow Bipolar Pulses observed from lightning in Sri Lanka,” J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys., vol. 138–139, pp. 66–73, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.jastp.2015.12.010.

[3] N. Azlinda Ahmad, M. Fernando, Z. A. Baharudin, V. Cooray, H. Ahmad, and Z. Abdul Malek, “Characteristics of narrow bipolar pulses observed in Malaysia,” J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys., vol. 72, no. 5–6, pp. 534–540, 2010, doi: 10.1016/j.jastp.2010.02.006.

[4] A. Nag, V. A. Rakov, D. Tsalikis, and J. A. Cramer, “On phenomenology of compact intracloud lightning discharges,” J. Geophys. Res., vol. 115, no. D14, p. D14115, Jul. 2010, doi: 10.1029/2009JD012957.

[5] F. Liu et al., “Optical emissions associated with narrow bipolar events from thunderstorm clouds penetrating into the stratosphere,” Nat. Commun., vol. 12, no. 1, p. 6631, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41467-021-26914-4.

[6] F. Liu et al., “Meteorological and Electrical Conditions of Two Mid-latitude Thunderstorms Producing Blue Discharges,” J. Geophys. Res. Atmos., vol. 126, no. 8, Apr. 2021, doi: 10.1029/2020JD033648.

[7] D. Li et al., “Blue Flashes as Counterparts to Narrow Bipolar Events: The Optical Signal of Shallow In-Cloud Discharges,” J. Geophys. Res. Atmos., vol. 126, no. 13, Jul. 2021, doi: 10.1029/2021JD035013.

[8] F. Liu et al., “Observations of Blue Discharges Associated With Negative Narrow Bipolar Events in Active Deep Convection,” Geophys. Res. Lett., vol. 45, no. 6, pp. 2842–2851, Mar. 2018, doi: 10.1002/2017GL076207.

[9] H. Zhang et al., “On the Terrestrial Gamma-Ray Flashes Preceding Narrow Bipolar Events,” Geophys. Res. Lett., vol. 48, no. 8, p. e2020GL092160, Apr. 2021, doi: 10.1029/2020GL092160.

[10] R. A. Marshall, C. L. da Silva, and V. P. Pasko, “Elve doublets and compact intracloud discharges,” Geophys. Res. Lett., vol. 42, no. 14, pp. 6112–6119, Jul. 2015, doi: 10.1002/2015GL064862.

[11] A. Santa-Acosta, L. M. Morales-Garcia, and H. E. Rojas-Cubides, “Practical Method to Evaluate the Effects of the Sensor and the Environment on the Measurement of Lightning-Generated Electric Field Signatures,” Eng. J., vol. 25, no. 8, pp. 137–152, Aug. 2021, doi: 10.4186/ej.2021.25.8.137

[12] MathWorks, “System Requirements - Release 2021a - Windows,” 2021. https://www.mathworks .com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/support/sysreq/files/system-requirements-release-2021a-windows.pdf.

[13] MathWorks, “System Requirements - Release 2021a - Linux,” 2021. https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/support/sysreq/files/system-requirements-release-2021a-linux.pdf.

[14] MathWorks, “System Requirements - Release 2021a - Mac,” 2021. https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/support/sysreq/files/system-requirements-release-2021a-macintosh.pdf.

[15] A. F. R. Leal, V. A. Rakov, and B. R. P. Rocha, “Compact intracloud discharges: New classification of field waveforms and identification by lightning locating systems,” Electr. Power Syst. Res., vol. 173, no. April, pp. 251–262, 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.04.016.

Anexo B: Tutorial de la Herramienta de Manipulación de Señales de NBPs (HMS_NPBS)



AUTORES:
Ing. SAMUEL LEANDRO JIMÉNEZ
Prof. Dr.-Ing. HERBERT ENRIQUE ROJAS

Universidad Distrital Francisco José de caldas
Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica
Grupo de investigación en Sistemas Eléctricos y Eficiencia Energética (GISE3)
2022

1. Identificación de señales radiadas por DEATs

1.1. Ingreso de los registros para el proceso de identificación

Para ingresar el registro al aplicativo con el fin de realizar el proceso de identificación se deben seguir los siguientes pasos:

1) Ir la sección “identificación de eventos”.
2) Seleccionar el formato del archivo con la barra desplegable del módulo 1.1.
3) Presionar el botón “cargar” del módulo 1.1. Inmediatamente aparecerá una ventana emergente solicitando el registro.
4) Seleccionar el registro en la ventana emergente.
5) Presionar el botón “abrir” de la ventana emergente.

En la figura B-1 se observa este procedimiento en el aplicativo.

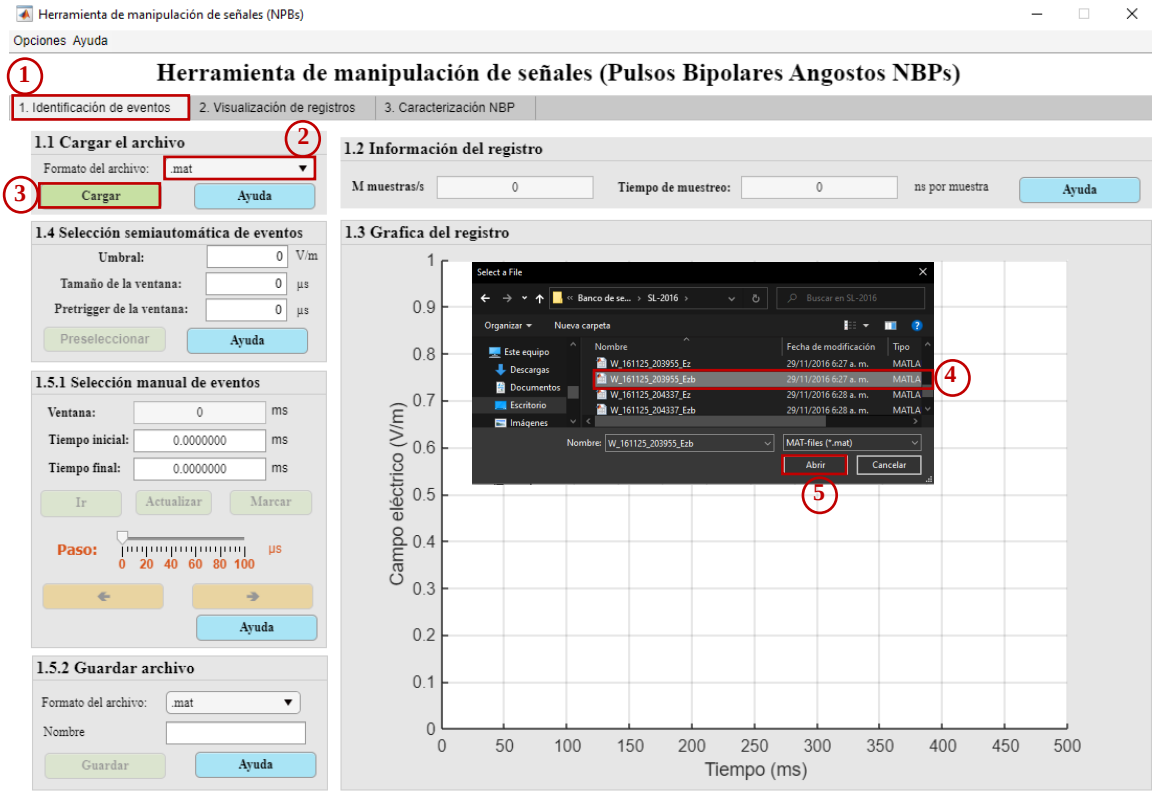


Figura B-1 Procedimiento para ingresar los registros al aplicativo con el fin de realizar el proceso de identificación
Fuente: autores

1.2. Selección de señales semiautomática

Para realizar el proceso de identificación de señales de forma semiautomática, se deben seguir los siguientes pasos:

1) Diligenciar los campos del módulo 1.4: Umbral, Tamaño de la ventana y pretrigger de la ventana.
2) Presionar el botón “Preseleccionar”. Inmediatamente aparecerá una ventana emergente indicando el número de señales encontradas según la polaridad.
3) Presionar el botón “ok” en la ventana emergente para continuar.

En la figura B-2 se observa la realización de estos tres primeros en el aplicativo.

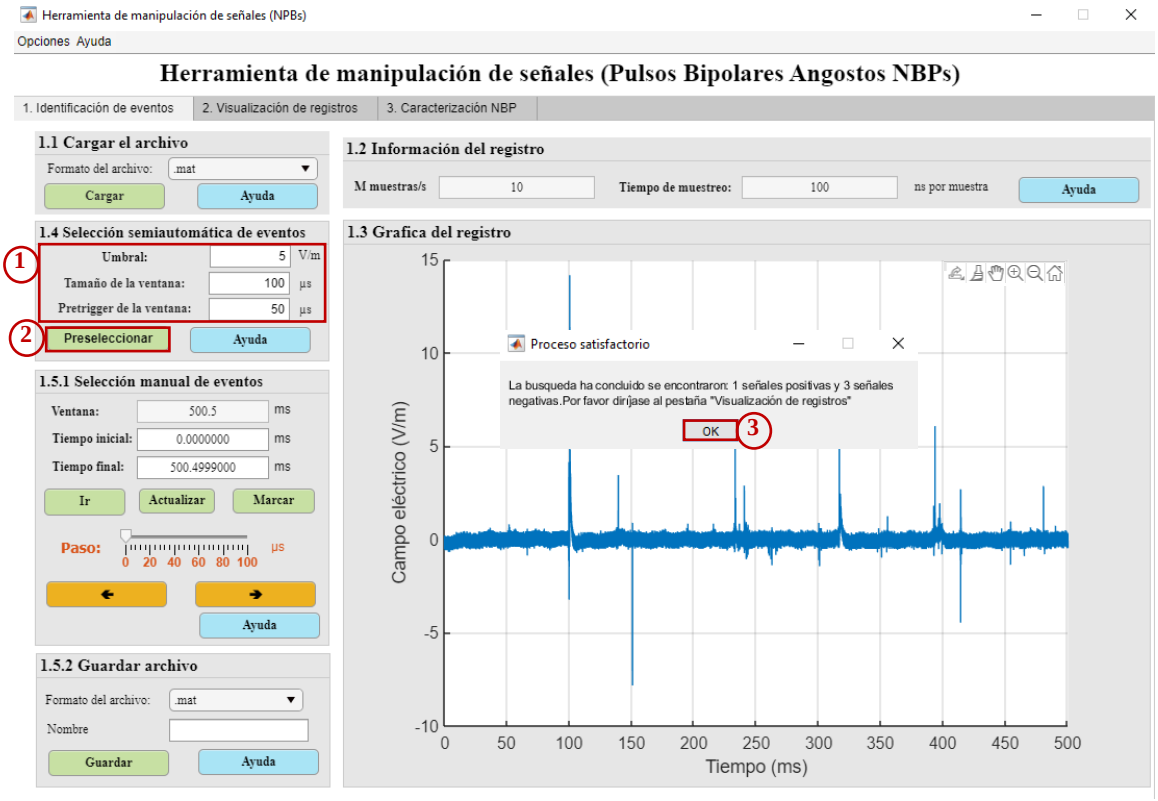


Figura B-2 Procedimiento para la selección de señales
Fuente: autores

4) Ir a la sección de “Visualización de registros” presionando la pestaña del mismo nombre en la barra de navegación para observar las señales seleccionadas por el aplicativo.
5) Presionar los botones “←” “→”del módulo 2.2 para cambiar la señal visualizada en el módulo 1.3. Por otro lado, si se presiona el botón “►” del módulo 2.2 se cambiará las señales automáticamente a una tasa de tiempo determinada por la barra deslizable “velocidad de reproducción” del mismo módulo. En esta etapa se determina sí las señales recopiladas van a ser guardadas o descartadas, si se encuentra señales de interés se debe seguir los pasos posteriores para ser guardadas, en caso contrario se debe ingresar otro registro y realizar los pasos del 1 al 5 nuevamente.
6) Seleccionar el formato del registro que se desea guardar con la barra desplegable del módulo 2.3. Cabe mencionar que el registro guardado será el visualizado en el módulo 1.3.
7) Diligenciar el nombre del nuevo registro en el campo “nombre” del módulo 2.3

8) Presionar el botón “Guardar”. Inmediatamente, aparecerá una ventana emergente solicitando la carpeta donde se guardará la señal.
9) Seleccionar la carpeta donde se guardará la señal en la ventana emergente.
10) Presionar el botón “seleccionar carpeta” de la ventana emergente. Pocos segundos después aparecerá una ventana informativa indicando que la señal se guardó correctamente.
11) Presionar el botón “ok” en la ventana informativa.

En la figura B-4 se observa este procedimiento en el aplicativo y en la figura B-5 la ventana que aparece al finalizar el proceso de guardado.

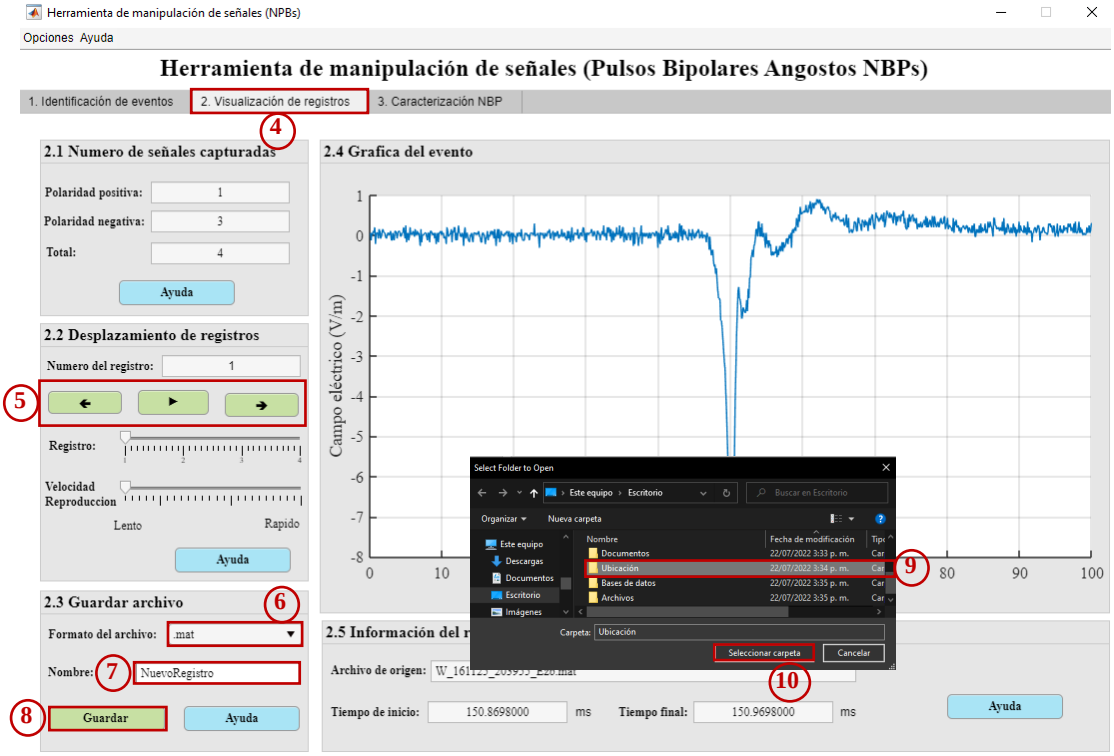


Figura B-4 Procedimiento para visualizar las señales seleccionadas y guardarlas
Fuente: autores

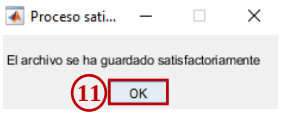


Figura B-5 ventana informativa que indica que el archivo fue guardado correctamente
Fuente: autores

2. Selección manual de DEATs

Para realizar el proceso de identificación de señales de forma manual, se deben seguir los siguientes pasos:

1) Seleccionar la herramienta lupa con el signo de más (+) del módulo 1.3.

2) Ampliar la señal en la sección de interés, al mover el mouse manteniendo presionado el clic izquierdo se dibujará un recuadro azul, este recuadro serán los nuevos límites de la señal visualizada en la gráfica del módulo 1.3.
3) Presionar el botón “actualizar” del módulo 1.5.1, esto permite observar el tamaño de la ventana de la porción de señal ampliada vista en la gráfica del módulo 1.3, en el campo “ventana” del módulo 1.5.1. En caso de que se requiera ampliar nuevamente se debe repetir los pasos 1 y 2, o caso contrario en el que la señal este demasiado ampliada se puede reducir al seleccionar la herramienta lupa con signo menos (-), luego hacer clic sobre la gráfica y presionar nuevamente el botón “actualizar”.
4) Presionar el botón “marcar”, esto permite imprimir un punto rojo en el centro de la sección de la señal ampliada, con la finalidad de identificar posteriormente las zonas que han sido examinadas.
5) Centrar la señal de interés, esto se realiza para poder evaluar si la señal se asemeja al evento en estudio, este paso se puede realizar de dos formas:
   a) Primer método (herramienta mano del módulo 1.3)
      5.1) Seleccionar la herramienta mano del módulo 1.3
      5.2) Ubicarse dentro de la gráfica del módulo 1.3 y mover el mouse en la dirección deseada manteniendo simultáneamente oprimido el clic izquierdo, hasta centrar la señal.
      5.3) Presionar el botón “actualizar” del módulo 1.5.1
   b) Segundo método (botones flechas y la barra desplegable paso del módulo 1.5.1)
      5.1) Seleccionar el tiempo de desplazamiento en la barra deslizable “paso” del módulo 1.5.1.
      5.2) Presionar los botones “←” “→”del módulo 1.5.1 para desplazar la señal hasta centrarla.

   Si usuario considera que la señal vista en el módulo 1.3 coincide con las características del evento en estudio debe seguir los siguientes pasos para guardar el registro, en caso contrario debe presionar la opción “restaurar zoom” del módulo 1.3 para seguir examinando las otras secciones de interés.
6) Hacer clic al punto de mayor magnitud de la porción señal vista para observar su posición en tiempo y magnitud, esta información es necesaria para realizar el paso 7.
7) Ajustar el tamaño de la ventana y su tiempo previo al punto máximo, diligenciando el posición inicial y final en el eje temporal con los campos “Tiempo inicial” y “Tiempo final” en el módulo 1.5.1. Estos valores serán definidos por el usuario según sus requerimientos.
8) Presionar el botón “Ir” del módulo 1.5.1.
9) Seleccionar el formato del archivo en el que se desea guardar el registro en el módulo 1.5.2.
10) Diligenciar el nombre del nuevo registro en el campo “nombre” del módulo 1.5.2.
11) Presionar el botón “Guardar”. Inmediatamente aparecerá una ventana emergente.
12) Seleccionar la carpeta donde se guardará el nuevo archivo.
13) Presionar el botón “seleccionar carpeta” de la ventana emergente. Pocos segundos después aparecerá una ventana informativa indicando que la señal se guardó correctamente.
14) Presionar el botón “ok” en la ventana informativa.

En las figuras B-6, B-7, B-8, B-9 y B-10 se observa este procedimiento en el aplicativo. Además, en figura B-11 se observa la ventana que aparece al finalizar el proceso de guardado.

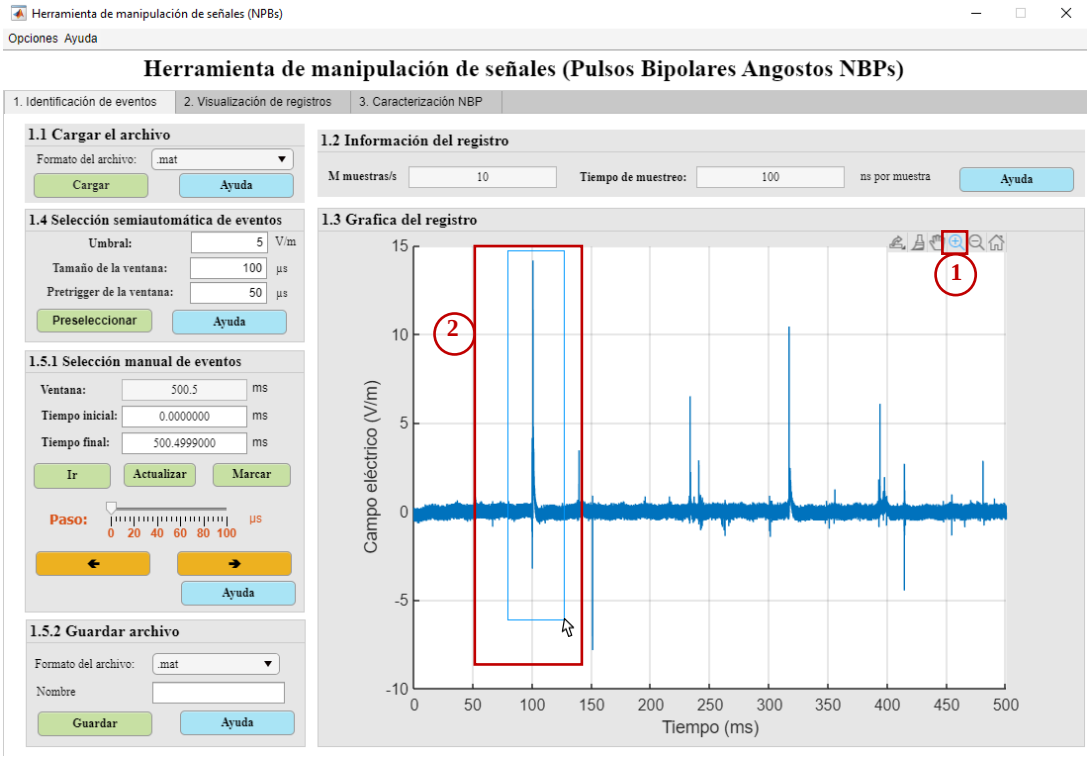


Figura B-6 Procedimiento para ampliar el registro en la sección de interés

Fuente: autores

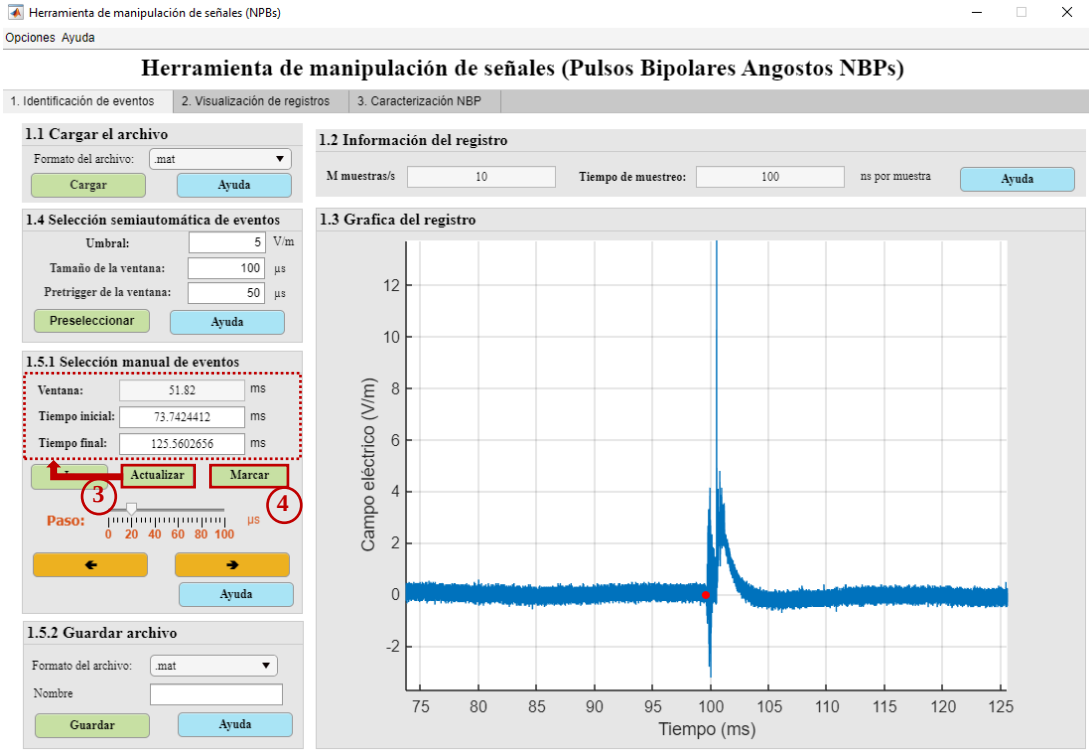


Figura B-7 Procedimiento para marcar el punto de referencia

Fuente: autores

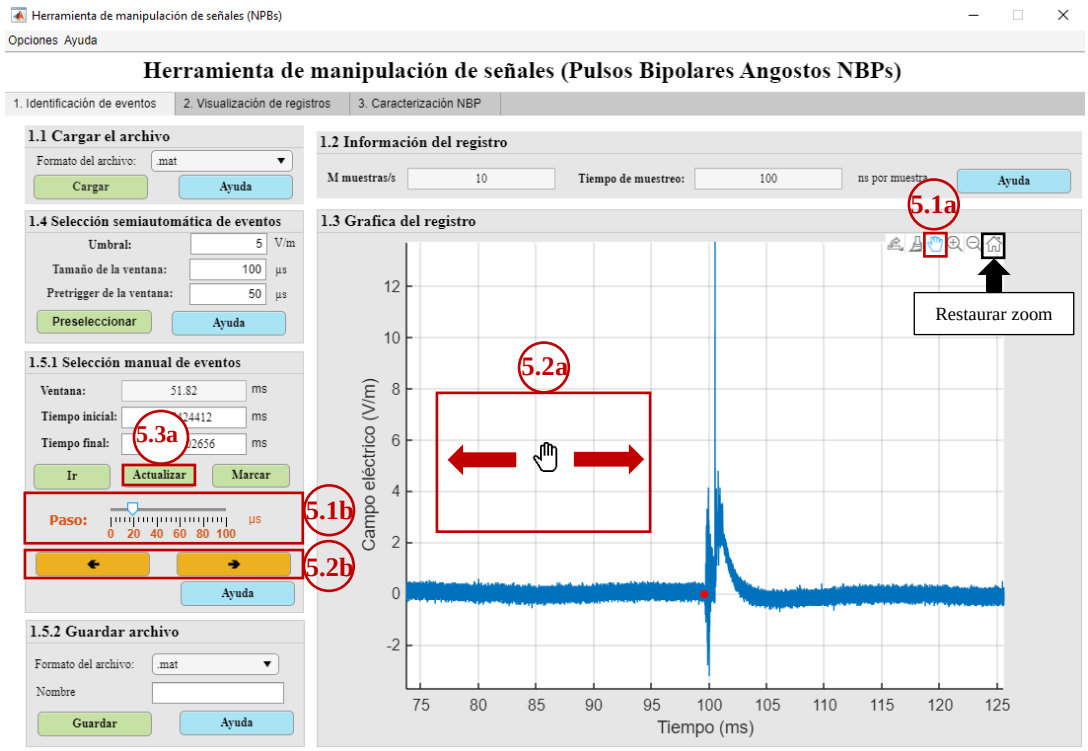


Figura B-8 Procedimiento para navegar o desplazarse en el registro

Fuente: autores

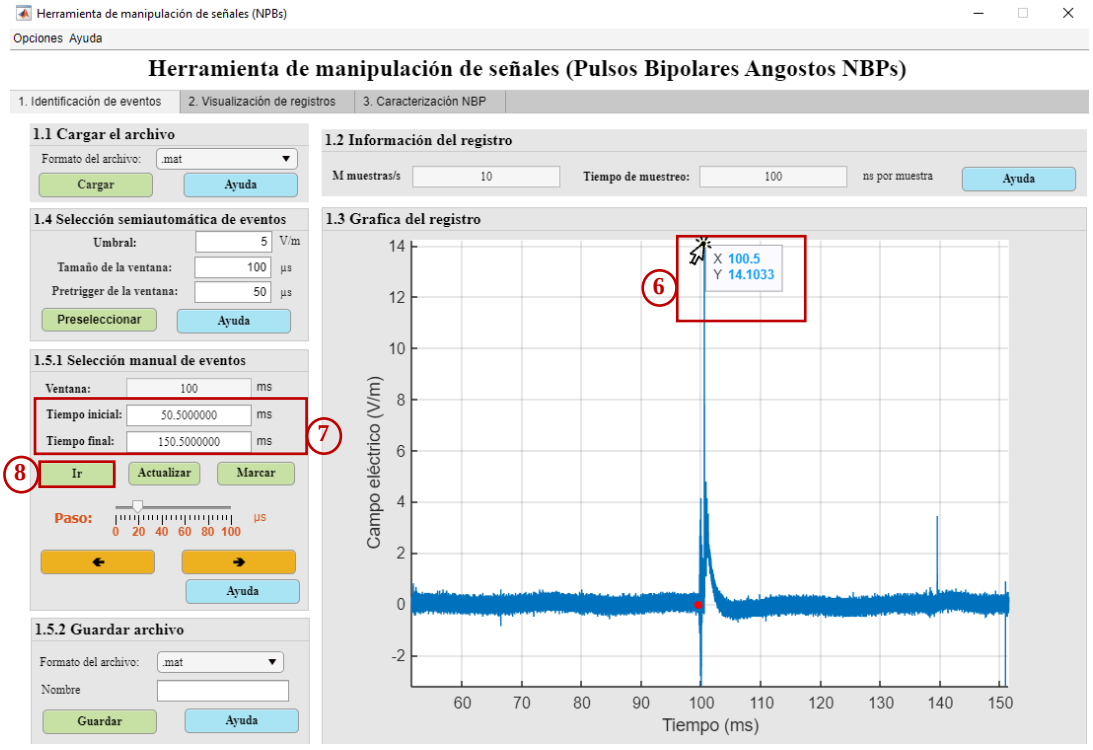


Figura B-9 Procedimiento para ajustar el tamaño de la ventana y su tiempo previo al punto máximo de la sección del registro

Fuente: autores

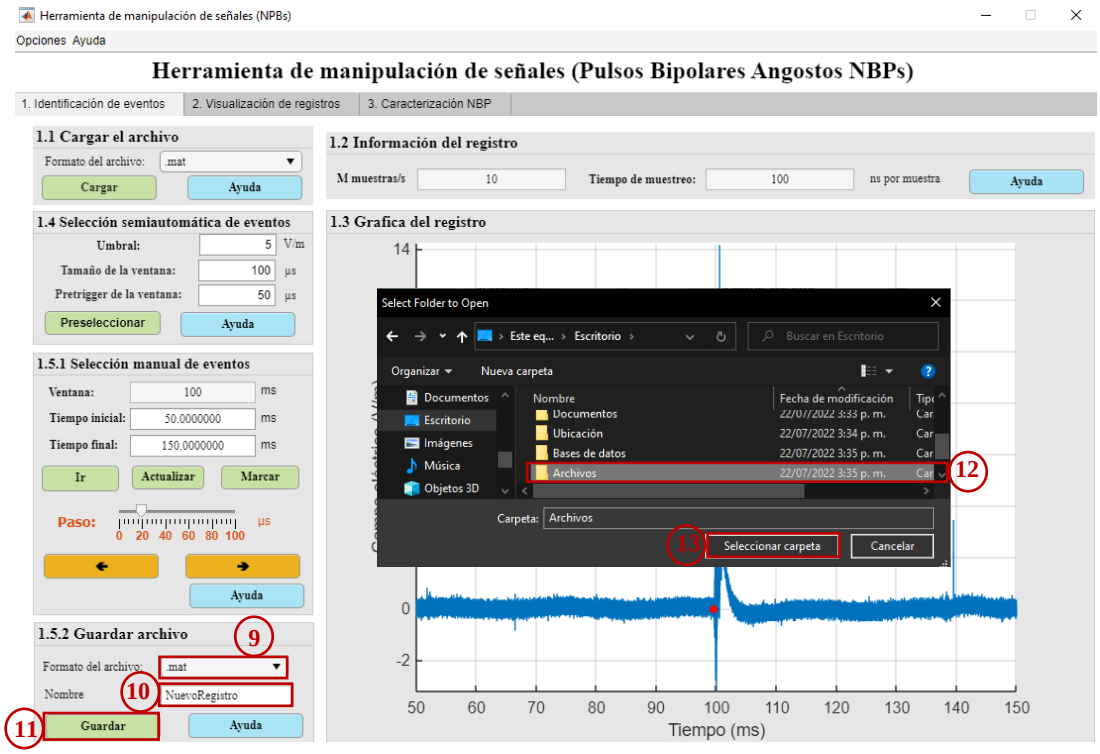


Figura B-10 Procedimiento para guardar la señal seleccionada de forma manual
Fuente: autores

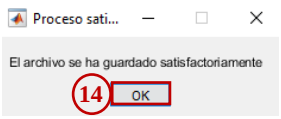


Figura B-11 ventana informativa que indica que el archivo fue guardado correctamente
Fuente: autores

Como se mencionó anteriormente, los puntos rojos permiten señalar las secciones de registro que ya han sido examinadas, esto permite su fácil inspección. En la figura B-12 se observa la gráfica de un registro que ha pasado por el proceso mencionado.

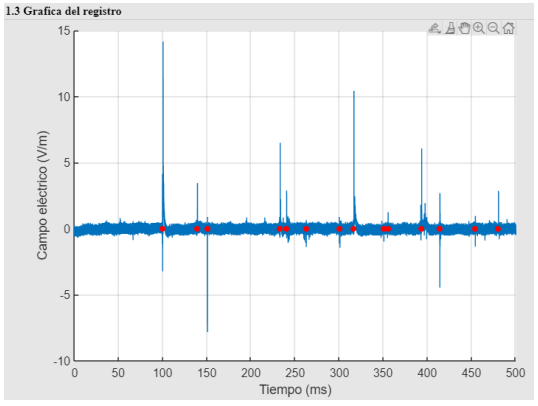


Figura B-12 registro "W_161125_203955_Ezb.mat" luego de realizar un proceso de inspección manual
Fuente: autores

3. Caracterización de formas de onda de NBPs

3.1. Ingreso de los registros para el proceso de caracterización

Para ingresar el registro al aplicativo con el fin de realizar el proceso de caracterización de NBPs, se deben seguir los siguientes pasos:

1) Ir la sección “Caracterización NBP”.
2) Seleccionar el formato del archivo con la barra desplegable del módulo 3.2.
3) Presionar el botón “cargar” del módulo 3.2. Inmediatamente aparecerá una ventana emergente solicitando el registro.
4) Seleccionar el registro en la ventana emergente.
5) Presionar el botón “abrir” de la ventana emergente.

En la figura B-13 se observa este procedimiento en el aplicativo.

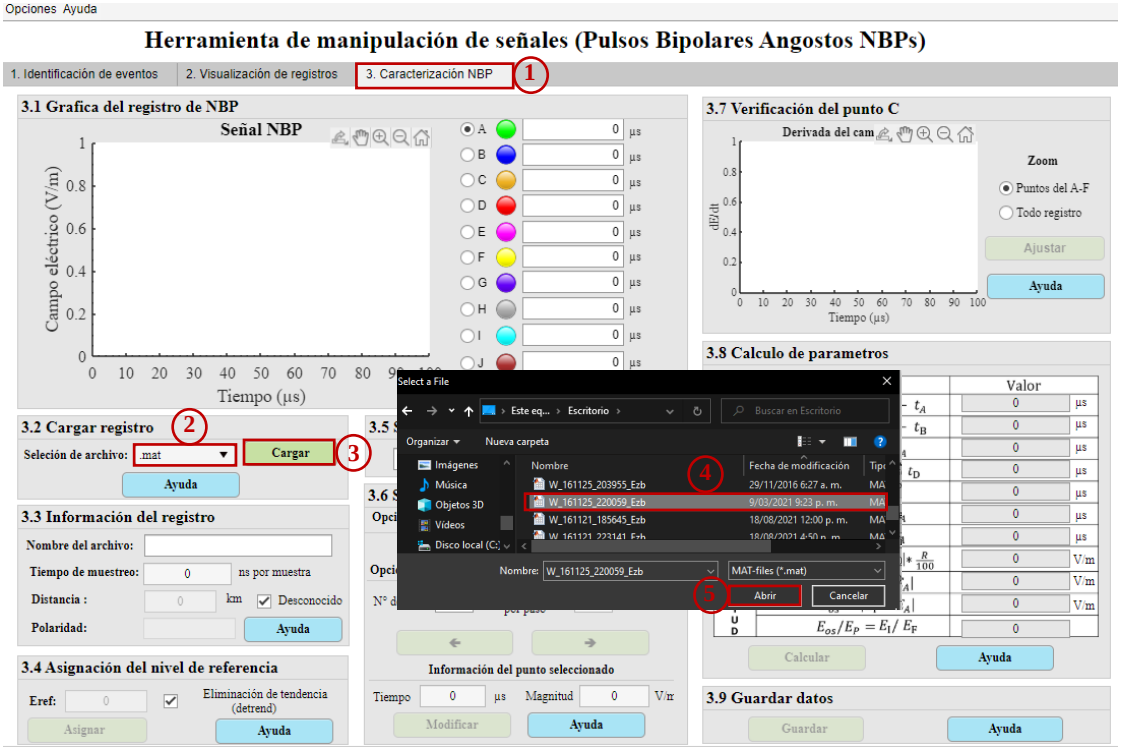


Figura B-13 Procedimiento para ingresar los registros al aplicativo para de realizar la caracterización de NBPs
Fuente: autores

3.2. Determinación de los parámetros de forma de onda de NBPs

Para realizar la determinación de los parámetros de la forma de onda de NBPs, se deben seguir los siguientes pasos:

1) Deshabilitar el recuadro “Desconocido” del módulo 3.3 si se conoce la distancia entre la estación de medición y el NBP.

2) Diligenciar la distancia entre la estación de medición y el NBP en el campo “distancia” del módulo 3.3.
3) Diligenciar el valor del nivel de referencia de la señal ingresada en el campo “Eref” del módulo 3.4, o habilitar el recuadro “Eliminación de tendencia” para determinarla automáticamente.
4) Presionar el botón “Asignar” del módulo 3.4.
5) Identificar visualmente el tipo de NBP y diligenciarlo en el campo dispuesto en el módulo 3.5.
6) Presionar el botón “Encontrar puntos” del módulo 3.6.
7) Presionar el botón “Calcular” del módulo 3.8.

En la figura B-14 se observa este procedimiento en el aplicativo.

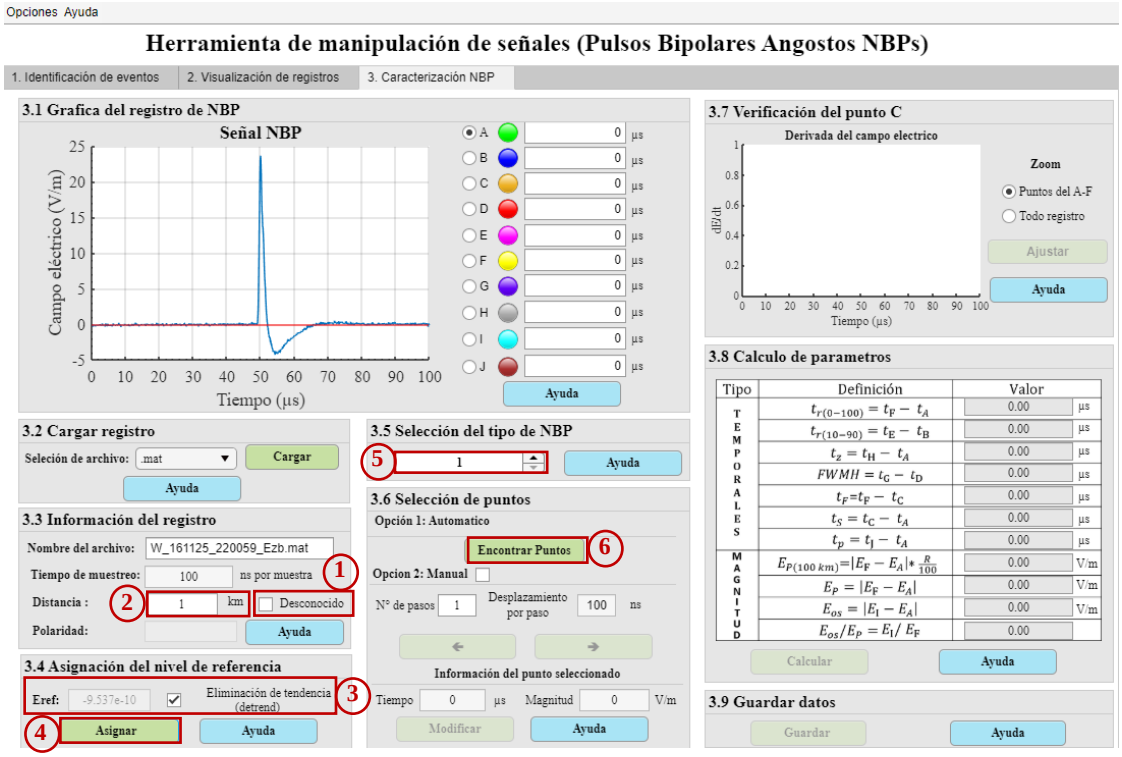


Figura B-14 Procedimiento para determinar los puntos característicos de la señal del NBP
Fuente: autores

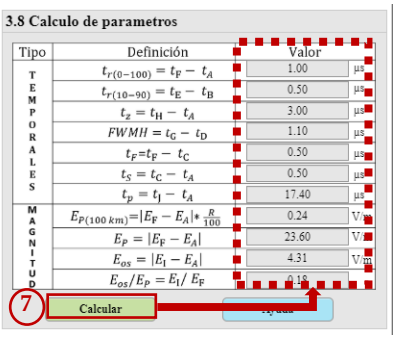


Figura B-15 Procedimiento para calcular los parámetros de forma de onda del NBP
Fuente: autores

3.3. Modificación de los puntos característicos

Para realizar la determinación de los parámetros de la forma de onda de NBPs, se deben seguir los siguientes pasos:

1) Habilitar el recuadro “Manual” del módulo 3.6.
2) Seleccionar el punto a modificar en el módulo 3.1.
3) Diligenciar el valor del campo “N° pasos” del módulo 3.6. Este valor define el desplazamiento de la nueva posición a partir de tiempo de muestreo de la señal.
   Nota: La nueva posición está representada con un punto de color negro con una línea puntuada vertical en la gráfica del módulo 3.1.
4) Desplazar el punto de la nueva posición con los botones “←” “→” del módulo 3.6, hacia su correcta ubicación.
5) Presionar el botón “Modificar” del módulo 3.6.

En la figura B-16 se observa este procedimiento en el aplicativo.

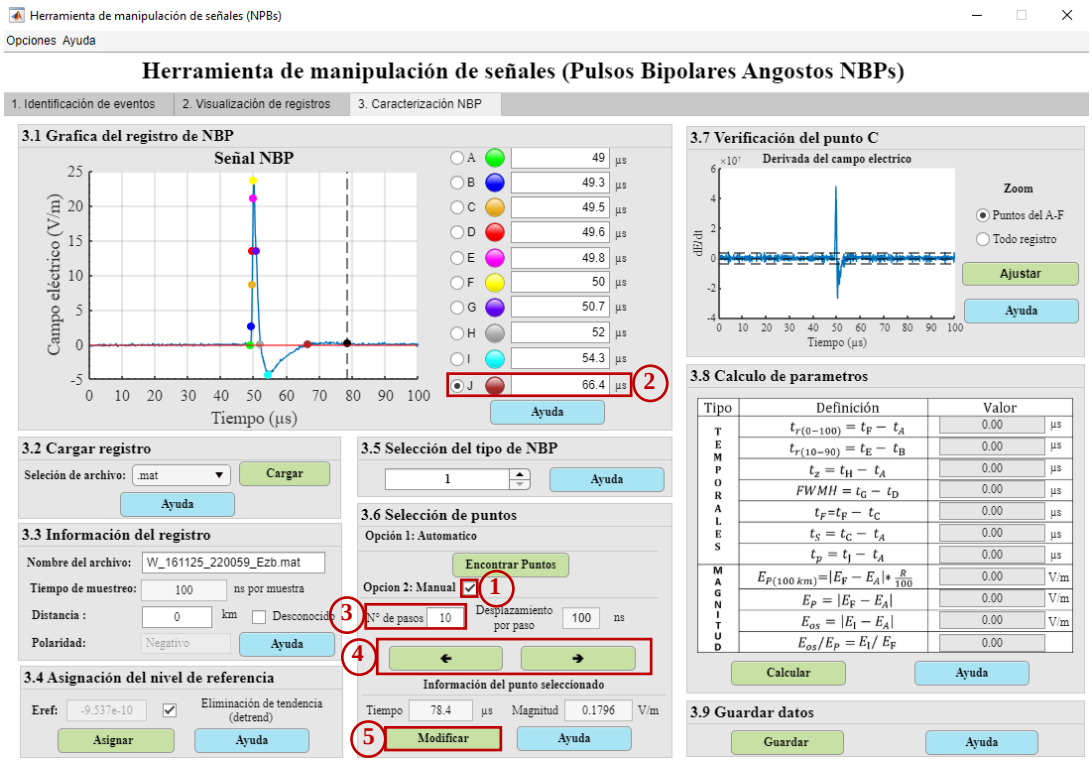


Figura B-16 Procedimiento para modificar los puntos característicos

Fuente: autores

5.5.11. Modificación de punto característico C

Para modificar el punto característico C hay que realizar unos pasos adicionales con respecto los otros puntos, este procedimiento es:

1) Seleccionar el punto C en el módulo 3.1
2) Seleccionar la opción “puntos de A-F” en el módulo 3.7.
3) Presionar el botón “Ajustar” del módulo 3.7. Inmediatamente la gráfica de la derivada de campo eléctrico del mismo módulo, se ampliará desde el punto de inicio de señal hasta el punto correspondiente de mayor magnitud de la señal de campo eléctrico. Así mismo, la gráfica tendrá cinco líneas verticales de diferentes colores representando la posición de los puntos característicos A, B, D, E y F. Esto permite identificar la correcta posición del punto C (Punto que se encuentra entre el punto A y D, siendo de mayor magnitud en caso de que el NBP sea de polaridad negativa o, de menor magnitud para polaridad positiva).
4) Desplazar el punto de la nueva posición hacia su correcta ubicación con los botones “←” “→” del módulo 3.6. La nueva posición del punto C está representada con un punto de color negro en la gráfica del módulo 3.1 y 3.7.
5) Presionar el botón “Modificar” del módulo 3.6.

En la figura B-17 se observa este procedimiento en el aplicativo.

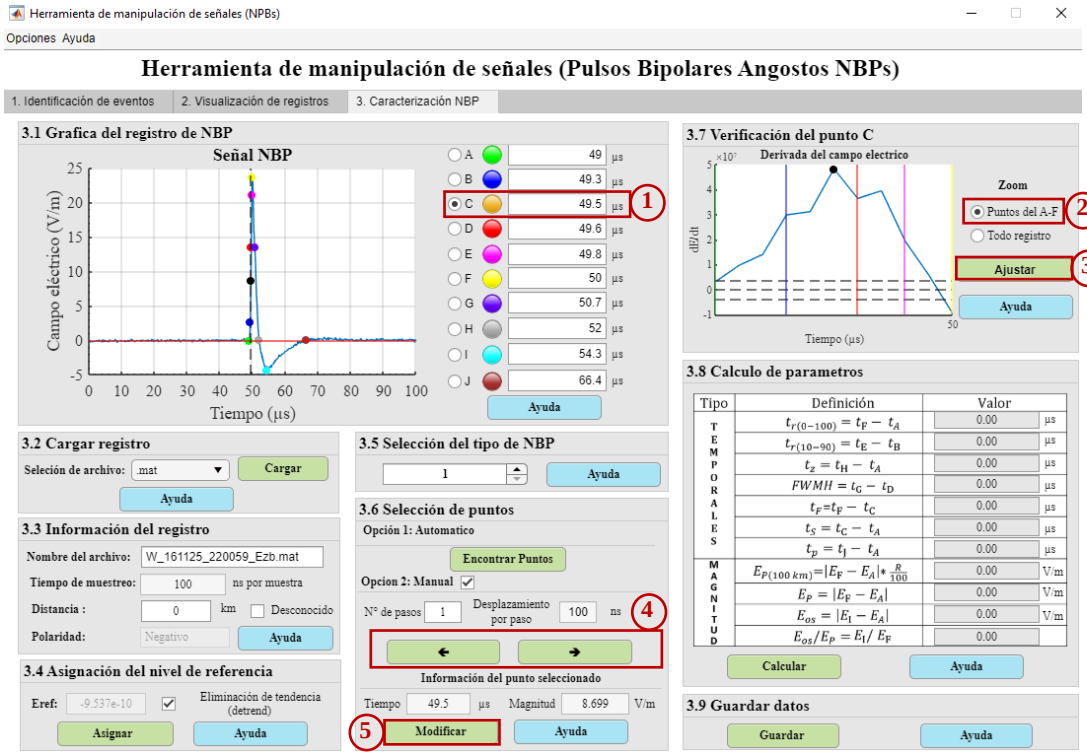


Figura B-17 Procedimiento para modificar el punto característico C
Fuente: autores

3.4. Proceso de almacenamiento de resultados en la base de datos

Para realizar la determinación de los parámetros de la forma de onda de NBPs, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Presionar el botón “Guardar” del módulo 3.9, en seguida aparecerá una ventana emergente solicitando el archivo tipo Excel donde se guardaran los resultados.
2. Seleccionar el archivo en la ventana emergente.
3. Presionar el botón “Abrir” de la ventana emergente. Luego de pocos segundos aparecerá una ventana informativa mencionado que los resultados se guardaron correctamente.
4. Presionar el “ok” de la ventana informativa.

En la figura B-18 se observa este procedimiento en el aplicativo y en la figura B-19 la ventana que aparece al finalizar el proceso de guardado de resultados.



Figura B-18 Procedimiento para guardar los resultados en la base de datos
Fuente: autores

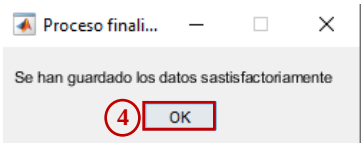


Figura B-19 ventana informativa que indica que los resultados se guardaron correctamente
Fuente: autores

Para facilitar el cálculo de los indicadores estadísticos de las formas de onda de NBPs, se realizó una plantilla llamada “BD_NBPs”. Esta hoja de cálculo está compuesta de dos pestañas, *“Resultados”* y *“Estadísticas”*. La pestaña *“Resultados”* almacenara los parámetros determinados y guardados por el aplicativo y adicionalmente: el nombre del registro, la polaridad de la señal y tipo de NBP.

Por otro lado, en la pestaña *"Estadísticas"* se encuentra la distribución de los registros almacenados en la pestaña *"Resultados"* según la polaridad y tipo de NBPs. Adicionalmente, en esta pestaña se calcularán indicadores estadísticos de cada parámetro de forma de onda como: media aritmética, media geométrica, desviación estándar, máximos y mínimos. Los datos estarán agrupados según la polaridad (positiva, negativa o ambas polaridades).

En la figura B-20 se observa datos guardados de algunos registros de NBPs en la pestaña *"Resultados"* de la plantilla BD_NBPs, y en la figura B-21 parte del contenido de la pestaña Estadísticas.

Nombre de la señal	Polaridad	Tipo de NBP	tiempo de ascenso [0-100%] (µs)	tiempo de ascenso [10-90%](µs)	Tiempo de cruce por cero (µs)	Tiempo del ancho del pico completo a media altura (µs)	Frente lento (µs)	Frente rapido (µs)	Duracion del pulso (µs)	Magnitud del pico normalizado a 100 km (V/m)	Magnitud del pico (V/m)	Magnitud del pico opuesto (V/m)	Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico
W_161125_220049_Ezb.mat	Negativo	1	1,10	0,60	3,30	1,50	0,40	0,70	18,30	-	22,74	3,62	6,28
W_161125_220059_Ezb.mat	Negativo	1	1,00	0,50	3,00	1,10	0,50	0,50	17,40	-	23,60	4,31	5,48
W_161125_220151_Ezb.mat	Negativo	1	1,50	0,50	4,10	1,40	0,80	0,70	18,10	-	20,26	3,90	5,19
W_161125_220315_Ezb.mat	Negativo	1	0,90	0,50	3,40	1,20	0,40	0,50	21,10	-	16,22	2,27	7,14
W_161121_185645_Ezb.mat	Negativo	2	1,10	0,50	3,80	1,00	0,60	0,50	22,00	-	20,79	2,77	7,52
W_161121_185706_Ezb.mat	Negativo	2	0,60	0,30	2,90	1,20	0,30	0,30	20,80	-	15,34	2,53	6,08
W_161121_185713_Ezb.mat	Negativo	2	1,30	0,70	3,30	1,30	0,60	0,70	21,70	-	20,79	3,50	5,94
W_161121_185726_Ezb.mat	Negativo	2	0,90	0,40	2,80	1,00	0,40	0,50	21,00	-	17,97	2,83	6,35
W_161121_185757_Ezb.mat	Negativo	2	0,60	0,30	2,70	0,90	0,20	0,40	8,40	-	12,86	2,03	6,34
W_161121_185804_Ezb.mat	Negativo	2	1,10	0,50	2,70	1,10	0,60	0,50	21,90	-	21,59	3,35	6,44

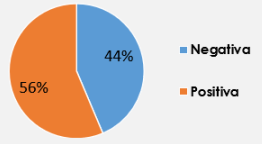
Resultados | Estadisticas

Figura B-20 Pestaña resultados de la plantilla BD_NBPs.xlsx

Fuente: autores

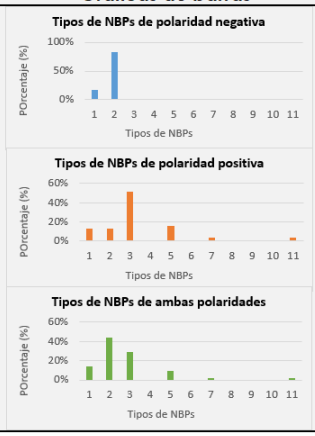
Polaridad	Número de eventos	Porcentaje
Negativa	24	44%
Positiva	31	56%
Total	55	0%

Gráfica del número de eventos



Tipo de NBPs	Numero de eventos					
	Polaridad Negativa	%	Polaridad Positiva	%	Ambas polaridades	%
1	4	17%	4	13%	8	15%
2	20	83%	4	13%	24	44%
3	0	0%	16	52%	16	29%
4	0	0%	0	0%	0	0%
5	0	0%	5	16%	5	9%
6	0	0%	0	0%	0	0%
7	0	0%	1	3%	1	2%
8	0	0%	0	0%	0	0%
9	0	0%	0	0%	0	0%
10	0	0%	0	0%	0	0%
11	0	0%	1	3%	1	2%
Total	24	100%	31	100%	55	100%

Graficas de barras



Resultados | Estadisticas

(a)

Nota: la figura continua en la siguiente página.

Pulsos bipolares angostos de ambas polaridades					Número de eventos	55
Tipo	**Parámetros característicos**	**medidas estadísticos**				
		Mínimo (µs)	Máximo (µs)	Media aritmética (µs)	Media geométrica (µs)	Desviación estándar (µs)
Tiempo	tiempo de ascenso [0-100%] (Tr [0-100%])	0,50	7,40	1,98	1,56	1,52
	tiempo de ascenso [10-90%] (Tr [10-90%])	0,20	3,50	1,06	0,82	0,77
	Tiempo de cruce por cero (Tz)	2,20	15,60	5,36	4,81	2,62
	Tiempo del ancho del pico completo a media altura (FWMH)	0,60	3,30	1,37	1,29	0,51
	Frente lento (Ts)	0,20	5,80	1,22	0,81	1,29
	Frente rapido (Tf)	0,10	1,90	0,76	0,65	0,41
	Duracion del pulso (Tp)	8,40	49,50	21,09	20,13	6,71
Tipo	**Parámetros característicos**	**medidas estadísticos**				
		Mínimo (V/m)	Máximo (V/m)	Media aritmética (V/m)	Media geométrica (V/m)	Desviación estándar (V/m)
Magnitud	Magnitud del pico (Ep)	1,19	23,60	10,44	7,73	7,11
	Magnitud del pico normalizado a 100 km (Ep)	0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!
	Magnitud del pico opuesto (Eos)	0,45	4,31	1,78	1,44	1,11
	Relación entre la amplitud del pico opuesto y el pico (Eos/Ep)	2,50	10,07	5,62	5,37	1,68

Resultados | Estadisticas

(b)

Figura B-21 Pestaña estadísticas de la plantilla BD_NBPs.xlsx: (a) Sección del número de eventos; (b) resultados de los parámetros de la forma de onda para ambas polaridades.

Fuente: autores

Anexo C : Tutorial ejemplo práctico de la herramienta de manipulación de señales de Pulsos Bipolares Angostos NBPs

Con el objetivo de guiar al usuario en el uso de la herramienta de manipulación de señales de Pulsos Bipolares Angostos (HMS_NBPs), se adjunta el acceso a un video, en donde se implementa un ejemplo práctico del uso de la herramienta. Para acceder al video solo debe ingresar al siguiente enlace:

https://www.youtube.com/watch?v=vTUIz-2uIuY

También, puede acceder al tutorial usando el siguiente código QR



Figura C-1 Código QR con el enlace al video de ejemplo práctico del uso de la herramienta computacional HMS_NBPs
Fuente: https://www.codigos-qr.com/generador-de-codigos-qr/

Anexo D : Tutorial para instalar la herramienta de manipulación de señales de Pulsos Bipolares Angostos NBPs

Con el objetivo de guiar al usuario en la instalación de la herramienta de manipulación de señales de Pulsos Bipolares Angostos (HMS_NBPs), se adjunta el acceso a un video, en donde se realizar este procedimiento. Para acceder al video solo debe ingresar al siguiente enlace:

https://www.youtube.com/watch?v=KKT3EnKDExM

También, puede acceder al tutorial usando el siguiente código QR

Figura D-1 Código QR con el enlace al video de tutorial del proceso de instalación de la herramienta computacional HMS_NBPs

Fuente: https://www.codigos-qr.com/generador-de-codigos-qr/

Anexo E : Tutorial para ejecutar la herramienta de manipulación de señales de Pulsos Bipolares Angostos en Matlab

Con el objetivo de guiar al usuario en la ejecución de la herramienta de manipulación de señales de Pulsos Bipolares Angostos (HMS_NBPs) en Matlab, se adjunta el acceso a un video, en donde se realiza este procedimiento. Para acceder al video solo debe ingresar al siguiente enlace:

https://www.youtube.com/watch?v=N6s0FI1VLQM

También, puede acceder al tutorial usando el siguiente código QR



Figura E-1 Código QR con el enlace al video tutorial para ejecutar la herramienta computacional HMS_NBPs en Matlab
Fuente: https://www.codigos-qr.com/generador-de-codigos-qr/

Anexo-F: Tiempos del proceso de caracterización

En la tabla F-1 se encuentran los tiempos entregados por la herramienta de manipulación de señales de Pulsos Bipolares Angostos (HMS_NBPs) para el proceso de caracterización de NBPs.

Tabla F-1 duración del proceso de caracterización entregados por el aplicativo HMS_NBPs

Registro	Tiempo (s)
W_161115_190451_Ezb	80.401
W_161115_192118_Ezb	87.400
W_161115_193208_Ezb	85.601
W_161115_202038_Ezb	79.855
W_161115_203650_Ezb	84.623
W_161115_203902_Ezb	65.435
W_161115_204358_Ezb	85.483
W_161115_205607_Ezb	74.108
W_161115_205724_Ezb_1	76.255
W_161115_205724_Ezb_2	84.731
W_161115_205732_Ezb	75.342
W_161115_205740_Ezb	87.203
W_161115_205824_Ezb	83.835
W_161115_205833_Ezb	83.244
W_161115_205931_Ezb	72.484
W_161115_210112_Ezb	67.915
W_161115_210919_Ezb	68.412
W_161115_210951_Ezb	77.435
W_161115_211037_Ezb	61.242
W_161115_214558_Ezb	67.866
W_161115_233736_Ezb	66.379
W_161115_234428_Ezb	81.567
W_161115_234837_Ezb	86.984
W_161121_185645_Ezb	67.915
W_161121_185706_Ezb	63.368
W_161121_185713_Ezb	76.225
W_161121_185726_Ezb	63.763
W_161121_185757_Ezb	61.509
W_161121_185804_Ezb	72.498
W_161121_185811_Ezb	73.506
W_161121_185816_Ezb	69.819
W_161121_185833_Ezb	74.512
W_161121_185938_Ezb	64.765

Nota: la tabla continua en la siguiente página.

Registro	Tiempo (s)
W_161121_185946_Ezb	70.257
W_161121_190002_Ezb	62.966
W_161121_185914_Ezb	68.587
W_161121_185929_Ezb	69.409
W_161121_185854_Ezb	70.994
W_161121_190012_Ezb	76.215
W_161121_190034_Ezb	74.564
W_161121_190052_Ezb	66.647
W_161121_190111_Ezb	72.728
W_161121_190126_Ezb	62.765
W_161121_221225_Ezb	69.269
W_161121_223141_Ezb	69.299
W_161125_201441_Ezb	65.294
W_161125_201551_Ezb	63.843
W_161125_203605_Ezb	88.287
W_161125_203730_Ezb	64.611
W_161125_203955_Ezb	67.151
W_161125_220049_Ezb	60.550
W_161125_220059_Ezb	66.701
W_161125_220151_Ezb	67.752
W_161125_220315_Ezb	66.401
W_161203_234124_Ezb	63.741

Anexo-G: Comparación de resultados con el procedimiento manual

Como se mencionó en el capítulo 5, el único parámetro que presento diferencias con respecto al procedimiento manual fue la duración de pulso. En la tabla G-1 se observa las diferencias estos valores. Cabe mencionar que si se ajusta del punto J dentro de la herramienta computacional los resultados serían iguales, este ajuste toma pocos segundos.

Tabla D-1 duración del proceso de caracterización entregados por el aplicativo HMS_NBPs

Registro	**Duración de pulso (µs)**		**Diferencia porcentual %**
	HMS_NBPs	**Manual**	
W_161115_203650_Ezb	13.9	21.6	35.65
W_161115_205740_Ezb	16.1	25.8	37.60
W_161115_234837_Ezb	16.7	22.1	24.43
W_161115_205833_Ezb	14.3	22.3	35.87
W_161115_234428_Ezb	10.2	20.3	49.75
W_161115_205824_Ezb	13.2	20.3	34.98
W_161115_192118_Ezb	15.2	18.6	18.28
W_161115_193208_Ezb	15.3	19	19.47
W_161115_204358_Ezb	18.2	22.9	20.52
W_161115_190451_Ezb	22.6	24.8	8.87
W_161125_203605_Ezb	14.6	31.1	53.05
W_161115_205724_Ezb_2	15.7	31.9	50.78
Promedio			32.44
Desviación estándar			13.68