

# Documento de Tesis



Universidad de los Andes

## Proyecto:

Caracterización eléctrica de suelos colombianos: Una herramienta para la detección de artefactos explosivos improvisados mediante la técnica de radar de penetración de suelos.

## Autor:

Daniel Julián González Ramírez  
dj.gonzalez1203@uniandes.edu.co

## Asesor:

Profesor Roberto Bustamante Miller

19 de julio de 2019

# Índice general

<b>1 Introducción</b>	<b>2</b>
1.1 Justificación . . . . .	2
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.3 Metodología . . . . .	3
<b>2 Propiedades electromagnéticas de suelos</b>	<b>4</b>
2.1 Caracterización electromagnética de un material . . . . .	4
2.2 Conductividad de suelos . . . . .	5
2.3 Permitividad de suelos . . . . .	6
2.4 Dispersión en dieléctricos . . . . .	7
2.4.1 Modelo Debye . . . . .	8
2.4.2 Modelo Cole-Cole . . . . .	8
2.5 Caracterización de medios en gprMax . . . . .	9
2.5.1 Medios no dispersivos . . . . .	10
2.5.2 Medios con dispersión Debye . . . . .	11
<b>3 Técnicas de medición de las propiedades dieléctricas</b>	<b>15</b>
3.1 Consideraciones generales para el estudio y la selección de las técnicas de medición . . . . .	15
3.2 Método de transmisión/reflexión . . . . .	15
3.3 Línea de transmisión coaxial con terminación en abierto . . . . .	16
3.4 Método de espacio libre . . . . .	17
3.5 Método de cavidad resonante . . . . .	18
3.6 Onda de suelo . . . . .	19
3.7 Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR) . . . . .	20
3.8 Selección de la técnica de medición . . . . .	21

<b>4 Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR)</b>	<b>22</b>
4.1 Principios de medición . . . . .	22
4.1.1 Sonda TDR . . . . .	24
4.1.2 Permitividad relativa aparente . . . . .	26
4.1.3 Conductividad eléctrica . . . . .	31
4.1.4 Permitividad en frecuencia cero . . . . .	33
4.1.5 Permitividad relativa compleja . . . . .	33
4.1.6 Algoritmo de procesamiento de señales . . . . .	35
4.2 Equipos comerciales TDR . . . . .	39
4.2.1 Equipos seleccionados . . . . .	40
4.3 Diseño y fabricación de una sonda de medición . . . . .	40
4.3.1 Parámetros de diseño . . . . .	41
4.3.2 Materiales y dimensiones . . . . .	41
4.3.3 Procedimiento de fabricación . . . . .	41
<b>5 Medición de las propiedades dieléctricas</b>	<b>44</b>
5.1 Simulación de TDR en gprMax . . . . .	44
5.1.1 Construcción del cable de alimentación . . . . .	44
5.1.2 Construcción de la sonda . . . . .	49
5.1.3 Pulso de excitación . . . . .	50
5.1.4 Simulación y lectura de los datos simulados . . . . .	51
5.2 Calibración de las mediciones . . . . .	52
5.3 Recuperación de la permitividad relativa compleja . . . . .	53
5.3.1 Resultados de simulación . . . . .	54
5.3.2 Validación del algoritmo para mediciones . . . . .	56
5.4 Medición de suelos colombianos . . . . .	58
5.4.1 Descripción del procedimiento de medición . . . . .	58
5.4.2 Resultados de mediciones . . . . .	67

<b>6 Artefactos explosivos improvisados</b>	<b>68</b>
6.1 Materiales, componentes y geometría . . . . .	68
6.2 Construcción de un IED en gprMax . . . . .	69
<b>7 Detección de IED en simulaciones de radar de penetración de suelos</b>	<b>73</b>
<b>8 Conclusiones</b>	<b>76</b>
<b>A Código desarrollado</b>	<b>81</b>
A.1 Biblioteca Sonda TDR . . . . .	81
A.2 Biblioteca IED . . . . .	82
A.3 Script generación del pulso incidente . . . . .	85
A.4 Script de procesamiento de las señales de TDR simuladas . . . . .	85
A.4.1 Función de lectura de los archivos . . . . .	90
A.4.2 Función de ubicación aleatoria de las partículas . . . . .	91
A.5 Script de procesamiento de las señales de TDR medidas . . . . .	91
A.5.1 Función de lectura de los archivos . . . . .	96
A.5.2 Función de ubicación aleatoria de las partículas . . . . .	97
A.6 Script de calibración de las señales de TDR simuladas . . . . .	97
A.6.1 Función de calibración de longitud efectiva . . . . .	98
A.6.2 Función de calibración de factor de forma . . . . .	98
A.7 Script de calibración de las señales de TDR medidas . . . . .	99
A.7.1 Función de calibración de longitud efectiva . . . . .	99
A.7.2 Función de calibración de factor de forma . . . . .	100

## **Capítulo 1**

# **Introducción**

## **1.1. Justificación**

Este proyecto de grado propone contribuir a la detección de artefactos explosivos improvisados (IED – Improvised Explosive Devices) mediante la tecnología de radar de penetración de suelos (GPR – Ground Penetrating Radar), un problema asociado con el desminado humanitario en Colombia.

Las minas antipersonal son un problema de carácter humanitario porque pueden herir de gravedad o matar a civiles. Como las minas son armas plantadas, no ven la diferencia entre civiles y militares, y pueden permanecer activas por décadas. A partir de 1997, se han hecho tratados internacionales que buscan un mundo libre de minas antipersonal; para lograrlo es esencial poder detectarlas y neutralizarlas [1].

Los IED son un tipo de minas antipersonal que son fabricados de forma artesanal. Los mecanismos de acción, los materiales y la geometría de los IED son variados; por lo tanto, existe una gran cantidad de configuraciones de IED. En Colombia, los grupos insurgentes típicamente utilizan IEDs en lugar de minas antipersonal convencionales por lo tanto su detección es de gran importancia en la problemática colombiana. Usualmente, para la detección de minas antipersonal se utilizan detectores de metales; que un operador de desminado maneja de manera manual, escaneando el terreno potencialmente minado. La cantidad de configuraciones de IED causa que los métodos utilizados para detectar minas antipersonal tradicionales no sean efectivos en todos los casos, ya que muchas configuraciones utilizan un bajo contenido metálico [2, 3].

Idealmente un sistema debería poder detectar cualquier tipo de minas antipersonal. La utilización de la tecnología GPR ha sido ampliamente estudiada para la detección de minas y ha probado buenos resultados [1, 4–6]. Pero un problema que presentan los sistemas actuales de GPR, para la detección de minas antipersonal, es la configuración y desempeño en diferentes condiciones de suelo. Para solucionar este problema se requiere una buena caracterización de los suelos en donde se realizará el desminado. Existen modelos de las propiedades dieléctricas de suelos, basados en las propiedades físicas del suelo [7–12]. Estos modelos son realizados de manera empírica y utilizan ecuaciones Cole-Cole o Debye para representar la dependencia de la frecuencia de la permitividad [9, 13–16]. Los modelos han probado ser buenos para representar diferentes suelos, ya que tienen en cuenta propiedades moleculares que componen el suelo [9, 13]; algunos modelos han sido aplicados a suelos colombianos, en base a mediciones de contenido de agua en suelos [17]; sin embargo, en el conocimiento al realizar este trabajo, no se ha comprobado la validez de los modelos con mediciones de las propiedades dieléctricas de suelos colombianos.

## **1.2. Objetivos**

Medir las propiedades dieléctricas de tres unidades de suelo en Colombia, para encontrar un modelo que describa las propiedades de los suelos estudiados. Y evaluar el desempeño de un GPR para la detección de IEDs, relacionadas con la problemática de desminado humanitario en Colombia, en los suelos caracterizados.

- I. Definir una técnica para realizar mediciones de las propiedades eléctricas de suelos en campo para el ancho de banda de GPR (600 MHz a 6 GHz).

- II. Reproducir el procedimiento de medición propuesto con el simulador gprMax, utilizando medios con propiedades conocidas como objeto de estudio.
- III. Aplicar la técnica de medición de las propiedades dieléctricas sobre tres tipos de suelos en Colombia con la técnica definida.
- IV. Analizar los resultados de las mediciones, en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia, para obtener la permitividad dieléctrica compleja y la conductividad de los suelos.
- V. Realizar una inversión a los resultados obtenidos de la caracterización de suelos, con el fin de ajustarlos a un modelo dieléctrico que pueda ser simulado en gprMax.
- VI. Validar mediante simulación los resultados obtenidos sobre los suelos caracterizados, reproduciendo el procedimiento de medición propuesto utilizando el modelo dieléctrico obtenido como representación del suelo.
- VII. Identificar los materiales y geometría de un artefacto explosivo improvisado utilizado en el conflicto armado colombiano.
- VIII. Crear el modelo de los artefactos explosivos improvisados en gprMax, fiel a los materiales y la geometría identificada. Los artefactos creados en gprMax se realizarán mediante funciones con parámetros que permitan modificar las dimensiones y los materiales desde la ejecución.
- IX. Obtener trazas-A y trazas-B, mediante simulaciones en gprMax, la respuesta de un GPR en escenarios de detección con los suelos caracterizados y la IED reproducida.

### 1.3. Metodología

Con el fin de evaluar el desempeño de un sistema GPR para la detección de IED, se propone utilizar un simulador de campos electromagnéticos donde se pueda incluir un modelo de IED típico de la problemática colombiana. Se utilizará el simulador gprMax [18, 19], para la solución de ecuaciones de Maxwell que describen el fenómeno de propagación electromagnética mediante el método de Diferencia Finita en el Dominio del Tiempo (FDTD – Finite Difference Time-Domain). Los modelos de minas convencionales no son aplicables a la problemática colombiana, para solucionar esto se creará un modelo de IED para las simulaciones; fiel a los materiales y geometría de un IED real.

Se hará una caracterización eléctrica de los suelos para el rango de frecuencias típico de un GPR utilizado para detección de IEDs, 600 MHz a 6 GHz. La caracterización de los suelos se representará mediante un modelo de dispersión que pueda ser simulado en gprMax. Esta caracterización se hará en campo para diferentes suelos colombianos. Utilizando la caracterización de los suelos, se simularán diferentes escenarios de detección de las IEDs. El resultado de estas simulaciones ayudarán a entender los desafíos que se tiene en la detección de IEDs en condiciones reales para el desminado en Colombia.

## Capítulo 2

# Propiedades electromagnéticas de suelos

## 2.1. Caracterización electromagnética de un material

La propagación de una onda electromagnética a través de un medio, está definida por las propiedades eléctricas del medio en cuestión. Las propiedades que describen a un material en el electromagnetismo son la permitividad  $\epsilon$ , permeabilidad  $\mu$  y conductividad  $\sigma$ . Conociendo estos tres parámetros es posible conocer como se comporta una onda electromagnética en un medio.

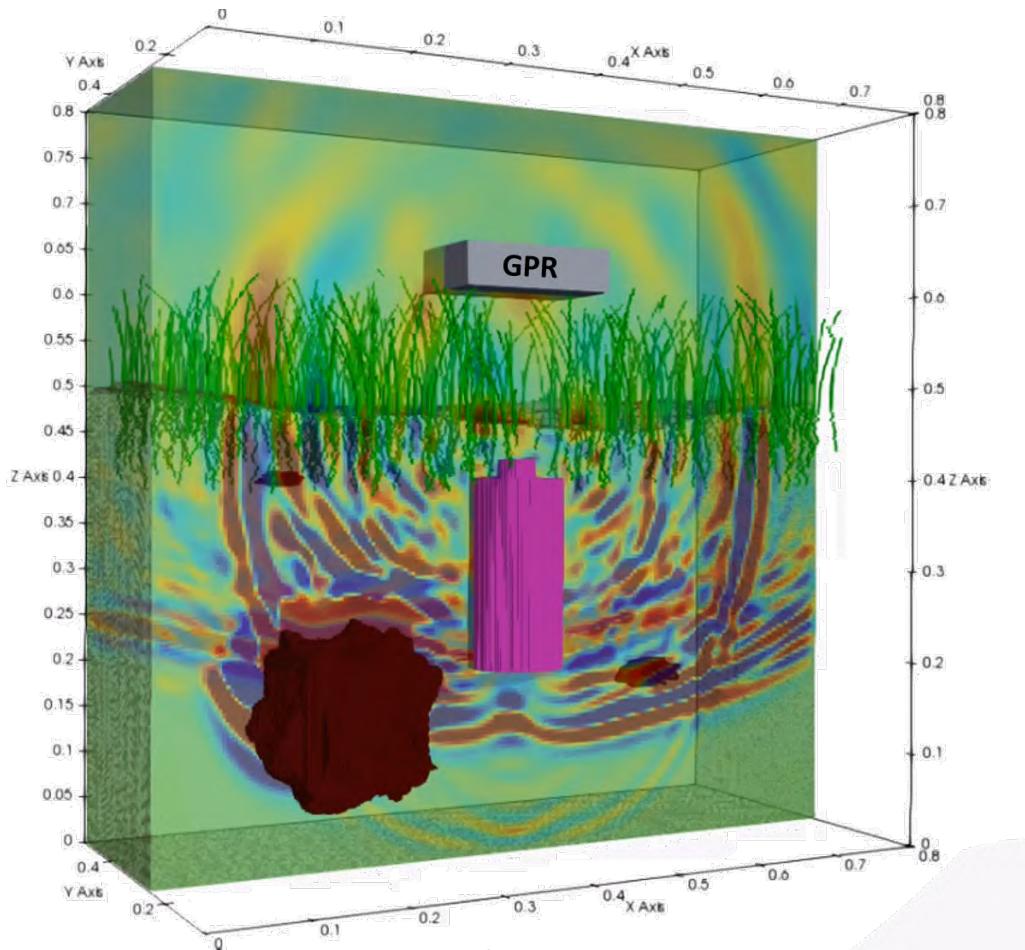


Figura 2.1: Escenario de detección con GPR

El desempeño de un radar de penetración de suelos (GPR) es afectado por la caracterización electromagnética de los materiales sobre los cuales se propaga la señal de radar. En un escenario de detección de minas antipersonal con GPR hay diferentes objetos de materiales diversos, que se ven involucrados en la propagación de la señal de radar.

En la figura 2.1 se muestra un escenario de detección típico, donde el radar transmite un pulso electromagnético que interactúa con el aire, rocas, suelo, vegetación y una mina antipersonal. Todo el fenómeno de propagación de las ondas electromagnéticas en el escenario está regido por las ecuaciones de Maxwell (2.1) [20], donde:  $\vec{D}$  es el vector de densidad de flujo eléctrico,  $\vec{B}$  es el vector de densidad de flujo magnético,  $\vec{E}$  es el vector de intensidad de campo eléctrico,  $\vec{H}$  es el vector de intensidad de campo magnético,  $\vec{J}_i$  es el vector de flujo de densidad de corriente impresa (fuente),  $\vec{J}_c$  es el vector de flujo de densidad de corriente de conducción,  $\rho_v$  es la densidad de carga eléctrica,  $\bar{\varepsilon}$  es el tensor de permitividad,  $\bar{\mu}$  es el tensor de permeabilidad, y  $\bar{\sigma}$  es el tensor de conductividad.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{D} &= \rho_v & \nabla \cdot \vec{B} &= 0 & \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{J}_{ic} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} & \nabla \cdot \vec{J}_{ic} &= -\frac{\partial \rho_v}{\partial t} & \vec{J}_{ic} &= \vec{J}_i + \vec{J}_c \\ \vec{B} &= \bar{\mu} * \vec{H} & \vec{D} &= \bar{\varepsilon} * \vec{E} & \vec{J}_c &= \bar{\sigma} * \vec{E} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Resolver estas ecuaciones permite que se conozca la señal que recibe el radar. Aunque es extremadamente difícil encontrar una respuesta cerrada de estas ecuaciones para escenarios tan complejos como el de la figura 2.1, existen métodos numéricos para simular el escenario —reproducir el fenómeno de propagación en un computador— y así conocer la respuesta del radar.

Para obtener simulaciones realistas de los escenarios es necesario conocer las propiedades electromagnéticas de los materiales, así se puede predecir la propagación y las interacciones de las ondas en los diferentes medios. Por lo tanto, es de interés especial para problemas de GPR la caracterización del suelo, ya que es el medio principal de propagación. En general los equipos de GPR utilizados para detección de IEDs son de banda ultra-ancha (600 MHz a 6 GHz) y por lo tanto es necesario obtener la caracterización de los suelos para este rango de frecuencias.

## 2.2. Conductividad de suelos

Los suelos se pueden entender como un medio compuesto de 3-fases: la matriz sólida del suelo, el aire acumulado en los poros y el agua acumulada entre los poros. La parte de la matriz sólida y el agua en el suelo contribuyen a la conductividad del medio, y la parte de aire se puede ver como un aislante. Existen tres mecanismos básicos de conducción que describen la conductividad de un suelo [9]:

1. **Conductividad electrónica:** Es causada por los electrones libres en los minerales del suelo. La mayoría de los minerales presentan conductividades muy bajas. Solo los minerales ferrosos y con algunos tipos de carbón como el grafito tienen valores altos de conductividad [9].
2. **Conductividad electrolítica:** Es causada por los iones de la parte de agua en el suelo. Es el mecanismo más fuerte de conductividad y es directamente proporcional a la saturación de agua en el suelo. También depende del tamaño de los poros de la matriz del suelo, que determina la cantidad de agua ligada [9].
3. **Conductividad superficial:** Hace referencia a la conductividad causada por la interacción entre las cargas en la superficie de los poros de la matriz sólida y el agua ligada [9].

El efecto de la conductividad en el suelo se puede modelar a través de la ecuación de Archie [9]:

$$\sigma = \frac{\Phi^m}{a} \sigma_w S^n + \sigma_q$$

Donde  $\sigma_w$  es la conductividad del agua,  $\Phi$  es la porosidad efectiva,  $a$  es el factor de forma de los poros,  $m$  representa la conexión de agua entre los poros completamente saturados,  $n$  representa la conexión de agua entre los poros parcialmente saturados,  $S$  es la saturación del agua y  $\sigma_q$  es la conductividad de la interfaz entre la matriz sólida y el agua.

La conductividad eléctrica es directamente proporcional a la temperatura debido al contenido de agua de los suelos. A medida que se incrementa la temperatura la viscosidad del agua decrece y los iones pueden moverse con mayor facilidad.

Los fenómenos de conductividad electrónica y conductividad electrolítica son independientes de la frecuencia en un gran ancho de banda, pero la conductividad de superficial tiene un comportamiento dependiente de la frecuencia. Cuando la corriente fluye por el suelo, iones disueltos se acumulan en los poros e impiden el paso de la corriente, la concentración de cargas en los poros presenta un retardo en el tiempo con respecto al campo de excitación debido a la inercia del movimiento de los iones. Este fenómeno se presenta sobretodo en suelos arcillosos o en suelos con alto contenido de sal, cuando se encuentran húmedos. Para este trabajo se asumirá que el comportamiento de la conductividad es constante para todas las frecuencias ya que los suelos que presentan el comportamiento dependiente de la frecuencia generalmente tienen una conductividad alta en todo el espectro. Por facilidad de notación, a lo largo del documento, se referirá a la conductividad de los suelos como  $\sigma_{DC}$ .

### 2.3. Permitividad de suelos

Al estudiar la permitividad de los suelos es conveniente dividir la parte del agua de los mismos en dos: agua libre y agua ligada. De este modo se tiene un modelo de suelo de 4-fases, como se muestra en la figura 2.2: matriz sólida, aire, agua libre y agua ligada. El agua ligada corresponde a las moléculas de agua que se adhieren a la matriz sólida del suelo, debido a la tensión superficial entre el agua y las paredes de los poros. El agua libre corresponde al agua que se encuentra dentro de los poros, más lejos de la matriz sólida del suelo, y por lo tanto no está adherida.

Los suelos se polarizan ante la presencia de un campo eléctrico externo, debido a que todas sus cuatro fases tienen comportamiento dieléctrico (comportamiento que se opone al paso de la corriente). La polarización de un material indica que existe un momento eléctrico por unidad de volumen que desplaza las cargas del material expuesto a un campo externo. Este desplazamiento de cargas se debe a que las moléculas del dieléctrico se alinean con el campo externo venciendo el comportamiento térmico aleatorio de las moléculas. Un campo eléctrico interno, opuesto al campo externo, se induce debido al desplazamiento de cargas y provoca que el campo eléctrico resultante en el medio sea más débil que el campo externo [13].

Existen cuatro mecanismos básicos de polarización que describen las características dieléctricas de un suelo dependiendo de la frecuencia del campo externo [9]:

1. **Polarización electrónica:** Es la polarización debida al desplazamiento de las capas de electrones con respecto al núcleo del átomo. Es el fenómeno más débil de polarización y está presente en todos los materiales. Este es el único mecanismo que actúa en altas frecuencias donde las moléculas no pueden cambiar a la misma tasa que el campo incidente y por lo tanto se relajan y la energía se disipa en forma de calor [9, 21]. En este documento se utilizará la notación:  $\epsilon_{r,\infty}$  para la permitividad que representa este fenómeno de polarización.
2. **Polarización iónica:** Hace referencia al desplazamiento de los dipolos dentro de la estructura cristalina de la matriz del suelo. Este mecanismo de polarización describe las características dieléctricas de los minerales

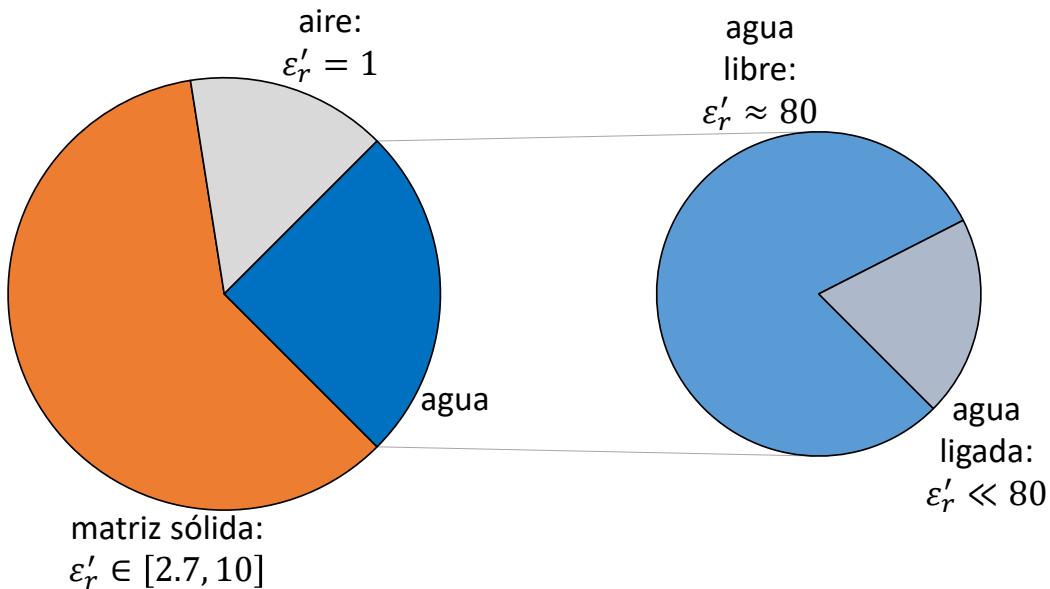


Figura 2.2: Ilustración del suelo como un material de 4 partes. Las proporciones corresponden a valores típicos de matriz sólida, aire y agua. Se indica también valores típicos y rangos de la parte real de la permitividad relativa de cada componente  $\epsilon'_r$ .

presentes en el suelo. A muy altas frecuencias, los dipolos de la estructura cristalina no son capaces de orientarse con el campo debido a los cambios rápidos de dirección. Sin embargo este mecanismo no está presente en las frecuencias de GPR.

3. **Polarización de orientación:** Hace referencia a la orientación de los dipolos del agua. En general, las moléculas del agua dentro del suelo están orientadas aleatoriamente debido al movimiento térmico entre ellas. Cuando se aplica un campo externo, estas moléculas se alinean todas en la misma dirección.
4. **Polarización de interfaz:** Al haber una interfaz entre dos materiales diferentes es posible que se genere una carga estática, por ejemplo en la interfaz creada por las paredes de los poros y el agua. El desplazamiento de dichas cargas ante un campo eléctrico externo genera polarización en el medio. Este mecanismo determina el comportamiento dieléctrico a bajas frecuencias.

Debido a que la permitividad del agua es mucho mayor a la de la matriz sólida del suelo y el aire, el comportamiento dieléctrico de los suelos está gobernado mayormente por su contenido de agua.

## 2.4. Dispersión en dieléctricos

Los suelos son medios dispersivos, es decir: son medios en los cuales la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es dependiente de la frecuencia. Esto ocurre porque la permitividad de los medios dispersivos es una función de la frecuencia. la velocidad de propagación de una onda electromagnética se relaciona con la

permitividad del medio dispersivo por la cual se propaga a través de la ecuación (2.2).

$$v_p(f) = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r^*(f)}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r^*(f)}} \quad (2.2)$$

El fenómeno de dispersión ocurre porque las moléculas de un medio dispersivo no son capaces de alinearse con el campo eléctrico externo a la velocidad que este cambia. Cuando las moléculas no son capaces de alinearse, el campo eléctrico interno no puede producirse efectivamente y la energía se libera como calor. La frecuencia del campo externo en la cual las moléculas no son capaces de alinearse se conoce como frecuencia de relajación  $f_{relax}$ .

La permitividad de los medios dispersivos se representa como la permitividad relativa compleja:  $\epsilon_r^*(f) = \epsilon'_r(f) - j\epsilon''_r(f)$ . La parte real de la permitividad ( $\epsilon'_r$ ) representa la alineación de las moléculas en dirección del campo eléctrico incidente y la parte imaginaria ( $\epsilon''_r$ ) representa las pérdidas dieléctricas. Como la conductividad es una fuente de pérdidas, a menudo se incluye en la parte imaginaria de la permitividad como se muestra en la ecuación (2.3), donde  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$  es la permitividad del vacío.

$$\epsilon_r^*(f) = \epsilon'_r(f) - j \left[ \epsilon''_r(f) + \frac{\sigma_{DC}}{2\pi f \epsilon_0} \right] \quad (2.3)$$

El comportamiento de la permitividad en función de la frecuencia a menudo se representa a través de modelos de dispersión. En el desarrollo de este proyecto se trabajó con dos modelos de permitividad: Cole-Cole [22] y Debye [13]. A través de estos modelos se describen los medios dispersivos utilizados durante el proyecto.

#### 2.4.1. Modelo Debye

El modelo Debye es uno de los primeros modelos propuestos para representar la permitividad en función de la frecuencia. Este modelo fue desarrollado por Peter Debye en 1929 [13], para representar el comportamiento de la permitividad de medios polares, como el agua y diferentes alcoholos.

La ecuación (2.4) corresponde a la ecuación del modelo Debye, donde  $\tau_0 = 1 / (2\pi f_{relax})$  es el tiempo de relajación,  $\epsilon_s$  es la permitividad estática (en frecuencia baja), y  $\epsilon_\infty$  es la permitividad en frecuencia infinita.

$$\epsilon_r^*(f) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{[1 + j2\pi f \tau_0]} - \frac{j\sigma_{DC}}{2\pi f \epsilon_0} \quad (2.4)$$

Teniendo en cuenta que en el rango de frecuencias de GPR (600 MHz - 6 GHz) la permitividad de la matriz sólida y del aire son constantes [9], la única fase que aporta al comportamiento dispersivo del suelo es el agua; por lo tanto el modelo Debye puede ser utilizado para describir los suelos.

#### 2.4.2. Modelo Cole-Cole

El modelo Cole-Cole es un modelo de dispersión basado en el modelo Debye, que se utiliza para describir medios donde la frecuencia de relajación está distribuida, es decir medios donde no se puede identificar un valor puntual para la frecuencia de relajación en el modelo Debye. Este modelo fue desarrollado por Cole y Cole en 1941 [22] y describe el comportamiento de la permitividad del agua y tejidos biológicos con mayor precisión que el modelo Debye.

La ecuación (2.5) corresponde a la ecuación del modelo Cole-Cole, donde  $\tau_0 = 1 / (2\pi f_{relax})$  es el tiempo de relajación,  $\varepsilon_s$  es la permitividad estática (en frecuencia baja),  $\varepsilon_\infty$  es la permitividad en frecuencia infinita, y  $0 \geq \alpha \geq 1$  corresponde a la constante de distribución de la frecuencia .

$$\varepsilon_r^*(f) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\left[1 + (j2\pi f\tau_0)^{1-\alpha}\right]} - \frac{j\sigma_{DC}}{2\pi f\varepsilon_0} \quad (2.5)$$

Ya que este modelo describe de mejor forma el comportamiento dispersivo del agua, que el modelo Debye, es el modelo que mejor describe el comportamiento dispersivo de los suelos [14, 16].

## 2.5. Caracterización de medios en gprMax

Modelar adecuadamente los medios en el simulador gprMax es fundamental para obtener respuestas fieles a los escenarios reales de detección con GPR. En las simulaciones con el método FDTD se define un dominio tridimensional compuesto por pequeñas celdas, cada una descrita por la caracterización eléctrica del medio que representa. La propagación de los campos electromagnéticos a través del dominio se calcula discretizando en tiempo y espacio las derivadas en las ecuaciones de Maxwell. Las componentes de los campos eléctrico y magnético se ubican en cada celda como se muestra en la Figura 2.3, esta configuración se denomina celda de Yee [23]. Las ecuaciones de actualización de las componentes de los campos (para medios no dispersivos) se muestran en las Ecuaciones (2.6)-(2.11), que representan la forma discreta de las ecuaciones de Maxwell.

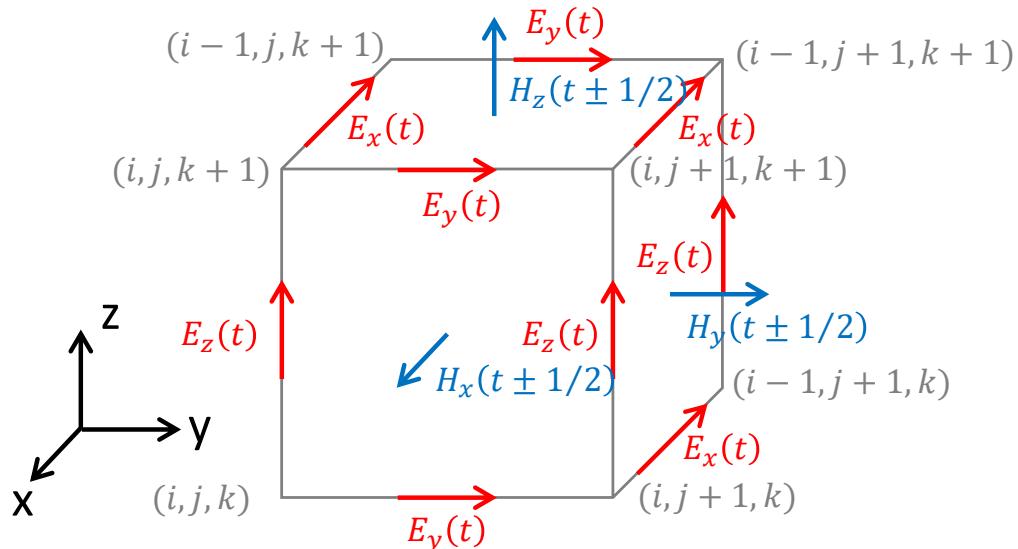


Figura 2.3: Celda de Yee para el algoritmo FDTD.

$$\vec{H}_x^{i,j,k} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) = \frac{c_0 \cdot \Delta t}{\mu^{i,j,k}} \left( \frac{\vec{E}_z^{i,j+1,k} (t + \Delta t) - \vec{E}_z^{i,j,k} (t + \Delta t)}{\Delta y} - \frac{\vec{E}_y^{i,j,k+1} (t + \Delta t) - \vec{E}_y^{i,j,k} (t + \Delta t)}{\Delta z} \right) + \vec{H}_x^{i,j,k} \left( t - \frac{\Delta t}{2} \right) \quad (2.6)$$

$$\vec{H}_y^{i,j,k} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) = \frac{c_0 \cdot \Delta t}{\mu^{i,j,k}} \left( \frac{\vec{E}_x^{i,j,k+1} (t + \Delta t) - \vec{E}_x^{i,j,k} (t + \Delta t)}{\Delta z} - \frac{\vec{E}_z^{i+1,j,k} (t + \Delta t) - \vec{E}_z^{i,j,k} (t + \Delta t)}{\Delta x} \right) + \vec{H}_y^{i,j,k} \left( t - \frac{\Delta t}{2} \right) \quad (2.7)$$

$$\vec{H}_z^{i,j,k} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) = \frac{c_0 \cdot \Delta t}{\mu^{i,j,k}} \left( \frac{\vec{E}_y^{i+1,j,k} (t + \Delta t) - \vec{E}_y^{i,j,k} (t + \Delta t)}{\Delta x} - \frac{\vec{E}_x^{i,j+1,k} (t + \Delta t) - \vec{E}_x^{i,j,k} (t + \Delta t)}{\Delta y} \right) + \vec{H}_z^{i,j,k} \left( t - \frac{\Delta t}{2} \right) \quad (2.8)$$

$$\vec{E}_x^{i,j,k} (t + \Delta t) = \frac{c_0 \cdot \Delta t}{\varepsilon^{i,j,k}} \left( \frac{\vec{H}_z^{i,j,k} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \vec{H}_z^{i,j-1,k} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right)}{\Delta y} - \frac{\vec{H}_y^{i,j,k} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \vec{H}_y^{i,j,k-1} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right)}{\Delta z} \right) + \vec{E}_x^{i,j,k} (t) \quad (2.9)$$

$$\vec{E}_y^{i,j,k} (t + \Delta t) = \frac{c_0 \cdot \Delta t}{\varepsilon^{i,j,k}} \left( \frac{\vec{H}_x^{i,j,k} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \vec{H}_x^{i,j,k-1} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right)}{\Delta z} - \frac{\vec{H}_z^{i,j,k} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \vec{H}_z^{i-1,j,k} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right)}{\Delta x} \right) + \vec{E}_y^{i,j,k} (t) \quad (2.10)$$

$$\vec{E}_z^{i,j,k} (t + \Delta t) = \frac{c_0 \cdot \Delta t}{\varepsilon^{i,j,k}} \left( \frac{\vec{H}_y^{i,j,k} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \vec{H}_y^{i-1,j,k} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right)}{\Delta x} - \frac{\vec{H}_x^{i,j,k} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \vec{H}_x^{i,j,k-1} \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right)}{\Delta y} \right) + \vec{E}_z^{i,j,k} (t) \quad (2.11)$$

Para que las ecuaciones de actualización puedan calcularse efectivamente para los campos en cada celda, es necesario tener la caracterización eléctrica de cada celda en el dominio simulado. A continuación se presenta la forma de construir las propiedades eléctricas de los medios en gprMax para medios no dispersivos y medios dispersivos.

### 2.5.1. Medios no dispersivos

Medios no dispersivos hace referencia a los medios del dominio de simulación que tienen propiedades eléctricas independientes de la frecuencia y el espacio. Se definen las propiedades de los medios en gprMax, utilizando el comando **#material:** **a b c d name**; donde **a** es el valor de la permitividad relativa  $\varepsilon_r$ , **b** es el valor de la conductividad  $\sigma$  en Siemens/metro, **c** es el valor de la permeabilidad relativa  $\mu_r$ , **d** es el valor de la pérdida magnética  $\sigma_*$  en Ohms/metro, y **name** es un identificador del material definido. Se construyen los medios con las propiedades definidas utilizando los diferentes comandos de geometría, por ejemplo si el medio a construir es una esfera de un material definido se utiliza el comando **#sphere:**. Los diferentes comandos de geometría por defecto son:

- **#edge:**, introduce un cable sobre el vértice de una celda de Yee.
- **#plate:**, introduce una placa cuadrada infinitamente delgada.
- **#triangle:**, introduce una placa triangular infinitamente delgada o un prisma triangular dependiendo de los parámetros del comando.
- **#box:**, introduce un paralelepípedo rectangular.
- **#sphere:**, introduce una esfera.
- **#cylinder:**, introduce un cilindro.
- **#cylindrical\_sector:**, introduce una sección de cilindro.
- **#fractal\_box:**, introduce un paralelepípedo rectangular con propiedades definidas por fractales para funciones especiales.

Existe también la posibilidad de combinar estos comandos para crear objetos con cualquier geometría requerida, incluso definiendo celda por celda los materiales que componen un medio.

### 2.5.2. Medios con dispersión Debye

Para modelar la dispersión en FDTD es importante conocer como se implementan los modelos en el método de simulación. Hay tres modelos que gprMax implementa la dispersión en las simulaciones: modelo Drude, modelo Lorentz y modelo Debye. Ya que la dispersión de los medios es un comportamiento de la frecuencia y la simulación se hace sobre el dominio del tiempo, se utiliza la transformada de Fourier para obtener los modelos de permitividad en el dominio del tiempo.

En particular para el problema de suelos, el modelo más apropiado entre los tres es el modelo Debye. La transformada de Fourier del modelo Debye (ecuación (2.12)) se puede implementar con facilidad en el algoritmo de FDTD ya que es una función exponencial. Transformar un modelo Cole-Cole al dominio del tiempo resulta muy complicado y no se puede implementar fácilmente en el algoritmo de FDTD, debido a que el término  $j\omega$  de estos modelos se eleva a una potencia no entera y resulta en una derivada fraccional en el dominio del tiempo.

$$\chi_p(t) = \frac{\Delta\epsilon_{rp}}{\tau_p} \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) \quad \chi_p(t) = \epsilon_{rp}(t) - 1 \quad \Delta\epsilon_{rp} = \epsilon_{rsp} - \epsilon_{r\infty} \quad (2.12)$$

#### Dispersión Cole-Cole como dispersión Debye con múltiples polos

Como se discute anteriormente, el modelo Cole-Cole en general es el modelo más apropiado para describir la dispersión del agua y por lo tanto de los suelos. Como el método no se puede implementar directamente en gprMax por la complejidad de su transformada al dominio del tiempo, este modelo puede aproximarse mediante el uso del modelo Debye con la suma de múltiples polos. En la Ecuación (2.13) se presenta el modelo de múltiples polos con el cual se representa el modelo Cole-Cole en FDTD (sin tener en cuenta el término de conductividad); donde:  $N_p$  es la cantidad de polos que representan el modelo,  $a_p$  es el peso de cada polo y  $\omega_p$  es la frecuencia de relajación para cada polo.

$$\epsilon_r^*(\omega) = \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \sum_{p=1}^{N_p} \frac{a_p}{1 + j \frac{\omega}{\omega_p}} \quad (2.13)$$

Para implementar las propiedades electromagnéticas de los suelos descritos por el modelo Cole-Cole en gprMax, se construyó un algoritmo que implementa una técnica de optimización por enjambre de partículas—PSO (Particle Swarm Optimization)—y un algoritmo de optimización lineal propuesto por Kelley et. al [15]. Esta optimización obtiene los parámetros del modelo Debye de múltiples polos que representa el modelo Cole-Cole a utilizar. En la Figura 2.4 se muestran las generalidades del algoritmo utilizado para la optimización.

Como ilustración del modelo Cole-Cole y la conversión al modelo Debye de múltiples polos, se utiliza la descripción Cole-Cole de una arena húmeda [14] sobre el rango de frecuencias de 100 kHz – 10 GHz. Las propiedades de la arena húmeda para el modelo Cole-Cole se muestran en la tabla 2.1. La permitividad relativa en función de la frecuencia obtenida del modelo Cole-Cole se presenta en la figura 2.5.

Modelo Cole-Cole para la arena húmeda			
$\tau_0$	$\alpha$	$\epsilon_s$	$\epsilon_\infty$
$11 \times 10^{-9}$ s	0.25	8.9	5.6

Tabla 2.1: Parámetros del modelo Cole-Cole para arena húmeda tomados de [14].

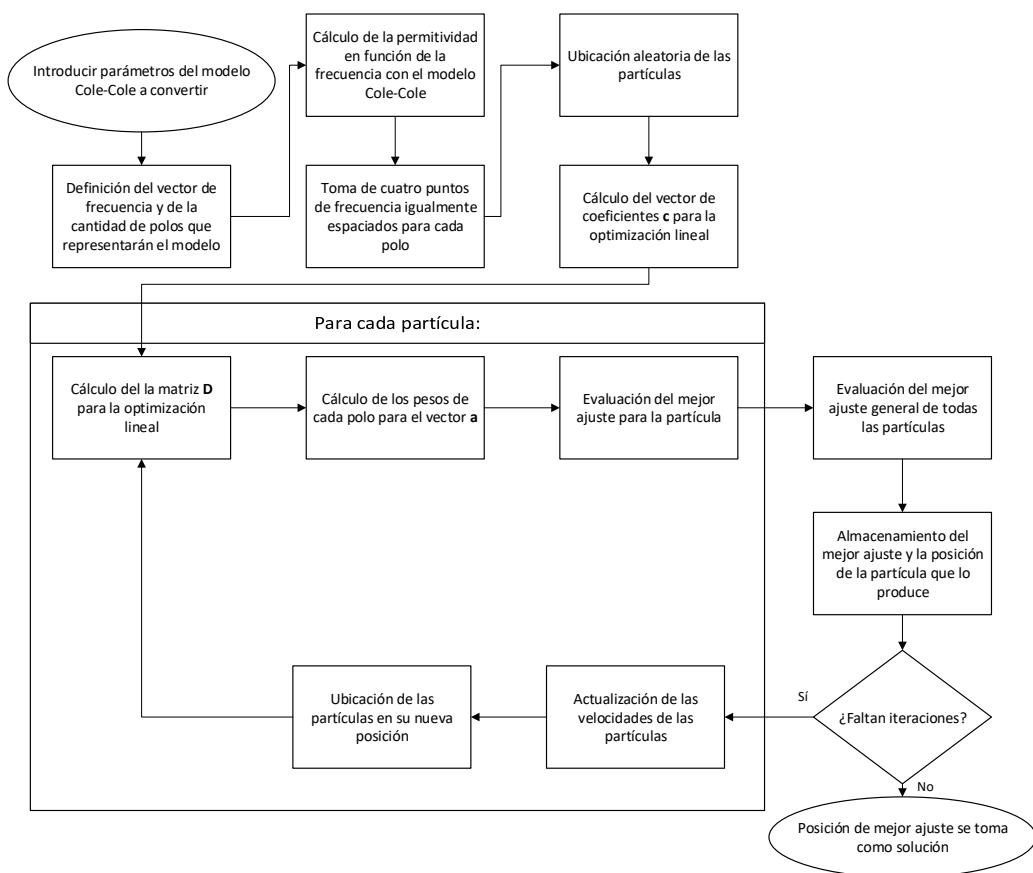


Figura 2.4: Algoritmo de conversión del modelo Cole-Cole a Debye de múltiples polos.

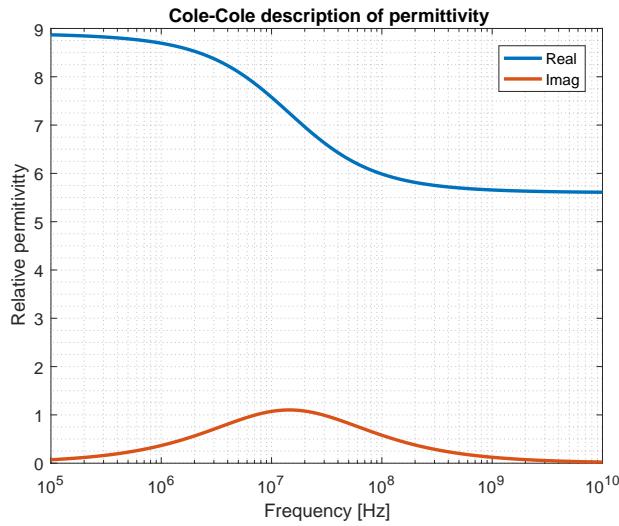


Figura 2.5: Permitividad relativa compleja para el modelo Cole-Cole de arena húmeda.

El algoritmo desarrollado calcula automáticamente el número de polos Debye que considera necesarios para representar al modelo sobre el rango de frecuencias propuesto. Los parámetros para el modelo Debye de múltiples polos se presentan en la tabla 2.2 y la comparación entre el modelo Cole-Cole y el modelo de múltiples polos se presenta en la figura 2.6. Se puede ver que el ajuste del modelo con 7 polos es muy bueno para todo el rango de frecuencias. A mayor cantidad de polos el algoritmo FDTD debe realizar más cálculos y por lo tanto la simulación será más demorada, así que el algoritmo es flexible en cuanto a definir el rango de frecuencias de interés y la cantidad de polos a utilizar.

Modelo Debye de 7 polos para la arena húmeda							
$\varepsilon_s$	$\varepsilon_\infty$	$\omega_1$	$a_1$	$\omega_2$	$a_2$	$\omega_3$	$a_3$
8.9	5.6	$7.3 \times 10^4$	0.0485	$2.9 \times 10^6$	0.1960	$9.5 \times 10^6$	0.2039
$\omega_4$	$a_4$	$\omega_5$	$a_5$	$\omega_6$	$a_6$	$\omega_7$	$a_7$
$1.9 \times 10^7$	0.1940	$2.1 \times 10^7$	0.1953	$1.0 \times 10^8$	0.1548	$2.8 \times 10^9$	0.0207

Tabla 2.2: Parámetros del modelo Debye de 7 polos obtenidos con el algoritmo de optimización —Frecuencias en Hz.

### Implementación de los comandos en gprMax

La dispersión de los materiales puede representarse fácilmente en FDTD mediante el modelo Debye. El modelo Debye además permite definir múltiples frecuencias de relajación para un material mediante la suma de polos. Es decir los materiales representados por el modelo Debye pueden tener un comportamiento en frecuencia Los medios con dispersión Debye en gprMax se crean utilizando el comando `#material`: definiendo en el campo de permitividad, la permitividad relativa en frecuencia infinita  $\varepsilon_\infty$ , junto con el comando `#add_dispersion_debye: a b c d e ... name;` donde  $a$  es la cantidad de polos Debye que representan el material,  $b$  es el valor  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{s_1} - \varepsilon_\infty$  para el primer polo,  $c$  es el valor del tiempo de relajación en segundos para el primer polo  $\tau_1$ ,  $d$  es el valor  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{s_2} - \varepsilon_\infty$  para

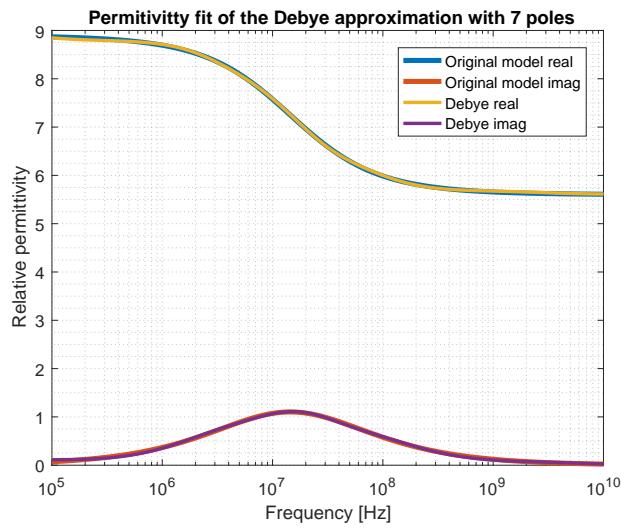


Figura 2.6: Permitividad relativa compleja para el modelo Cole-Cole y para el modelo Debye de 7 polos de arena húmeda.

el segundo polo, y así sucesivamente se describe cada porlo, `name` es un identificador del material definido en el comando `#material:` para decirle al simulador a que material añadirle dispersión.

## Capítulo 3

# Técnicas de medición de las propiedades dieléctricas

## 3.1. Consideraciones generales para el estudio y la selección de las técnicas de medición

La medición de las propiedades dieléctricas de materiales busca obtener los valores de permitividad relativa compleja  $\epsilon_r^*$  y la permeabilidad relativa compleja  $\mu_r^*$ . Adicionalmente, dados los modelos que describen al suelo es importante hallar la conductividad de los mismos  $\sigma_{DC}$ .

Para una caracterización dieléctrica completa es necesario obtener la permitividad y la permeabilidad,  $\epsilon_r^*$  y  $\mu_r^*$ , sin embargo según las mediciones de [9] los valores típicos de  $\mu_r^* \leq 1.1$  incluso en unidades de suelo con alto contenido de minerales ferromagnéticos. Por esta razón se asume para todos los casos  $\mu_r^* = 1$  y no es de interés la medición de la permeabilidad relativa compleja. Las técnicas de medición estudiadas buscan obtener la conductividad  $\sigma_{DC}$  y la permitividad relativa compleja de los suelos  $\epsilon_r^*$ .

Con todo lo anterior en mente, lo que se busca de la técnica de medición a seleccionar es: medición de la permitividad relativa compleja  $\epsilon_r^*$ , medición de la conductividad  $\sigma_{DC}$ , y fácil implementación en campo.

A continuación se exponen una técnicas muy utilizadas para la caracterización de materiales:

## 3.2. Método de transmisión/reflexión

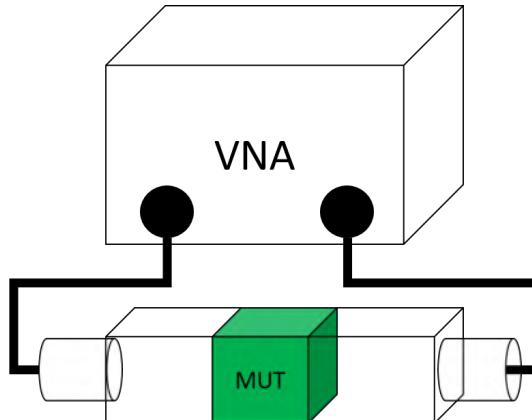


Figura 3.1: Medición utilizando el método de transmisión/reflexión con una guía de onda

- **Dominio:** Frecuencia
- **Equipo necesario:** Analizador vectorial de redes (VNA) y guía de onda o línea de transmisión coaxial.

- **Parámetros medidos:**  $\epsilon_r^*$  y  $\mu_r^*$
- **Principio de medición:** Una muestra del material a caracterizar se ubica en una sección de la línea de transmisión. Utilizando un dos puertos del VNA se miden los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  sobre la línea de transmisión. Se utiliza un método computacional para obtener  $\epsilon_r^*$  y  $\mu_r^*$  de los parámetros  $S$ .
- **Calibración:** Primero se debe calibrar los puertos del VNA con una calibración estándar Corto-Abierto-Directo-Carga (Short-Open-Through-Load: SOTL). El procedimiento de calibración requiere que se ajuste un factor de fase para la distancia entre los puertos de la línea de transmisión y la muestra del material. Una vez se tenga ajustada la fase, se debe hacer una lectura de los parámetros  $S$  con el elemento que sostiene la muestra en la línea de transmisión únicamente para poder cancelar la influencia de este elemento en la medición. [24]
- **Ventajas:** Se puede determinar la permitividad y la permeabilidad del material a caracterizar. Obtiene mediciones confiables de materiales con medias y altas pérdidas.
- **Desventajas:** *Poco aplicable para mediciones de suelo en campo.* Procedimiento de ubicación de la muestra, la muestra debe estar en la mitad exacta de la línea de transmisión y debe ocupar toda la sección transversal sin dejar espacios de aire. Tiene baja precisión cuando la longitud de la muestra es un múltiplo de media longitud de onda.

### 3.3. Línea de transmisión coaxial con terminación en abierto

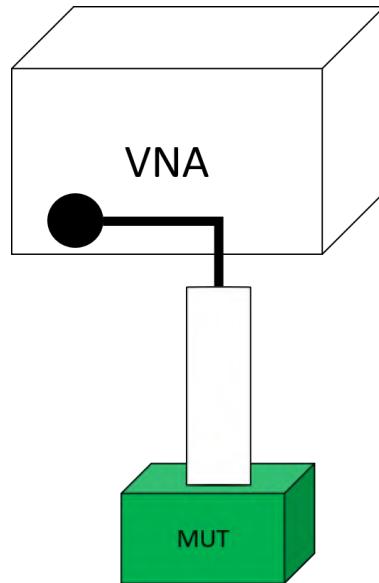


Figura 3.2: Medición utilizando una sonda coaxial con terminación en abierto

- **Dominio:** Frecuencia
- **Equipo necesario:** Analizador vectorial de redes (VNA) y sonda coaxial con terminación en abierto
- **Parámetros medidos:**  $\epsilon_r^*$

- **Principio de medición:** La sonda coaxial se presiona contra el material a caracterizar o se introduce en el material. Utilizando un puerto del VNA se mide el parámetro  $S_{11}$  sobre el puerto de la sonda. Se utiliza un método computacional para obtener  $\epsilon_r^*$  del parámetro  $S_{11}$ .
- **Calibración:** Existen dos posibles métodos para proceder con la calibración. El primero es utilizando tres líquidos con propiedades conocidas en los cuales se sumerge la sonda, los líquidos reemplazan la calibración estándar de un puerto Corto-Abierto-Carga. El segundo método indica que primero se debe calibrar el puerto del VNA con una calibración estándar de un puerto Corto-Abierto-Carga. Después, utilizando la función de ventaneo en el tiempo se deben minimizar las reflexiones ocasionadas por la conexión de la sonda. Posteriormente, se mide el coeficiente de reflexión de tres líquidos con propiedades conocidas para encontrar la función de transferencia de la sonda. Una vez se tiene la función de la sonda se procede con la medición y a los datos obtenidos se le resta la influencia de la sonda. [24]
- **Ventajas:** No se requiere de manipulación de la muestra. Mediciones no invasivas. Solo se requiere una calibración para muchas mediciones.
- **Desventajas:** Solo es posible obtener los parámetros de reflexión.

### 3.4. Método de espacio libre

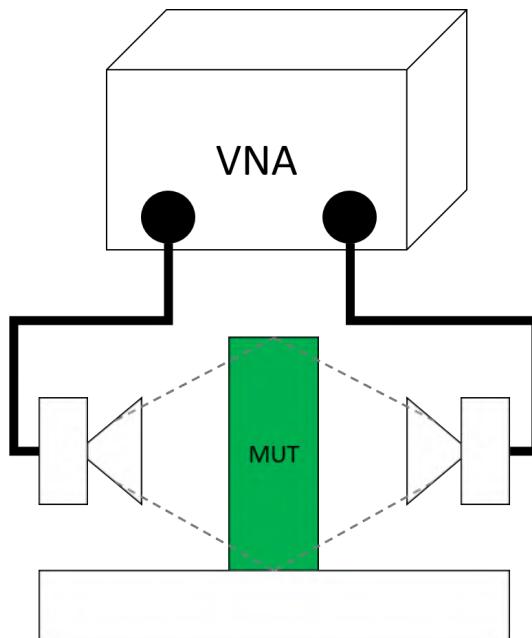


Figura 3.3: Medición utilizando el método de espacio libre

- **Dominio:** Frecuencia
- **Equipo necesario:** Analizador vectorial de redes (VNA), dos antenas directivas de banda ultra-ancha y soporte de la muestra.
- **Parámetros medidos:**  $\epsilon_r^*$  y  $\mu_r^*$

- **Principio de medición:** Dos antenas directivas de banda ultra-ancha se enfrentan a través de una muestra considerablemente grande del material a medir. Las antenas se conectan al VNA y se miden los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$ . Se utiliza un método computacional para obtener  $\epsilon_r^*$  y  $\mu_r^*$  de los parámetros  $S$ .
- **Calibración:** Los puertos del VNA deben ser calibrados con uno de los siguientes métodos: Directo-Reflejado-Linea (TRL), Trought-Reflejado-Carga (TRM) o Linea-Reflejado-Linea (RLR). Una vez se tenga la calibración de los puertos se deben obtener los parámetros  $S$  para el soporte de la muestra vacío para poder cancelar la influencia de este elemento en la medición. [24]
- **Ventajas:** No se requiere de manipulación de la muestra. Permite medir muestras de material en condiciones extremas como materiales muy calientes. Se puede determinar la permitividad y la permeabilidad del material a caracterizar.
- **Desventajas:** *Poco aplicable para mediciones de suelo en campo.* Se requiere de una muestra grande y plana del material a caracterizar. La medición se ve afectada por múltiples reflexiones entre la antena y la superficie del material. Hay efectos de difracción en las esquinas de la muestra.

### 3.5. Método de cavidad resonante

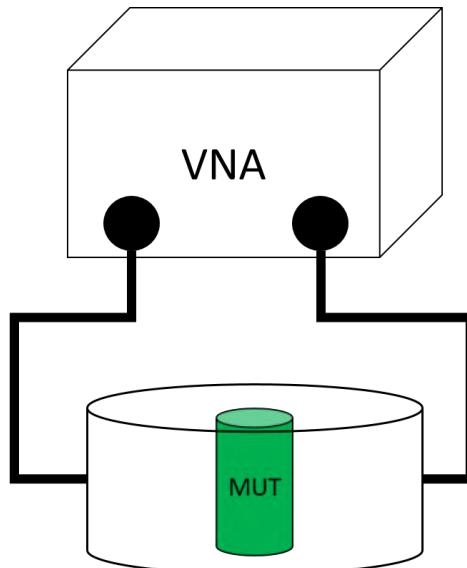


Figura 3.4: Medición utilizando cavidad resonante

- **Dominio:** Frecuencia
- **Equipo necesario:** Analizador vectorial de redes (VNA) y cavidad resonante.
- **Parámetros medidos:**  $\epsilon_r^*$  y  $\mu_r^*$
- **Principio de medición:** Una muestra del material se ubica dentro de la cavidad resonante. Utilizando el VNA se mide el factor-Q para encontrar la frecuencia de resonancia. Utilizando el volumen de la muestra, la frecuencia de resonancia y el factor-Q es posible hallar la permitividad y la permeabilidad del material.

- **Calibración:** No se requiere hacer calibración de los puertos del VNA. Se debe hacer una medición del factor-Q y la frecuencia de resonancia con la cavidad vacía. La permitividad y la permeabilidad se hallan a partir del cambio en el factor-Q y la frecuencia de resonancia. [24]
- **Ventajas:** Permite medir las propiedades de muestras muy pequeñas.
- **Desventajas:** *Poco aplicable para mediciones de suelo en campo.* Se requiere de un VNA de alta resolución. Da valores de las propiedades dieléctricas en anchos de banda estrechos.

### 3.6. Onda de suelo

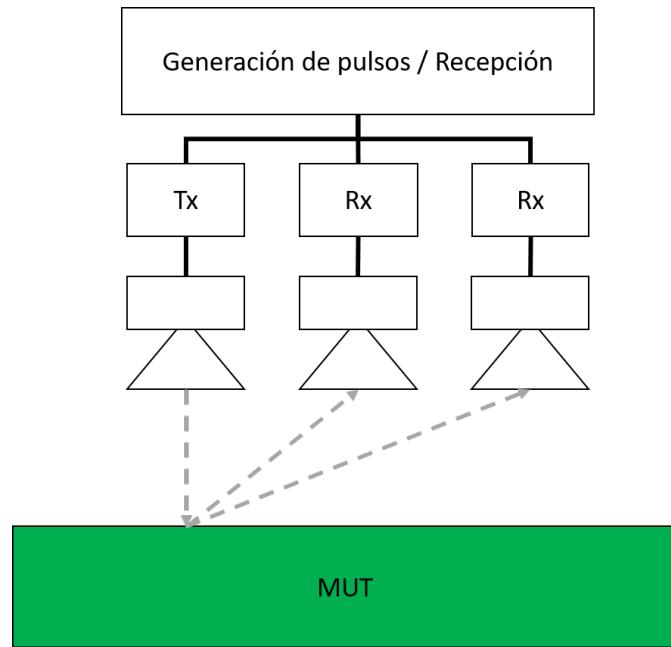


Figura 3.5: Medición utilizando el método de onda de suelo

- **Dominio:** Tiempo
- **Equipo necesario:** Generador y receptor de pulsos de banda ultra-ancha de tres canales, y tres antenas de banda ultra-ancha.
- **Parámetros medidos:**  $\epsilon'_r$
- **Principio de medición:** Una onda generada por el generador de pulsos de banda ultra-ancha es transmitido con una antena dirigida hacia la superficie del suelo. La onda de suelo viaja a través de la interfaz suelo-aire. Se mide el tiempo de vuelo de la onda, hasta que llega a las antenas receptoras; cada una ubicada a una distancia conocida de la antena transmisora. La diferencia del tiempo de vuelo de la onda para llegar a ambas antenas  $\Delta t$  se utiliza para calcular la parte real permitividad relativa:

$$\epsilon'_r = \frac{c_0^2 \Delta t^2}{\Delta x^2}$$

Donde  $c_0$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $\Delta t$  es la diferencia de tiempo de vuelo de la onda entre las dos antenas receptoras y  $\Delta x$  es la separación entre las dos antenas.

- **Calibración:** Para obtener buenas mediciones se recomienda utilizar antenas blindadas para evitar introducir señales de acoplamiento mutuo. En caso de usar antenas no blindadas, se debe medir el fenómeno de acoplamiento mutuo para contrarrestarlo de la señal medida. Es necesario calibrar la sincronización entre los dos canales receptores para asegurar que se encuentran en la misma base de tiempo. [25]
- **Ventajas:** Es una técnica muy rápida que *puede ser utilizada en campo* para barrer aras muy grandes.
- **Desventajas:** Solo se puede determinar la parte real de la permitividad relativa  $\epsilon'_r$  y no la permitividad relativa compleja, con la medición de velocidad de propagación.

### 3.7. Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR)

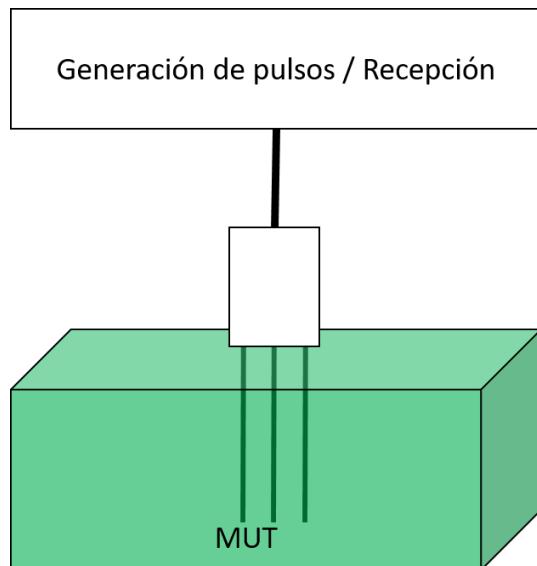


Figura 3.6: Medición utilizando el método de TDR

- **Dominio:** Tiempo
- **Equipo necesario:** Generador y receptor de pulsos, y sonda TDR.
- **Parámetros medidos:**  $\epsilon_r^*$  y  $\sigma_{DC}$
- **Principio de medición:** Un pulso cuadrado se transmite a través de una línea coaxial hacia una sonda de TDR enterrada en el suelo. La sonda actúa como una línea de transmisión con un dieléctrico de las propiedades correspondientes al suelo. La onda reflejada es medida para obtener el retardo de la onda, la attenuación y el estado estable de la onda reflejada. Con estos parámetros es posible conocer la permitividad dieléctrica compleja  $\epsilon_r^*$  y la conductividad  $\sigma$ .
- **Calibración:** El procedimiento de calibración, consiste en llevar a cabo mediciones con tres materiales de propiedades dieléctricas conocidas. Esto permite conocer el plano de referencia para la sonda, la longitud de la misma y las funciones de error que se determinan comparando la respuesta teórica con la respuesta medida.

- **Ventajas:** Es una técnica muy precisa que permite conocer la permitividad relativa compleja de un suelo. Es fácilmente implementable para mediciones en campo. Fácilmente implementable para mediciones en laboratorio. Permite medir la conductividad y la permitividad relativa compleja.
- **Desventajas:** Mediciones lentas de campos muy grandes, sin embargo al utilizar múltiples sondas con un multiplexor se puede compensar la velocidad de medición en campos grandes.

### 3.8. Selección de la técnica de medición

Teniendo en cuenta los tres criterios de selección para la técnica de medición, se seleccionó la técnica de TDR. Esta técnica brinda la posibilidad de medir la permitividad relativa compleja y la conductividad de los suelos en campo. Ya que la sonda se inserta en los suelos no es necesario recoger muestras de los mismos, lo que garantiza que sus propiedades de humedad y compactación no serán alteradas en la medición. En el capítulo 4 se explican detalladamente los principios de medición con TDR, la selección de equipos comerciales y el diseño de las sondas para la medición.

## Capítulo 4

# Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR)

La reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) es una técnica ampliamente utilizada para determinar la permitividad y la conductividad de dieléctricos líquidos, gaseosos y semi-sólidos. Las mediciones en suelos se hacen enterrando una sonda, que reproduce el comportamiento de una línea de transmisión coaxial, en la muestra a caracterizar. Comercialmente muchos equipos de TDR, enfocados en la problemática de los suelos, son promovidos como medidores de saturación (contenido de agua en el suelo) porque TDR permite obtener la permitividad relativa aparente ( $K_a$ ) del suelo y este parámetro se relaciona con la saturación del suelo por medio de una ecuación empírica presentada por Topp en 1980 [26].

La técnica de TDR permite obtener mucha más información de los suelos cuando se realiza un análisis completo sobre la onda reflejada, en tiempo y en frecuencia [21, 27, 28]. Para este proyecto de grado, es de interés el comportamiento de los suelos en el rango de frecuencias de GPR para desminado humanitario (600 – 6 GHz), utilizando la técnica de TDR. Mediante un algoritmo presentado más adelante en este capítulo, se logró recuperar la permitividad relativa compleja  $\epsilon_r^*(f)$  y la conductividad eléctrica  $\sigma_{DC}$  de diferentes suelos colombianos a partir de las mediciones de TDR.

## 4.1. Principios de medición

El análisis de las ondas de TDR se hace sobre las ondas reflejadas por una línea de transmisión cuando es excitada por una función paso de voltaje. Al analizar la señal reflejada se busca conocer la respuesta-impulso del suelo,  $s(t)$ . Ya que el TDR es una técnica en el dominio del tiempo, es conveniente partir de la definición de la onda reflejada en este dominio que se puede expresar como la convolución entre la onda transmitida y respuesta al impulso del sistema de medición [27]:

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} v_0(t - \tau) s(\tau) d\tau \quad (4.1)$$

Donde  $r(t)$  es la onda reflejada,  $v_0(t)$  es la onda incidente y  $s(t)$  es la respuesta al impulso del sistema. Esta respuesta al impulso incluye los efectos del cable, la sonda, los conectores y el suelo.

Aplicando la transformada de Fourier se puede expresar, la convolución en el dominio del tiempo de la ecuación (4.1), como una multiplicación en el dominio de la frecuencia:

$$R(f) = V_0(f) S(f) \quad (4.2)$$

Donde  $R(f)$ ,  $V_0(f)$  y  $S(f)$ , son las transformadas de Fourier de  $r(t)$ ,  $v_0(t)$  y  $s(t)$ . A  $S(f)$  se le conoce como la función de transferencia del sistema.

Con las mediciones de TDR es posible determinar la función de transferencia del sistema ya que se conoce el comportamiento de la onda incidente ( $v_0(t)$ ,  $V_0(f)$ ) y se mide la onda reflejada ( $r(t)$ ,  $R(f)$ ). A partir de la función

de transferencia  $S(f)$  es posible conocer la respuesta al impulso  $s(t)$ , utilizando la transformada inversa de Fourier. De las señales obtenidas se determinan propiedades electromagnéticas del suelo.

El instrumento de medición excitado por los pulsos en la técnica TDR, es una sonda que reproduce el comportamiento de una línea de transmisión coaxial. A esta sonda se le conoce como sonda TDR o sonda coaxial. En la figura 4.1 se observa un esquemático de los componentes principales de un sistema de medición TDR, que incluyen: un generador de pulsos, un módulo de adquisición de datos, una unidad de sincronización y la sonda TDR.

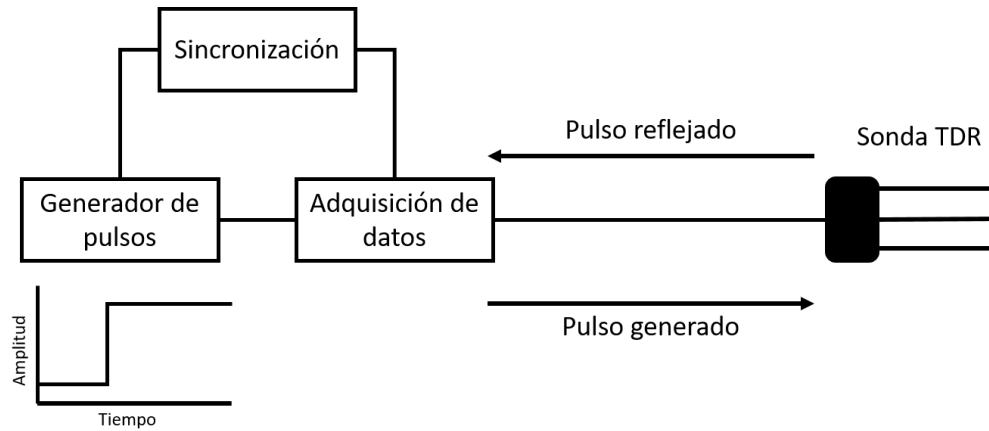


Figura 4.1: Diagrama esquemático de un sistema TDR con sus componentes principales.

Para obtener toda la información posible de una onda de TDR se debe poder visualizar la señal reflejada hasta su estado estable. El estado estable se alcanza en el instante de tiempo cuando ya se han sumado los efectos de las múltiples reflexiones sobre la sonda, debidas al acople del material a caracterizar con la línea que alimenta la sonda. Del análisis en el dominio del tiempo sobre la señal reflejada, se obtiene la permitividad aparente  $K_a$ , la conductividad eléctrica  $\sigma_{DC}$ , la permitividad en la frecuencia cero  $\epsilon_s$  y un estimado de la permitividad en frecuencia infinita  $\epsilon_\infty$ . Del análisis en el dominio de la frecuencia sobre la señal reflejada combinado con los resultados del análisis en el dominio del tiempo, se obtiene la permitividad relativa compleja dependiente de la frecuencia  $\epsilon_r^*(f)$ . En la figura 4.2 se resume el análisis que se hace sobre la señal reflejada.

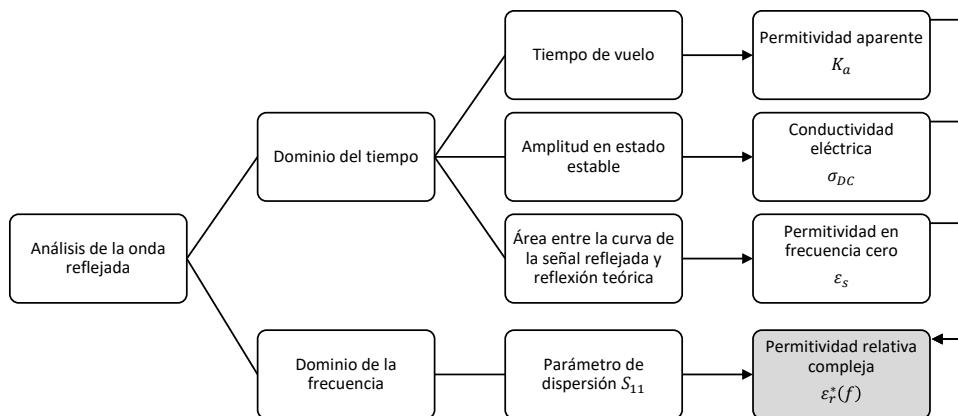


Figura 4.2: Resumen del análisis sobre la onda reflejada.

La sonda de TDR es la línea de transmisión por la cual se propaga el pulso. La diferencia de impedancias

entre el cable coaxial que alimenta la sonda, el cabezal de la sonda y la sección de la sonda inmersa en el material causa múltiples reflexiones como se muestra en la figura 4.3. Es importante tener en cuenta que los análisis de la amplitud en estado estable, del área entre la curva de la señal reflejada y la señal ideal, y el parámetro de dispersión  $S_{11}$  requieren que la señal haya alcanzado el estado estable; mientras que el análisis de tiempo de vuelo utiliza únicamente la información de la primera reflexión.

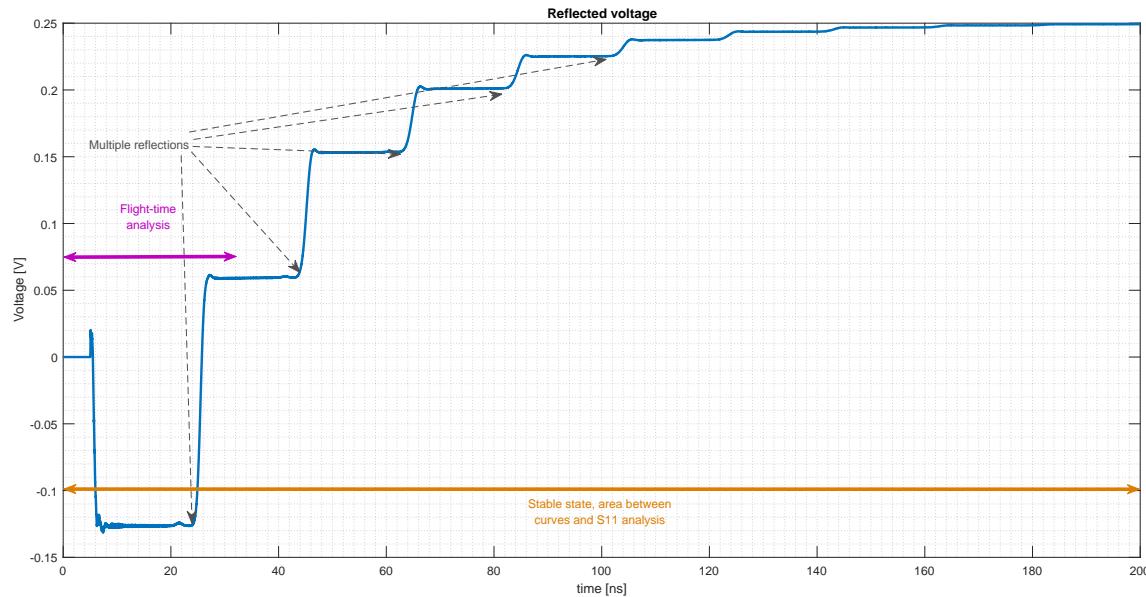


Figura 4.3: Señal reflejada por sonda inmersa en agua desionizada. Se muestra en la gráfica las múltiples reflexiones causadas por el acople de impedancias y las bases de tiempo para los diferentes análisis a realizar sobre la onda.

#### 4.1.1. Sonda TDR

Existen varios tipos de configuraciones de sondas utilizadas en mediciones TDR, en la figura 4.4 tomada de [21], se muestran diferentes configuraciones de sondas TDR.

Las sonda reproduce el comportamiento de una línea de transmisión coaxial [21, 27, 28], que al ser enterrada adopta al suelo como dieléctrico de separación entre su conductor interno y su conductor externo. En la figura 4.5 se muestra una sonda de tres varillas, con sus dimensiones y componentes en las configuraciones que se utilizaron para este proyecto.

La respuesta en frecuencia de una línea de transmisión coaxial es conocida y está dada por las ecuaciones (4.3 - 4.4).

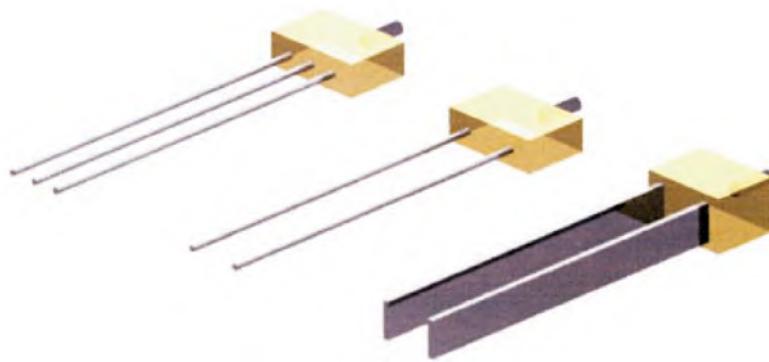


Figura 4.4: Tres diseños de sonda TDR. De izquierda a derecha: sonda de tres varillas, sonda de dos varillas, sonda de placas paralelas. Tomada de [21].

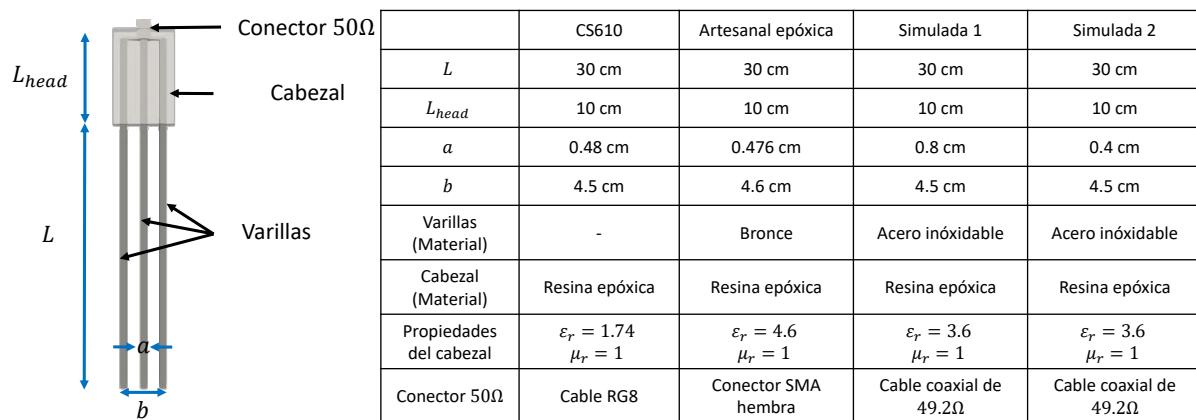


Figura 4.5: Sonda TDR de tres varillas y configuración de las dimensiones y materiales utilizados en el proyecto.

$$S_{11}(f) = \frac{\rho^* + \exp(-2\gamma L)}{1 + \rho^* \exp(-2\gamma L)} \quad \rho^* = \frac{1 - z[\varepsilon^*(f)]^{1/2}}{1 + z[\varepsilon^*(f)]^{1/2}} \quad \gamma L = j2\pi f L \frac{[\varepsilon^*(f)]^{1/2}}{c_0} \quad (4.3)$$

$$z = \frac{Z_c}{Z_p} \quad Z_p = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r^*}} \ln \frac{b}{a} \quad \varepsilon^*(f) = \varepsilon'(f) - j \left[ \varepsilon''(f) + \frac{\sigma_{DC}}{2\pi f c_0} \right] \quad (4.4)$$

En las ecuaciones (4.3 - 4.4):  $L$  es el largo de la sonda,  $\sigma_{DC}$  es la conductividad del suelo,  $c_0$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $\varepsilon'(f)$  es la parte real de la permitividad relativa,  $\varepsilon''(f)$  es la parte imaginaria de la permitividad relativa,  $\gamma$  es el coeficiente de atenuación de la sonda,  $Z_c$  es la impedancia del cable que alimenta la sonda,  $Z_p$  es la impedancia de la sonda en el aire ( $\varepsilon_r^* = 1$ ),  $b$  es la distancia de separación entre las varillas exteriores y  $a$  es el diámetro de las varillas. Las ecuaciones (4.3 - 4.4) indican que la función de transferencia de la sonda dependen de  $\varepsilon^*(f)$ ,  $z$  y  $L$ . De estos parámetros  $z$  y  $L$  son conocidos ya que vienen de la geometría de la sonda, dejando como variable a  $\varepsilon^*(f)$ .

#### 4.1.2. Permitividad relativa aparente

El primer análisis sobre la onda reflejada es con el fin de encontrar la permitividad relativa aparente. Con la técnica de TDR se puede medir la velocidad de propagación de la señal electromagnética generada por la función paso que excita la sonda. Esta velocidad, a la cual se propaga la onda, depende de la permitividad y la permeabilidad del material por la cual se propague y está dada por la ecuación 4.5.

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \quad (4.5)$$

Como se menciona en el capítulo 2 la permeabilidad magnética relativa de los suelos se asume como  $\mu_r = 1$ . La ecuación 4.5 asume que la permitividad del medio por el cual se propaga la onda es constante pero como los suelos son un medio dispersivo, se tiene que la velocidad de propagación no es la misma para todas las frecuencias. Por lo tanto el término a determinar con la velocidad de propagación observada en el dominio del tiempo se denomina permitividad relativa aparente,  $K_a$ . Por lo tanto la ecuación 4.5 se puede expresar como:

$$v_p = \frac{c_0}{\sqrt{K_a}} \quad (4.6)$$

Como en la medición TDR la onda se propaga a través de una sonda coaxial de longitud conocida  $L$ , es posible obtener la velocidad de propagación utilizando el tiempo de vuelo de la onda,  $\Delta t$ . El tiempo de vuelo es el tiempo que tarda el pulso en viajar una distancia conocida, puede ser la distancia entre el punto inicial y el final de la sonda o la distancia de ida y vuelta al punto inicial. La velocidad de propagación está dada por la ecuación 4.7. Para el tiempo de vuelo en dos vías de la onda (two-way travel time) es decir para el trayecto de ida y vuelta al punto inicial, la distancia viajada es  $D = 2L$ . Para el tiempo de vuelo en una vía de la onda (one-way travel time) es decir para el trayecto entre el punto inicial y el final de la sonda, la distancia viajada es  $D = L$ . Generalmente los equipos de TDR miden a través de un único puerto así que los tiempos obtenidos siempre corresponden al trayecto de dos vías, sin embargo algunos realizan un pre-procesamiento sobre la señal reflejada para entregar la información con el tiempo correspondiente al trayecto de una vía.

$$v_p = \frac{D}{\Delta t} = \frac{2L}{\Delta t_{two way}} = \frac{L}{\Delta t_{one way}} \quad (4.7)$$

Dejando la permitividad aparente en términos de los valores conocidos es posible calcularla fácilmente con la ecuación 4.8.

$$K_a = \frac{c_0^2}{v_p^2} = \frac{c_0^2 \Delta t^2}{D^2} \quad (4.8)$$

En la figura 4.6 se muestra la señal reflejada por una sonda inmersa en agua desionizada, obtenida mediante simulación con gprMax. Se marca en la gráfica el tiempo en el cual la señal ingresa al medio a caracterizar y el tiempo en el cual se observa la primera reflexión debida al medio. El tiempo entre los dos marcadores es el tiempo de vuelo que se utiliza para calcular la permitividad aparente.

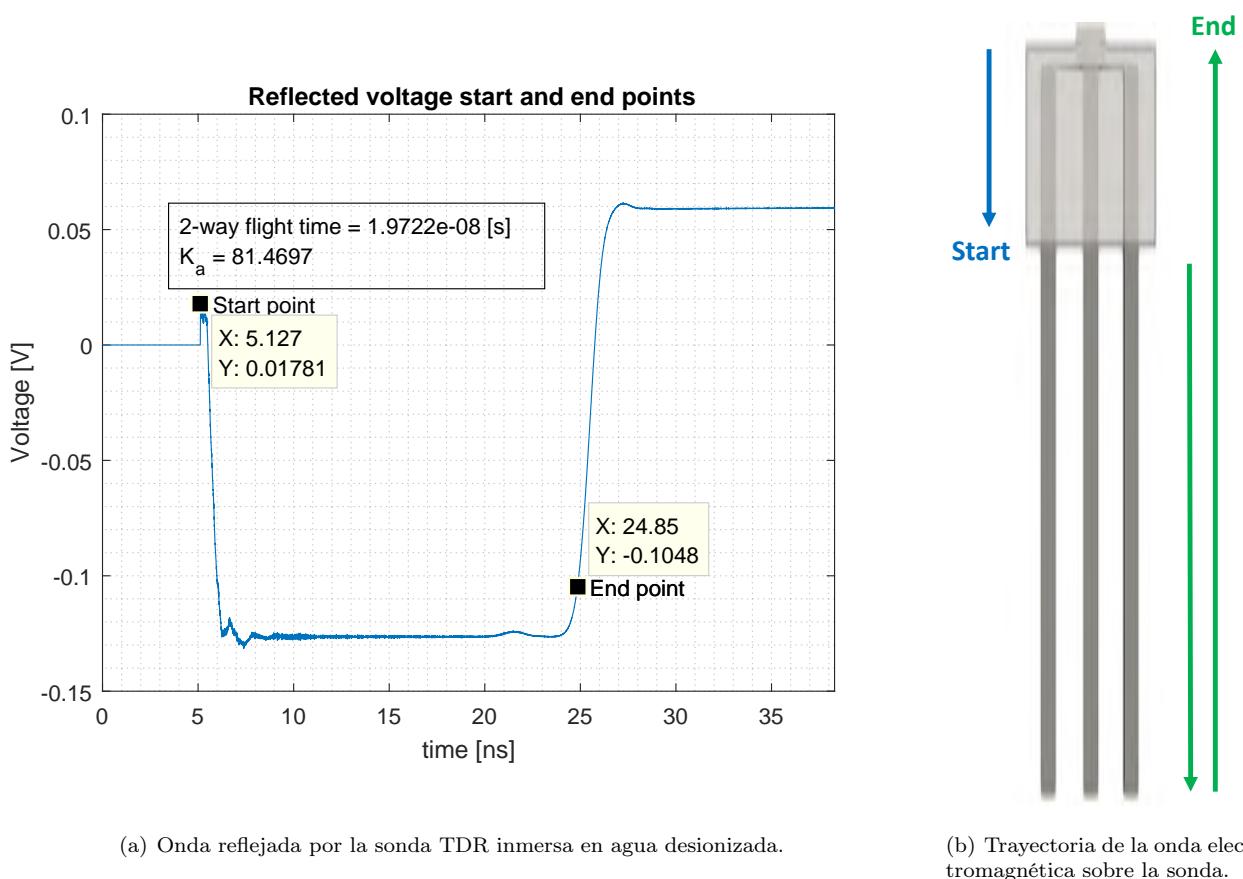


Figura 4.6: Análisis de permitividad aparente sobre la onda reflejada utilizando el tiempo de vuelo. El tiempo de vuelo es la diferencia entre el tiempo hasta el punto final (end) y el tiempo hasta el punto inicial (start).

Para encontrar la permitividad de los diferentes medios de manera sistemática es necesario que se utilicen siempre los mismos criterios para ubicar el punto de inicial y el punto final utilizados para medir el tiempo de vuelo. A continuación se describe el procedimiento hecho para encontrar los puntos inicial y final.

El primer paso es encontrar el punto inicial de la reflexión. Hay que tener en cuenta para encontrar el punto inicial que en la trayectoria de la onda sobre la sonda se presentan dos cambios de medio: cable coaxial a cabezal y cabezal al medio a caracterizar. La impedancia de la sonda en cada medio es diferente y por lo tanto se van a

presentar reflexiones debidas al acople de impedancias en cada cambio, por lo tanto es importante no confundir la primera reflexión medida con la primera reflexión generada por el medio a caracterizar. Para mitigar este error se realiza un pre-procesamiento de la señal reflejada, que consiste en suprimir el efecto de las reflexiones debidas al cabezal. La permitividad ( $\epsilon_{head}$ ) y la permeabilidad ( $\mu_{head}$ ) del dieléctrico que compone el cabezal son parámetros conocidos por diseño y la longitud de las varillas dentro del cabezal también es conocida ( $L_{head}$ ), los parámetros correspondientes a las sondas utilizadas se indican la tabla de la figura 4.5. Con la permitividad y permeabilidad se puede obtener la velocidad de propagación de la onda electromagnética en la sección del cabezal de la sonda. Con la longitud recorrida y la velocidad se puede determinar el tiempo de vuelo sobre el cabezal ( $t_{head}$ ), utilizando la misma idea detrás de la ecuación 4.8. La técnica que se aplica sobre la señal reflejada es conocida como *time-gating* donde se anulan todas las señales en el intervalo de tiempo  $t_{head}$ . En la figura 4.7 se muestra la señal reflejada antes y después del time-gating realizado para anular los efectos de la reflexión producida por el cabezal. Una vez se realiza el pre-procesamiento se puede utilizar el primer valor diferente de cero que se presenta en la señal como punto de inicio.

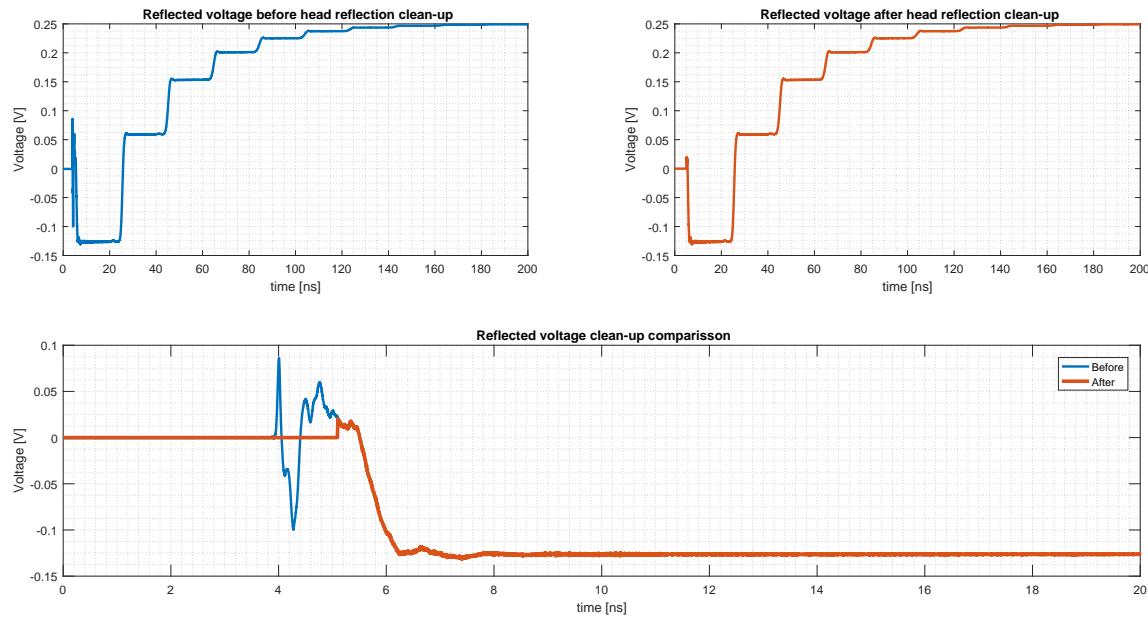


Figura 4.7: Señal reflejada por la sonda inmersa en agua desionizada, antes y después de la limpieza de las reflexiones del cabezal.

Una vez se conoce el punto inicial se debe ubicar el punto final. En este trabajo de grado se utilizó una técnica similar a la descrita por Hemiovaara y Bouten en [29], que utiliza la intersección de dos líneas tangentes a la señal reflejada como el punto final. Primero, se debe ubicar el punto de inflexión  $S$  de la curva correspondiente a la primera reflexión del final de la sonda, este punto corresponde a un máximo local de la primera derivada del voltaje reflejado. Para identificar este punto adecuadamente, primero se pasa la señal reflejada por un filtro pasa-bajas que elimina el ruido de alta frecuencia. Ya que se conoce el tiempo de subida de la señal incidente, se puede determinar la frecuencia significativa máxima para las mediciones:  $t_{rise} = 85 \text{ ps} \rightarrow f_{max} \approx 11.76 \text{ GHz}$ . Para asegurar que no se pierde información de la señal se tomó la frecuencia de corte del filtro como:  $f_{co} = 30 \text{ GHz}$  y se utilizó una técnica de promedio por ventana móvil utilizando la función `smooth()` de Matlab [30]. En la figura 4.8 se muestran las señales antes y después de pasar por el filtro pasa-bajas.

Una vez filtrada la señal, se calcula la primera derivada y se ubica el punto para encontrar el punto de inflexión

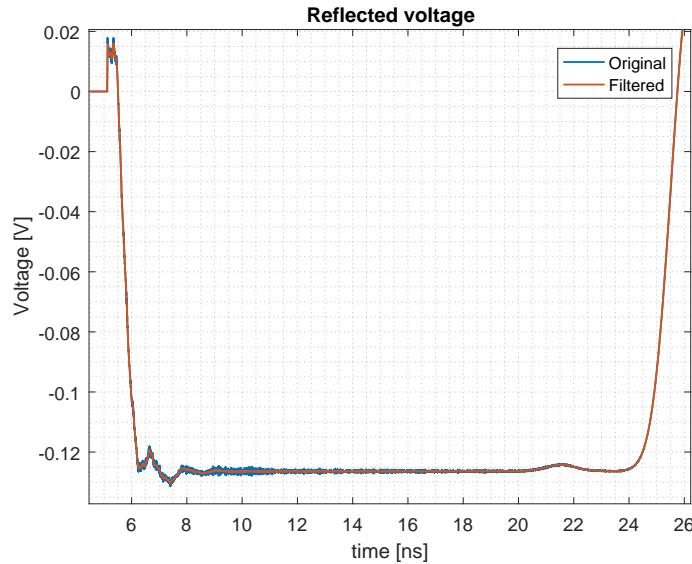


Figura 4.8: Señal reflejada por la sonda inmersa en agua desionizada antes y después de ser filtrada.

$S$  como se muestra en la figura 4.9. Sobre este punto se definen dos intervalos de tiempo: tiempo de base y tiempo de inflexión. El tiempo de base corresponde al intervalo de tiempo inmediatamente anterior a la reflexión del final de la sonda y el tiempo de inflexión corresponde al intervalo de tiempo inmediatamente posterior a la reflexión del final de la sonda. La longitud de estos intervalos se determinó a través del procesamiento de diferentes señales producidas con sondas inmersas en materiales conocidos. El criterio de longitud para los intervalos es:  $t_{base} = 60 \times t_{sample}$  y  $t_{infl} = 20 \times t_{sample}$ . Para determinar los puntos de inicio y final de los intervalos se utilizaron los siguientes criterios:  $\Delta t_{min} = 0.1 \times t(S_{point})$ ,  $t_{min} = t(S_{point}) - \Delta t_{min}$ ,  $\Delta t_{base} = [t_{min} - t_{base}, t_{min}]$ , y  $\Delta t_{infl} = [t(S_{point}) - \frac{\Delta t_{infl}}{2}, t(S_{point}) + \frac{\Delta t_{infl}}{2}]$ , donde  $t_{sample}$  es el tiempo de muestreo de la señal. Los intervalos de tiempo se pueden ver en la figura 4.10.

A diferencia de lo propuesto en [29], en este trabajo se calculan las líneas “tangentes” con la recta formada por dos puntos sobre la curva en lugar de utilizar una regresión lineal. Los puntos que se toman son los puntos del comienzo y el final de cada intervalo  $\Delta t_{base}$  y  $\Delta t_{infl}$ . Se hizo de esta forma ya que en el análisis de diferentes simulaciones, el método utilizado en este trabajo de grado probó tener un mejor desempeño estimando la permitividad aparente. En la figura 4.11 se muestran las líneas sobre la señal reflejada, el punto de intersección y el punto de la curva que se toma como el punto final.

Con los puntos de inicio y final ya se puede obtener el tiempo de vuelo de la onda y por lo tanto la permitividad aparente  $K_a$ . En la figura 4.6 se puede ver que para el ejemplo del agua desionizada la permitividad aparente toma un valor de  $K_a = 81.47$ .

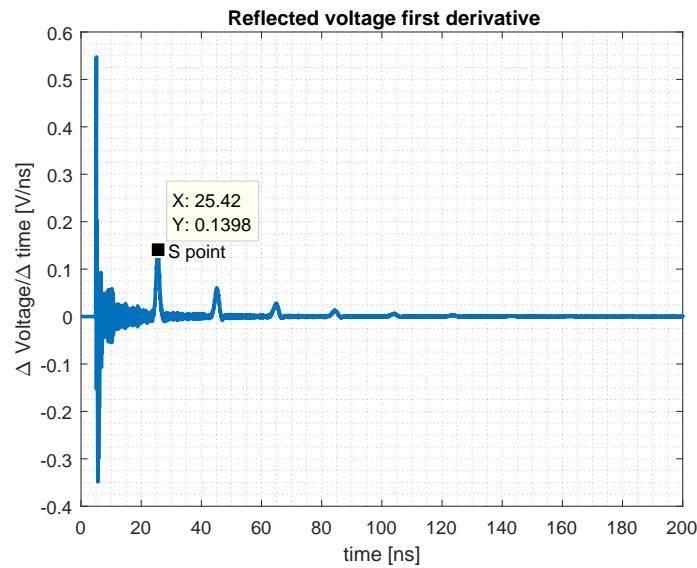


Figura 4.9: Primera derivada de la señal reflejada por la sonda inmersa en agua desionizada. Ubicación del punto de inflexión  $S$  de la curva correspondiente a la primera reflexión del final de la sonda, este punto corresponde a un máximo local de la primera derivada del voltaje reflejado.

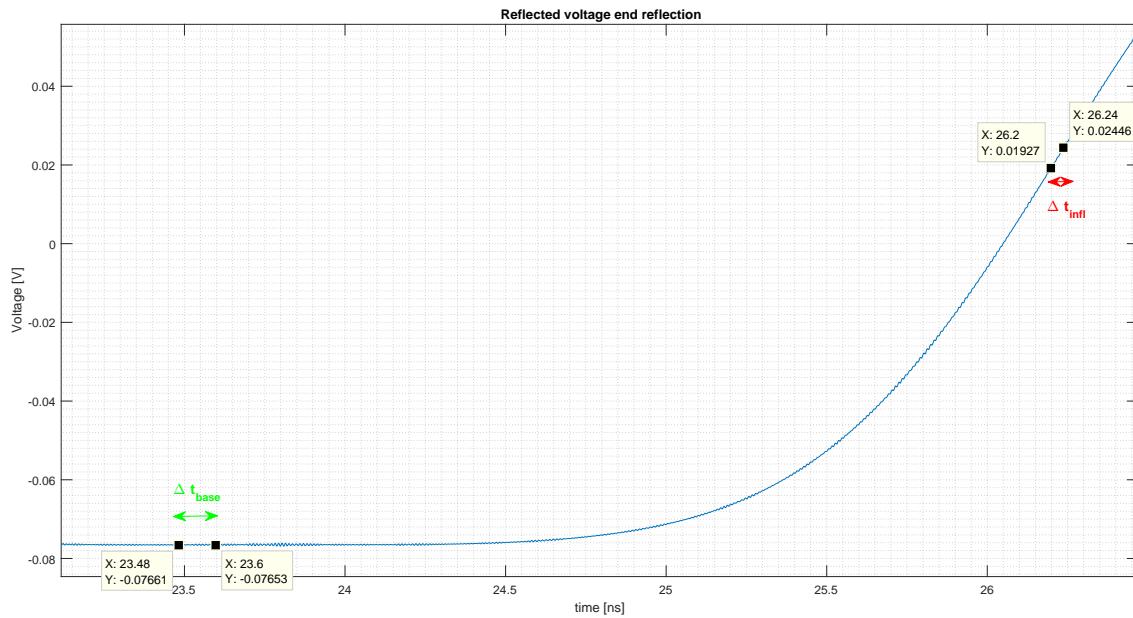


Figura 4.10: Intervalos de tiempo base y de inflexión para el análisis del punto de la primera reflexión del final.

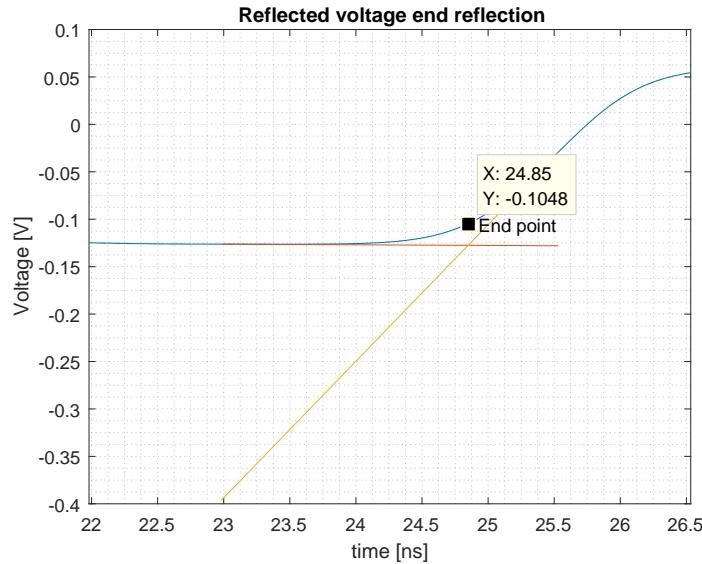


Figura 4.11: Líneas “tangentes”.

#### 4.1.3. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica  $\sigma_{DC}$  se puede conocer a partir del estado estable de la reflexión, utilizando la Ecuación (4.9) propuesta por Giese y Tiemann [31].

$$\sigma_{DC} = \frac{\varepsilon_0 c_0}{zL} \left( \frac{1 - \rho_\infty}{1 + \rho_\infty} \right) \left[ \frac{S}{m} \right] \quad (4.9)$$

El coeficiente de reflexión en el estado estable es una constante  $\rho_\infty$ , que se calcula por medio de la Ecuación (4.10).

$$\rho_\infty = \frac{V_{ref\infty}}{V_{inc\infty}} \quad (4.10)$$

La longitud  $L$ , es un valor conocido por la geometría de la sonda y la relación de impedancias  $z$ , se determina con las Ecuaciones (4.4) también con la geometría de la sonda.

Dependiendo del material a caracterizar el estado estable se alcanza en diferentes instantes de tiempo. Para los materiales con frecuencia de relajación alta, el estado estable se alcanza en un tiempo prolongado con respecto a los materiales con frecuencia de relajación baja. En la Figura 4.12 se pueden ver tres materiales con diferentes frecuencias de relajación, con los demás parámetros de relajación iguales:  $\varepsilon_s = 30$ ,  $\varepsilon_\infty = 5$ ,  $\sigma_{DC} = 0$ , se puede ver que el instante de tiempo en que las señales alcanzan su amplitud estable es directamente proporcional con la frecuencia de relajación. En la Figura 4.13 se muestra el análisis hecho sobre el estado estable del agua desionizada.

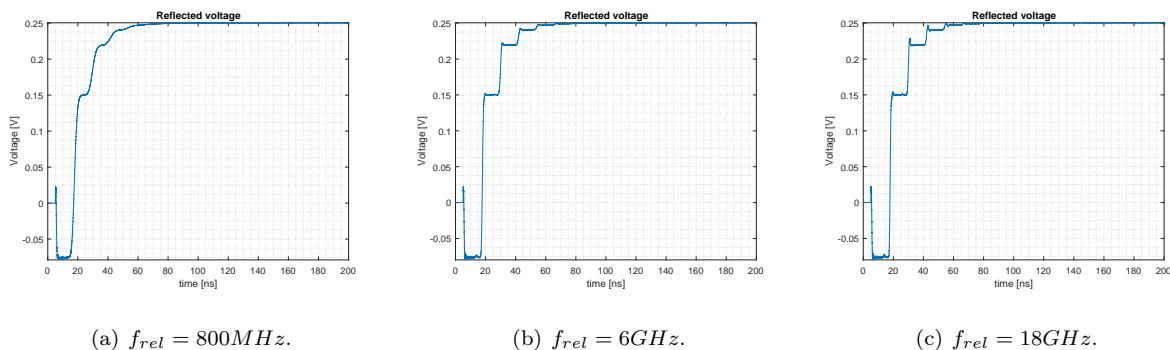


Figura 4.12: Comparación del voltaje reflejado para materiales con diferente frecuencia de relajación.

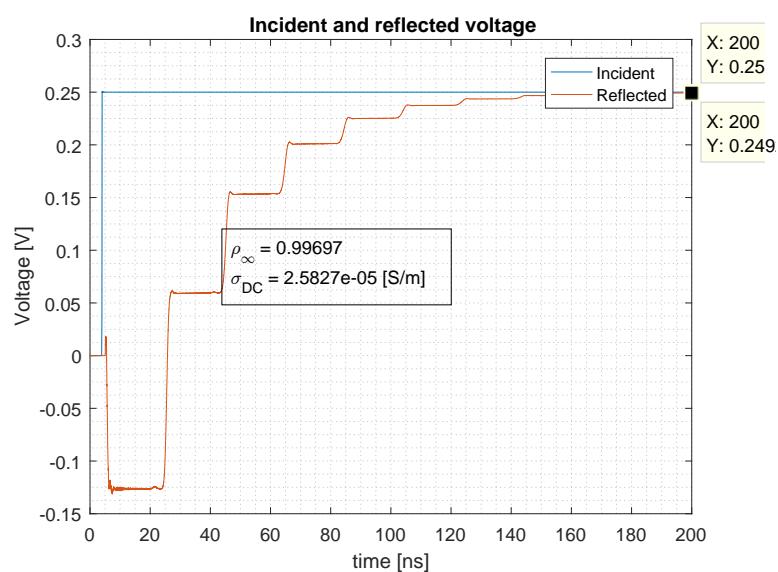


Figura 4.13: Análisis de conductividad hecho sobre la reflexión de la sonda en agua desionizada.

#### 4.1.4. Permitividad en frecuencia cero

Del análisis de la señal reflejada en el dominio del tiempo también se puede obtener la permitividad en frecuencia cero  $\epsilon_s$  del modelo Debye. La permitividad en frecuencia cero se halla con el método propuesto por Giese y Tiemann [31], que relaciona el área entre la señal reflejada por la sonda y una reflexión ideal con la permitividad en frecuencia cero; la relación se presenta en la Ecuación (4.11), donde  $A$  es el área entre las curvas. La curva ideal contra la que se compara el área es la curva producida por un material con permitividad  $\epsilon_r = 1$  y con la conductividad del medio a caracterizar, por eso este análisis es posterior al análisis de conductividad.

$$\epsilon_s = \frac{A \cdot c_0}{g \cdot v_{ref}(\infty) \cdot zL} + 1 \quad (4.11)$$

La ecuación original de Giese y Tiemann no contempla el parámetro  $g$  de la Ecuación (4.11), este es un término que se determinó en el estudio de este trabajo de grado. El parámetro  $g$  tiene como objetivo compensar las diferencias entre sonda de tres varillas utilizada y una sonda coaxial, ya que la ecuación propuesta originalmente es para una sonda coaxial. En la Figura 4.14 se muestra el análisis de permitividad en frecuencia cero para el agua desionizada.

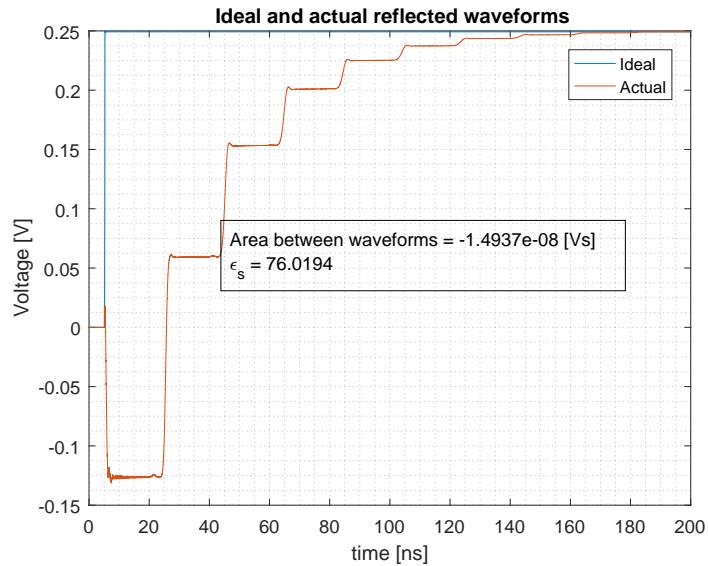


Figura 4.14: Análisis de permitividad en frecuencia cero hecho sobre la reflexión de la sonda en agua desionizada.

#### 4.1.5. Permitividad relativa compleja

El parámetro de dispersión  $S_{11}(f)$  de la sonda inmersa en el medio a caracterizar, se puede determinar mediante la transformada de Fourier del cociente entre el voltaje incidente y el reflejado. Al tener estas señales en tiempo discreto se puede aplicar la transformada discreta de Fourier (DFT) sobre las señales. Sin embargo, la DFT de una función paso (como las que representan el voltaje incidente y reflejado) contiene errores porque el algoritmo de la transformada asume que la señal retorna a cero. Como lo indica Heimovaara [27], para obtener la transformada

de las señales se puede aplicar la transformada de Fourier sobre la primera derivada de las señales; la derivada del pulso incidente se muestra en la Figura 4.15(a) y la derivada del pulso reflejado por la sonda enagua desionizada se muestra en la Figura 4.15(b). Se puede ver que estas derivadas no tienen el problema de retorno a cero que las señales originales tienen. La transformada de una señal y la transformada de su derivada tienen la relación presentada en la Ecuación (4.12), por lo tanto el cociente de las transformadas es equivalente al coeficiente de las transformadas de las señales derivadas como se presenta en la Ecuación (4.13). En la Figura 4.16 se presenta el parámetro  $S_{11}$  para la sonda inmersa en agua desionizada.

$$X(f) = DFT[x(t)] = \frac{\Delta t}{1 - \exp(-j2\pi f \Delta t)} DFT[x'(t)] \quad (4.12)$$

$$S_{11} = \frac{DFT[v_{ref}(t)]}{DFT[v_{inc}(t)]} = \frac{DFT[v'_{ref}(t)]}{DFT[v'_{inc}(t)]} \quad (4.13)$$

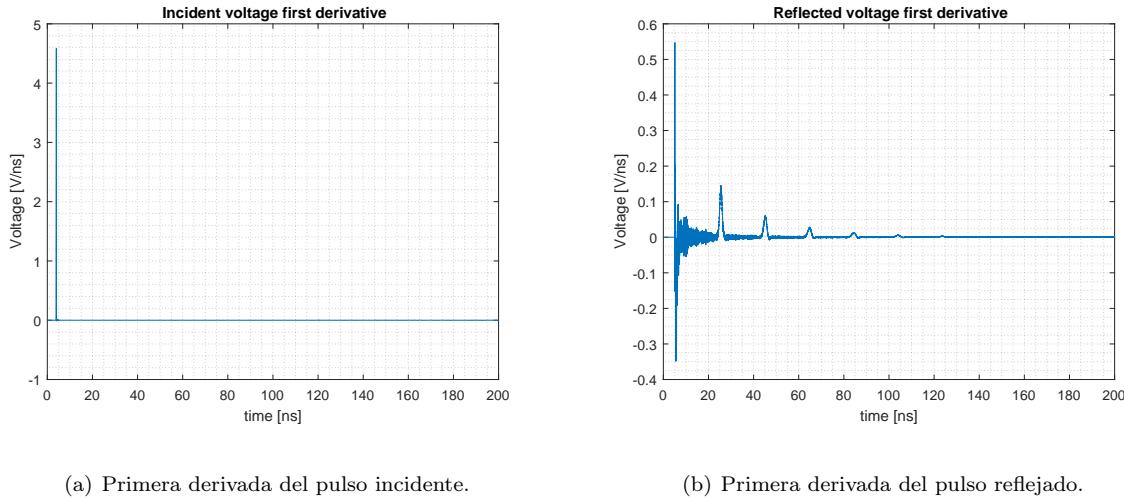


Figura 4.15: Primeras derivadas del voltaje incidente y el reflejado.

Al resolver las Ecuaciones (4.3) - (4.4) de forma numérica con el parámetro  $S_{11}$  hallado, se puede obtener la permitividad relativa compleja  $\epsilon_r^*(f)$ . Según Heimovaara [27] hallar el resultado directo de las ecuaciones significa un error, ya que se asume que la sonda utilizada reproduce correctamente el comportamiento de un línea coaxial.

Heimovaara propone utilizar un método de calibración de tres errores sobre el parámetro  $S_{11}$  hallado de las mediciones. El modelo para la calibración de tres errores está dado por la ecuación 4.14. Donde  $S_{meas}(f)$  es la función de dispersión medida,  $S_{act}(f)$  es la función de dispersión verdadera del suelo,  $E_d(f)$  es una función de error de directividad,  $E_f(f)$  es una función de error de seguimiento de frecuencia y  $E_s(f)$  es una función de error de acople de carga.

$$S_{meas}(f) = E_d(f) + \frac{S_{act}(f) E_f(f)}{1 - E_s(f) S_{act}(f)} \quad (4.14)$$

El efecto de las funciones de error se puede determinar utilizando tres materiales de calibración con permitividad

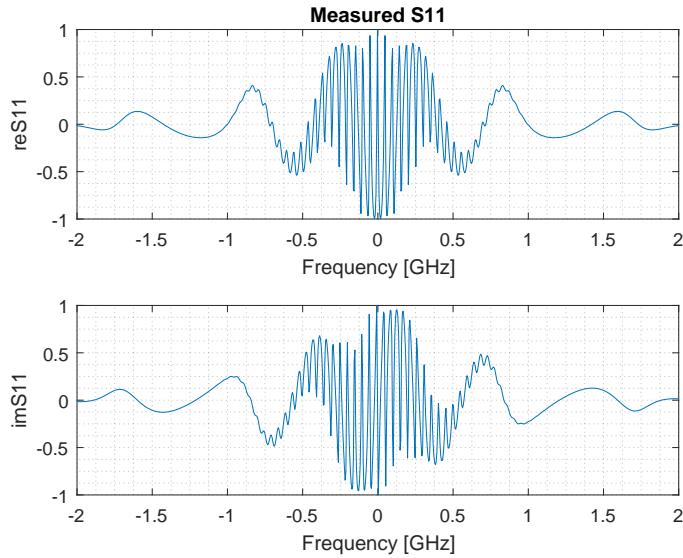


Figura 4.16: Parámetro  $S_{11}$  de la medición en agua desionizada.

conocida. En este trabajo de grado se utilizaron los siguientes materiales para la calibración: aire, agua desionizada y etanol al 96 %. Una vez se conozca el valor de las funciones de error, se puede determinar la función de dispersión verdadera de los medios a caracterizar mediante la Ecuación (4.15):

$$S_{act}(f) = \frac{S_{meas}(f) - E_d(f)}{E_s(f)[S_{meas}(f) - E_d(f)] + E_f(f)} \quad (4.15)$$

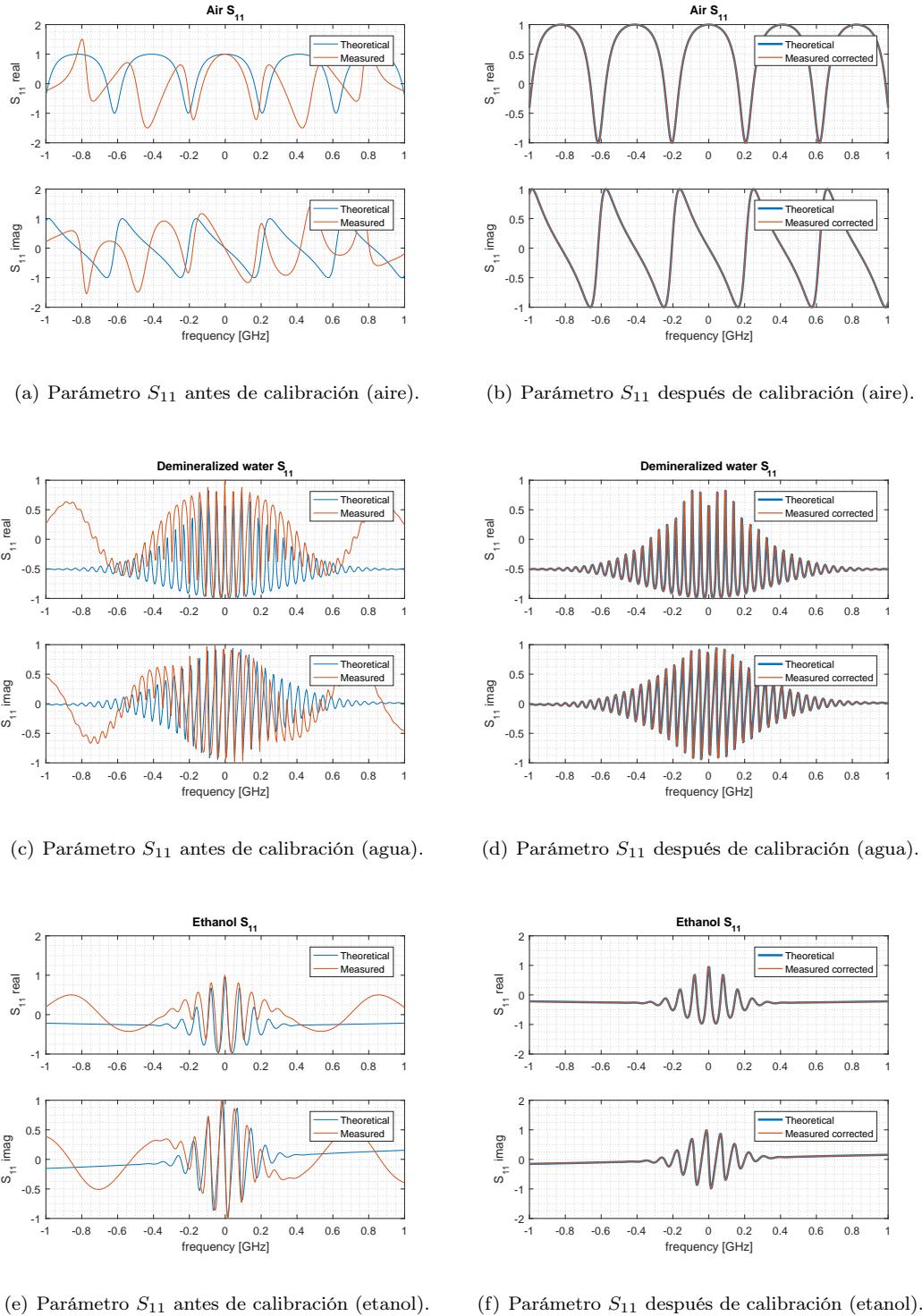
El método de calibración fue estudiado en simulación con los materiales anteriormente descritos. Los resultados de la calibración de tres errores se muestran en la Figura 4.17. Se puede ver como el parámetro  $S_{11}$  se corrige para los tres medios. En la Figura 4.18 se muestran los parámetros de error hallados.

Las funciones de error halladas fueron luego computadas con la respuesta de la sonda en un material diferente a los de calibración con permitividad conocida, para validar la calibración. En la Figura 4.19 se puede ver que los errores hallados no corrijen adecuadamente el parámetro  $S_{11}$  medido para el material y por lo tanto este método de calibración no es correcto.

Por la justificación anterior el análisis hecho en este trabajo de grado se hace sobre el parámetro obtenido de la medición sin calibrar:  $S_{meas}$ .

#### 4.1.6. Algoritmo de procesamiento de señales

El algoritmo desarrollado busca la permitividad relativa compleja del medio a caracterizar bajo la descripción del modelo Debye, es decir qu se busca obtener los parámetros:  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_\infty$ ,  $\tau_0$  y  $\sigma_{DC}$ ; para describir la permitividad de los medios donde se inserta la sonda. Primero se realizan todos los análisis en el dominio del tiempo, en el siguiente

Figura 4.17: Calibración de parámetro  $S_{11}$ .

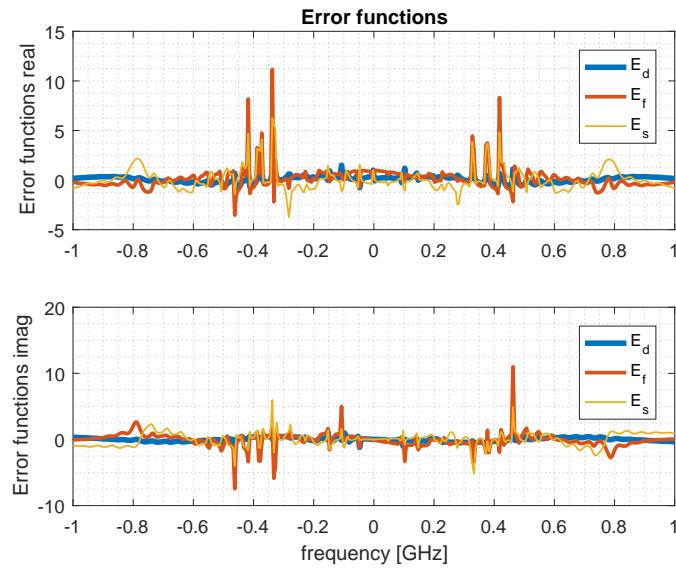
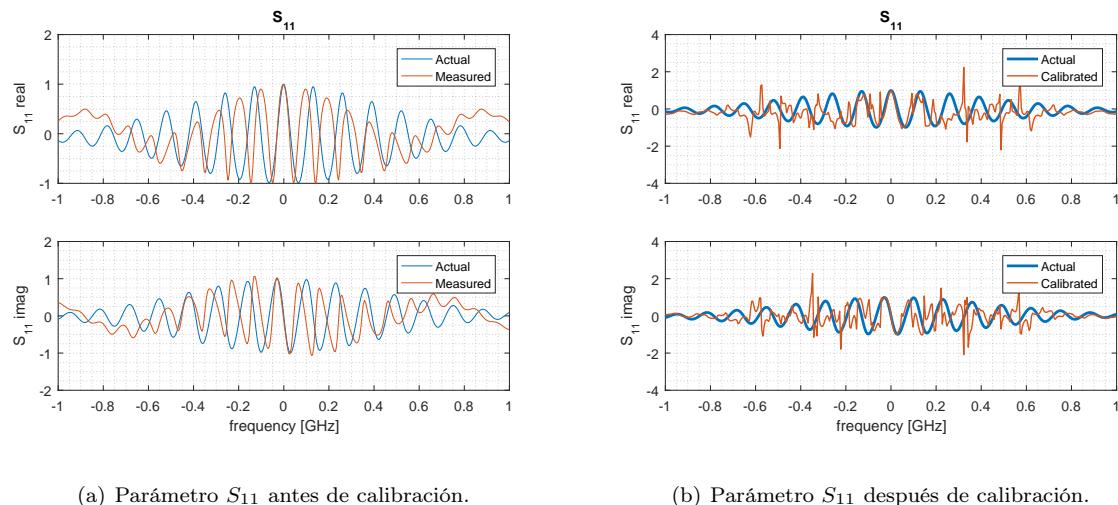


Figura 4.18: Funciones de error halladas con la calibración de tres errores.

Figura 4.19: Validación de la calibración para material con propiedades:  $\varepsilon_s = 10$ ,  $\varepsilon_\infty = 4$ ,  $\sigma_{DC} = 0$ ,  $f_{rel} = 6$  GHz.

orden: permitividad aparente, conductividad y permitividad en frecuencia cero. El análisis del dominio del tiempo da dos de los cuatro parámetros del modelo Debye que se busca:  $\epsilon_s$  y  $\sigma_{DC}$ . Los otros dos parámetros ( $\epsilon_\infty$  y  $\tau_0$ ) se hallan del análisis del parámetro  $S_{11}$ .

Como se menciona anteriormente, la permitividad que describe el parámetro  $S_{11}$  debe hallarse mediante un método numérico. En este proyecto de grado se utiliza un algoritmo de optimización por enjambre de partículas —PSO (Particle Swarm Optimization), similar al mencionado en el capítulo 2. En la Figura 4.20 se muestra el diagrama de flujo para este algoritmo.

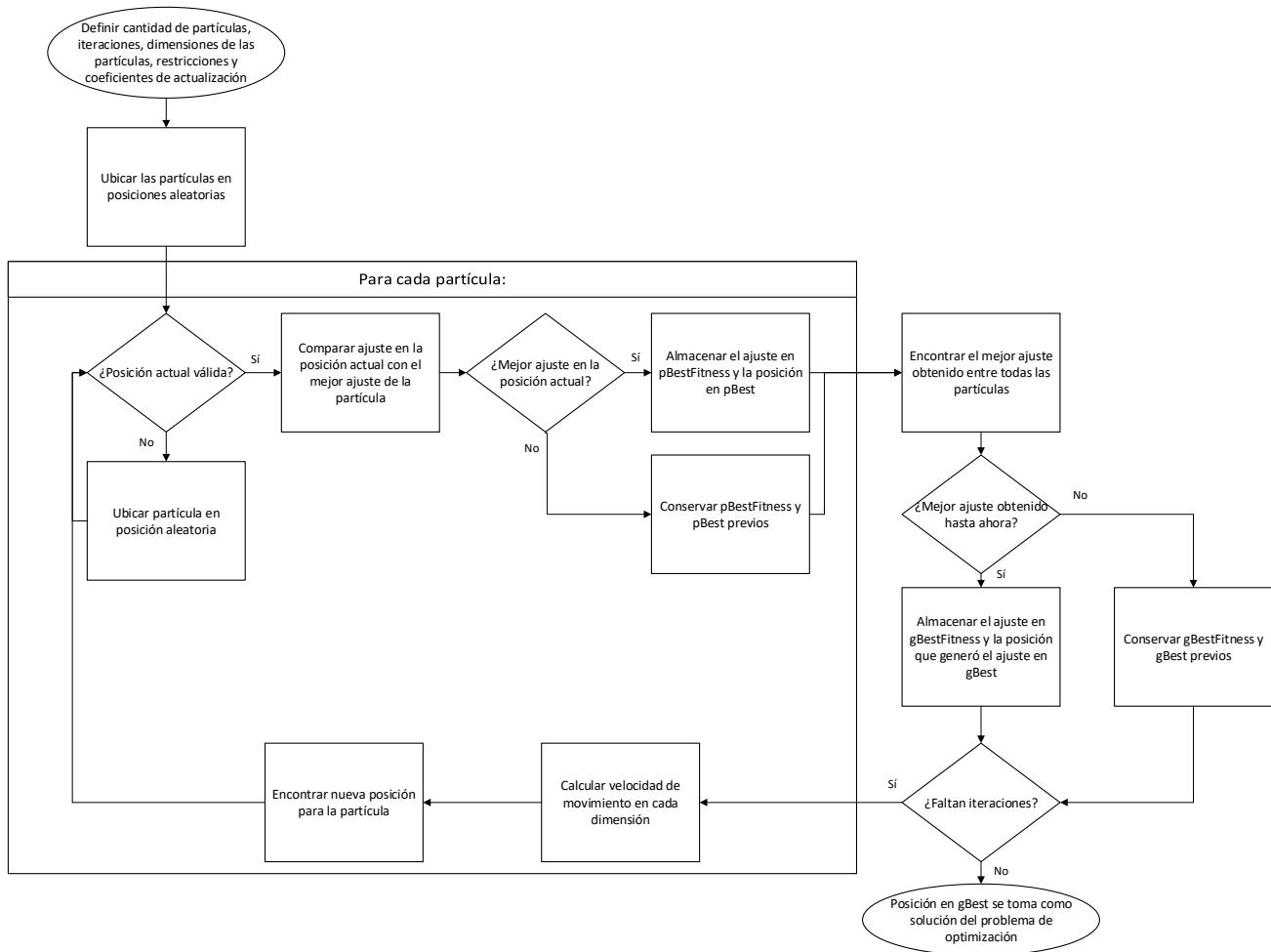


Figura 4.20: Algoritmo PSO para determinar la permitividad relativa compleja dependiente de la frecuencia.

Al algoritmo de procesamiento de las señales de TDR se encuentra en el apéndice A.4 para señales simuladas y en A.5 para señales medidas.

## 4.2. Equipos comerciales TDR

Para llevar a cabo las mediciones requeridas se buscaron equipos comerciales, especializados en mediciones TDR para suelos. Fabricantes como Campbell Scientific, Inc. (Logan, UT, Estados Unidos), IMKO Micromodultechnik GmbH (Ettlingen, Alemania) y MOHR Test and Measurement LLC (Richland, WA, Estados Unidos); cuentan con módulos capaces de generar los pulsos de excitación y leer los pulsos reflejados, y con sondas que reproducen el comportamiento de una línea de transmisión coaxial. De estos fabricantes compararon las especificaciones de los equipos TDR, con el fin de identificar cuales permiten obtener los datos de permitividad relativa compleja y conductividad necesarios para la caracterización completa de los suelos a estudiar.

En la tabla de la Figura 4.21 se muestra un resumen de las especificaciones de los equipos estudiados.

Fabricante	Campbell Scientific	Campbell Scientific	IMKO	MOHR
TDR	TDR200	HydroSense II	HD2	CT100B
Sonda	CS610	CS659	TRIME-PICO64	-
<i>Generador de pulsos</i>				
Amplitud de pulso generado [V]	0.25	No disponible	No disponible	0.3
Tiempo de subida del pulso [ps]	85	No disponible	No disponible	60
Impedancia de salida [Ohms]	50	No disponible	No disponible	50
Duración de pulso [us]	25.5	No disponible	No disponible	No disponible
<i>Captura de pulsos reflejados</i>				
Rango (distancia) [m]	0 - 3800	No disponible	No disponible	0 - 12000
Rango (tiempo) [us]	0 - 27.75	No disponible	No disponible	0 - 87.63
Resolución (distancia) [mm]	1.35	No disponible	No disponible	0.075
Resolución (tiempo) [ps]	4.4	No disponible	No disponible	0.24
Muestras de la onda reflejada	20 a 10112	No disponible	No disponible	Hasta 65536
<i>Interfaz de salida</i>				
Opciones de visualización	PC	LCD, PC	LCD, Celular	LCD, PC
Calibración	Definida por usuario	Predefinida	Predefinida	Definida por usuario
Datos de salida	Forma de onda, $\epsilon_r$ aparente, $\sigma$	$\epsilon_r$ aparente, atenuación, tiempo de vuelo	contenido de agua, conductividad, atenuación	Forma de onda, $\sigma$ , transformada a frecuencia de la onda
<i>Sonda</i>				
Cantidad de varas	3	2	2	No disponible
Separación entre varas [cm]	4.5	3.2	No disponible	No disponible
Longitud de las varas [cm]	30	12	16	No disponible
Diametro de las varas [cm]	0.48	0.5	0.6	No disponible
Cable de conexión al TDR	RG8	No disponible	No disponible	No disponible
<i>Otros</i>				
Alimentación eléctrica	USB 5 VDC	Batería interna	Batería interna	Batería interna
Software de análisis de datos	PCTDR	HydroSense II	Trime WinMonitor	CT Viewer
Peso [kg]	0.79	0.45	0.44	2.3
Tamaño [cm]	21.6 x 5.1 x 10.7	10 x 9.2 x 4	No disponible	10.9 x 29.2 x 17.5
Costo [COP]	\$ 19,830,874 <sup>1</sup>	\$ 6,768,125 <sup>1</sup>	\$ 8,480,351 <sup>1</sup>	\$ 72,332,960 <sup>2</sup>

1. Precio en Colombia de los equipos de medición con sonda - Fecha: septiembre/2019

2. Precio en Estados Unidos del equipo base sin sonda - Fecha: septiembre/2019

Figura 4.21: Tabla comparativa de equipos comerciales de TDR. Datos tomados de manuales y hojas de especificaciones de los equipos [32–36].

#### 4.2.1. Equipos seleccionados

Por el análisis que se requiere hacer sobre las señales el equipo TDR a utilizar debe entregar la forma de onda de la señal reflejada. De los equipos en la Tabla 4.21 los equipos que cumplen este criterio son el TDR-200 de Campbell Scientific y el CT100B de MOHR. Otro requisito es el ancho de banda de los equipos, que viene dado por el tiempo de subida del pulso y por la duración del mismo, para el contexto del proyecto se requiere una caracterización en el rango de frecuencias de 600 MHz a 6 GHz. El TDR-200 cuenta con un tiempo de subida de 85 ps y un tiempo de duración del pulso de 25  $\mu$ s, por lo tanto el rango de frecuencias que se puede caracterizar con este equipo es 40 kHz a 12 GHz. El CT100B tiene un tiempo de subida de 60 ps lo que significa que la frecuencia superior de su ancho de banda es de 17 GHz, sin embargo el tiempo de duración del pulso es desconocido. Por las especificaciones y precio se seleccionó el TDR-200 como el equipo para realizar la mediciones. Adicionalmente, se adquirió la sonda CS610 de Campbell Scientific para realizar las mediciones. En la Figura 4.22 se muestra una foto del sistema de medición con el TDR-200, la sonda CS610 y el software PCTDR.

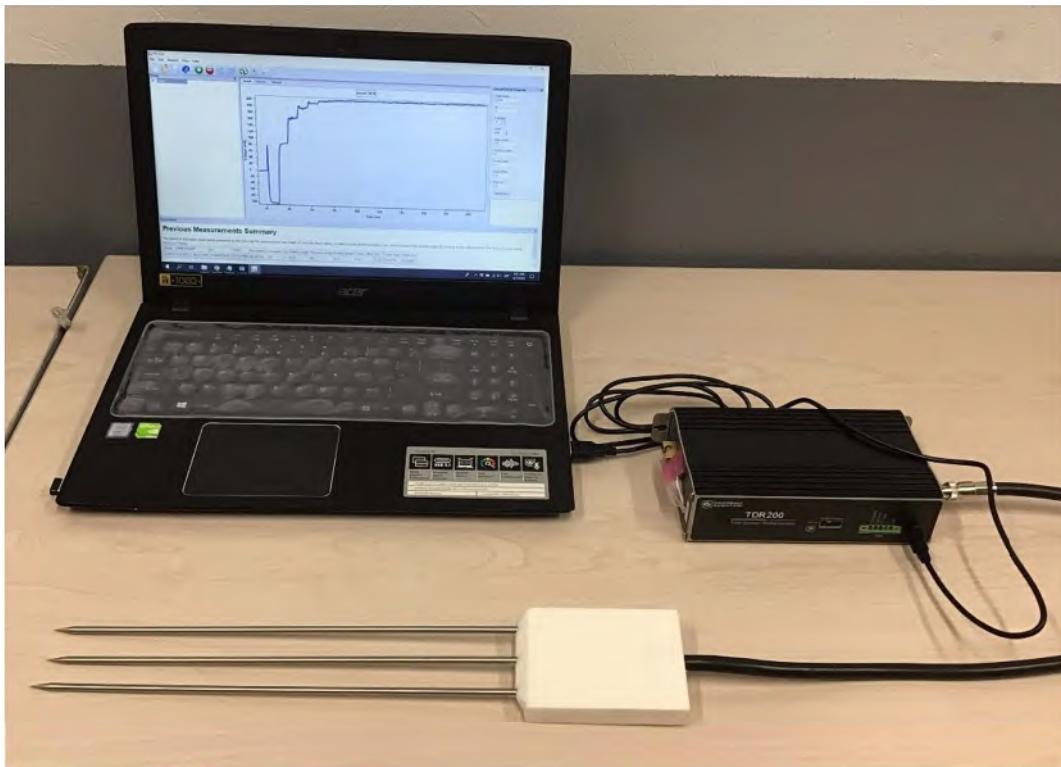


Figura 4.22: Equipo de medición TDR.

#### 4.3. Diseño y fabricación de una sonda de medición

Se diseño y fabricó una sonda de tres varillas de forma artesanal para realizar las mediciones de TDR, basándose en el procedimiento propuesto por Heimovaara [37]. Esta sonda se realizó para probar un equipo TDR-200 que se consiguió en préstamo, pero no se contaba con la sonda CS610.

#### 4.3.1. Parámetros de diseño

El diseño de la sonda busca tener los mismos parámetros que la sonda comercial CS610 como se ve en la Figura 4.5. Los parámetros que difieren entre las dos sondas son: la permitividad del cabezal, debido a la resina epóxica conseguida para la fabricación de la sonda; y el tipo de conector, ya que se considera que hay mayor flexibilidad en usar un conector de  $50 \Omega$  a conectar el cable directamente a las varillas.

#### 4.3.2. Materiales y dimensiones

A continuación se listan los materiales y dimensiones de la sonda fabricada:

1. Varillas:

- Altura: 40 cm
- Diámetro: 0.476 cm
- Material: Bronce

2. Cabezal

- Altura: 10 cm
- Ancho: 7 cm
- Largo: 3 cm
- Material: Resina epóxica
- Permitividad del material:  $\epsilon_r = 4.6$

3. Conector

- Material: Cobre
- Tipo: SMA hembra
- Impedancia:  $50 \Omega$

#### 4.3.3. Procedimiento de fabricación

Una vez se tienen los materiales se realiza la fabricación de la sonda en los siguientes pasos:

1. Identificación de la separación de las varillas: Se debe definir la separación de las varillas para obtener la impedancia deseada a partir de la fórmula en la Ecuación (4.4).
2. Creación de guías para las varillas: Una vez identificada la distancia de separación se crean unas guías, en madera y acrílico como se muestra en la Figura 4.23(a), para separar las varillas a la distancia deseada.
3. Soldar alambre de cobre al conector SMA: Las varillas deben conectarse al conector SMA, la varilla central al conductor interno y las varillas laterales al conductor externo. Al conductor externo del conector SMA se debe soldar un alambre de cobre, como se muestra en la Figura 4.23(b) para poder conectar las varillas laterales a con la separación identificada anteriormente.

4. Soldar las varillas al conector SMA: La varilla central se suelda al conductor central del conector y las varillas laterales al alambre de cobre con la separación deseada. En este punto la sonda luce como la Figura 4.23(b).
5. Fabricación en acrílico del molde para el cabezal: El cabezal se fabrica en resina epóxica, este es una material que viene líquido que al mezclarse con un endurecedor se vuelve sólida. Para dar la forma deseada al cabezal, se debe vaciar la mezcla líquida en un molde. El molde fabricado, es un paralelepípedo rectangular en acrílico de las dimensiones del cabezal. Se utiliza un molde acrílico ya que este material se despega fácilmente de la resina epóxica endurecida. El molde fabricado permite que por encima salga el conector SMA y por debajo las varillas de bronce, como se muestra en la Figura 4.23(b).
6. Vaciado de la resina epóxica: Las uniones de las placas que componen el molde son sellados con pegamento para acrílico y silicona para garantizar que la resina no se derrame. La resina es mezclada con su endurecedor por 5 minutos y una vez pase este tiempo se vacía en el molde. La resina se endurece en un tiempo aproximado de 24 horas, así que se cubre con papel transparente para que no entre polvo en la misma. La resina vaciada en el molde luce como la Figura 4.23(c).
7. Remoción del molde: Una vez se cumpla el tiempo de secado de la resina epóxica, se remueve el molde de acrílico. El molde se calienta con llama directa para que se despegue fácilmente de la resina epóxica. Una vez se remueve el molde la sonda ya está lista para las mediciones. El producto final luce como el que se muestra en la Figura 4.23(d).

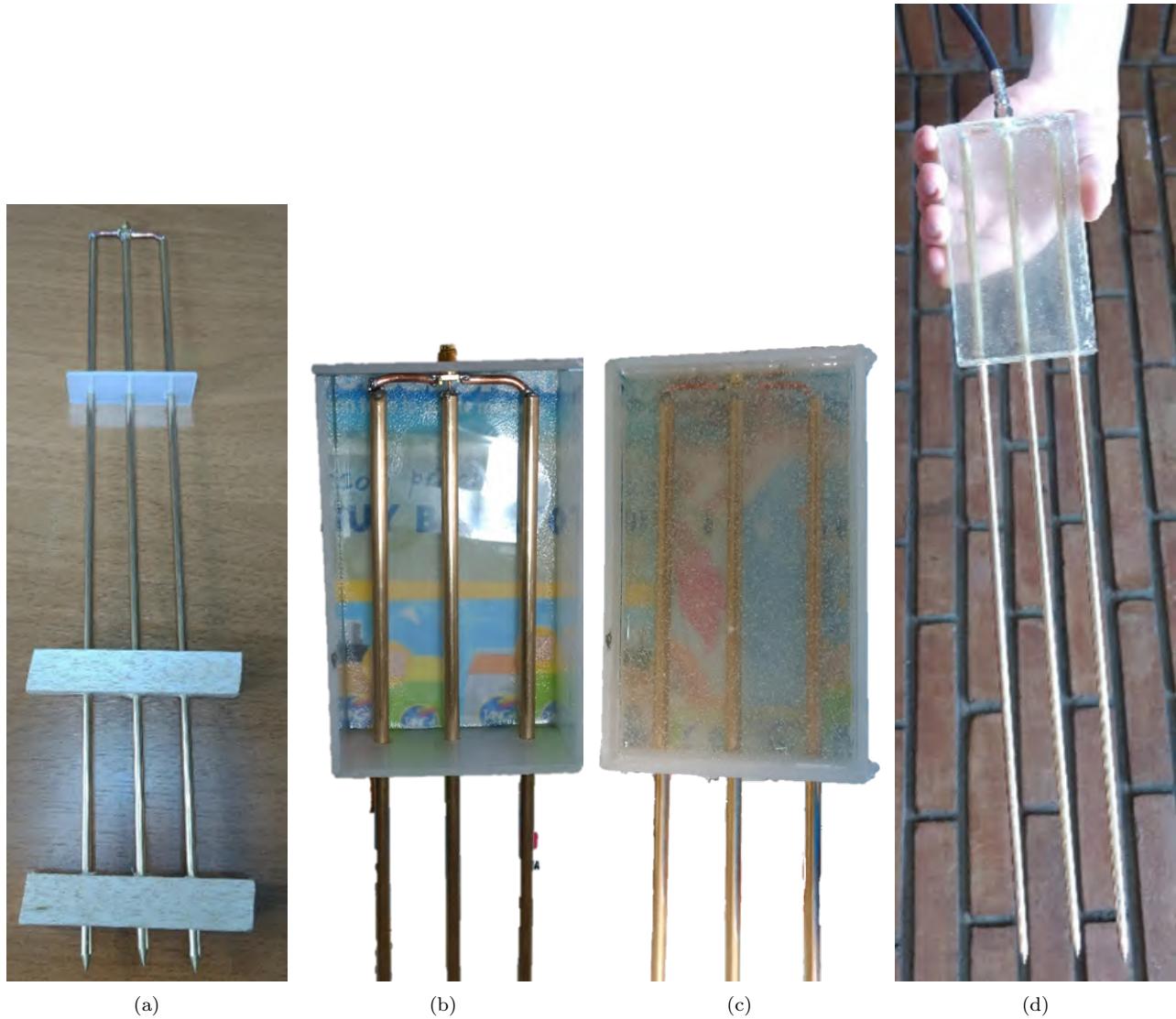


Figura 4.23: Procedimiento de fabricación de la sonda de tres varillas.

## Capítulo 5

# Medición de las propiedades dieléctricas

## 5.1. Simulación de TDR en gprMax

Para entender adecuadamente el comportamiento de las mediciones de reflectometría en el dominio del tiempo, se consideró conveniente reproducir las mediciones en el simulador de campos electromagnéticos gprMax. Como gprMax utiliza la técnica de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), los resultados por defecto se presentan en el dominio del tiempo y se puede obtener el equivalente a una medición de TDR.

Para una simulación realista se construyó la sonda coaxial CS610 de Campbell Siceintific [33] con las dimensiones y parámetros conocidos, en el simulador gprMax. Con la sonda construida en gprMax, se crearon escenarios para obtener la respuesta del TDR con la sonda inmersa en dieléctricos con propiedades conocidas. A las señales resultantes se le hizo el análisis pertinente en tiempo y frecuencia para recuperar las propiedades de los dieléctricos. A continuación se detalla sobre este proceso.

### 5.1.1. Construcción del cable de alimentación

La construcción de la sonda en gprMax se hizo a través de una biblioteca en Python. Esto permite utilizar el modelo de la sonda fácilmente en diferentes simulaciones, implementando el llamado a todos los elementos geométricos desde funciones. Implementar la sonda de esta forma disminuye la cantidad de comandos que deben escribirse en un script, haciendo más fácil de leer los escenarios construidos. Adicionalmente añade robustez a las simulaciones, ya que elimina fuentes de error en la construcción de los scripts.

Para construir la sonda en gprMax se identificaron todos los componentes de la misma, utilizando la documentación del fabricante [33] y un artículo de diseño de sondas coaxiales de tres varillas de Hemiovaara [37].

El primer parámetro a tener en cuenta sobre la construcción de la sonda fue la impedancia del cable que se utiliza para alimentarla, correspondiente a un cable coaxial RG-8 de  $50\Omega$ . En gprMax se construyó el cable con las dimensiones dadas por el fabricante de cables coaxiales Pasternack [38]. En especial se tuvo en cuenta el diámetro del conductor interno y el diámetro del dieléctrico entre los conductores. Como lo especifica el fabricante, la impedancia del cable es de  $50\Omega$  así que se puede determinar la permitividad del dieléctrico interno utilizando la fórmula de la ecuación (5.1) donde:  $Z_c$  es la impedancia del cable coaxial,  $\epsilon_r$  es la permitividad relativa del dieléctrico,  $b$  es el diámetro interno del conductor externo, y  $a$  es el diámetro del conductor interno.

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad (5.1)$$

Para el caso del cable RG-8,  $b = 7.24\text{mm}$  y  $a = 2.16\text{mm}$ , tomando  $Z_c = 50\Omega$  se obtiene una permitividad relativa del material de  $\epsilon_r = 2.11$ . Teniendo en cuenta que la sonda es un equipo relativamente grande, respecto a las dimensiones de una sección transversal del cable coaxial, se debe tener un compromiso de resolución en el cable coaxial para que sea computacionalmente posible simular el escenario. La resolución utilizada entonces para construir la sonda se fijó como  $\delta x = \delta y = \delta z = 1\text{mm}$ .

Con la limitación en resolución se construyó el cable coaxial con las siguientes dimensiones:  $\epsilon_r = 2.35$ ,  $b = 6\text{mm}$  y  $a = 2\text{mm}$  (debido a que el diámetro del cable se calcula como dos veces el radio, el radio debe ser múltiplo de la resolución por lo tanto no se puede obtener un diámetro de 7mm); lo que da como resultado una impedancia de  $Z_c = 42.9\Omega$ . El modelo geométrico del cable se presenta en la figura 5.1, por facilidad y como no debe afectar el resultado de la simulación no se incluyó el dieléctrico que cubre el conductor externo del cable.

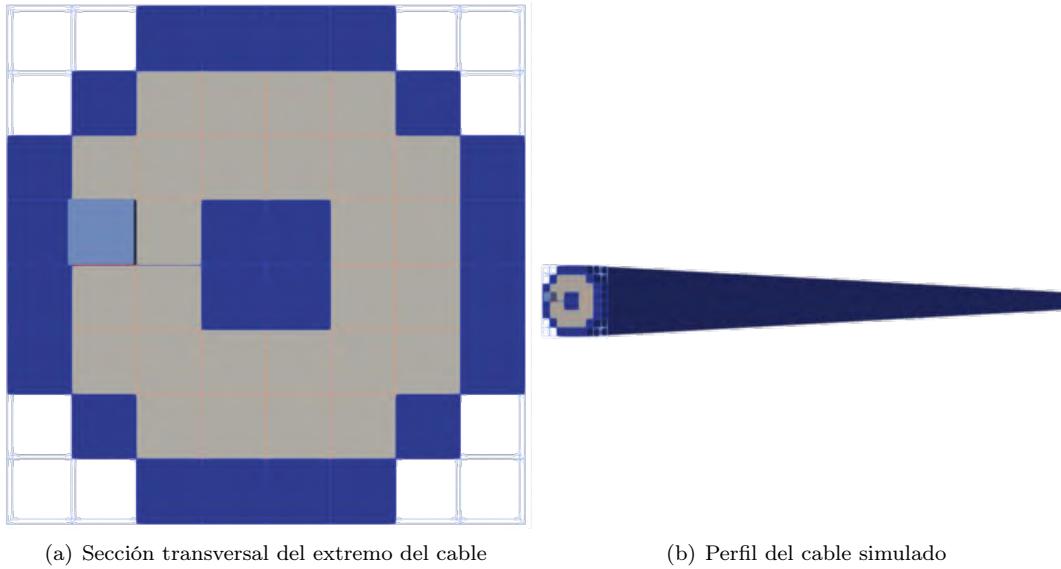


Figura 5.1: Cable coaxial construido en gprMax con dimensiones  $b = 6\text{mm}$  y  $a = 2\text{mm}$

Para comprobar que la impedancia del cable fuera correcta, se simuló el cable con una fuente de voltaje con resistencia en serie de  $50\ \Omega$  conectada en un extremo y una carga de  $50\ \Omega$  en el otro extremo. La idea de esta prueba, es que el voltaje sobre la carga fuera el mismo que se aplicaba al cable en la fuente. A continuación se muestran los resultados del voltaje resultante y la impedancia para el cable con  $b = 6\text{ mm}$  y  $a = 2\text{ mm}$ , variando la permitividad del dieléctrico como se indica en cada caso. Para todos los casos, como pulso de excitación se utilizó un pulso Gaussiano con 1 Voltio de amplitud y 500 MHz como frecuencia central.

**Cable coaxial con  $\epsilon_r = 2.35$ :**

**Cable coaxial con  $\epsilon_r = 1.731$ :**

**Cable coaxial con  $\epsilon_r = 1.663$ :**

**Cable coaxial con  $\epsilon_r = 1$ :**

Se puede ver que el cable con la impedancia más cercana a la deseada es el que corresponde al dieléctrico con permitividad  $\epsilon_r = 1$  en la figura 5.5. Desde un punto de vista práctico esto es imposible obtenerlo en la realidad, ya que el dieléctrico correspondería al aire. también se puede ver que al utilizar la ecuación (5.1) el resultado no es consistente, ya que de la ecuación se obtiene una impedancia  $Z_c = 65.92\ \Omega$ . Es muy posible que esta inconsistencia se de gracias a la discretización de los conductores del cable coaxial. Idealmente, los conductores tienen una sección transversal completamente circular; sin embargo se puede ver en la figura 5.1 que la discretización espacial provoca que la sección transversal del conductor interno sea cuadrada.

Para mitigar los errores que genera la discretización en el cable coaxial, se construyó el cable de un tamaño más grande. Todas las dimensiones se multiplicaron por dos obteniendo las dimensiones:  $\epsilon_r = 2.4$ ,  $b = 12\text{mm}$  y

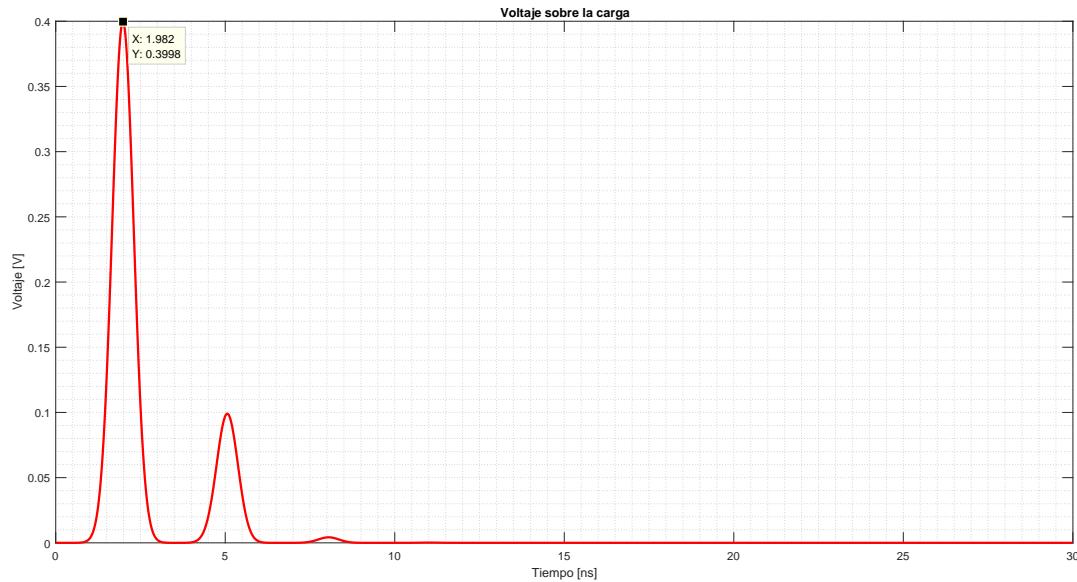


Figura 5.2: Voltaje sobre la carga con dieléctrico  $\varepsilon_r = 2.35$ . **Impedancia calculada:**  $75.09 \Omega$

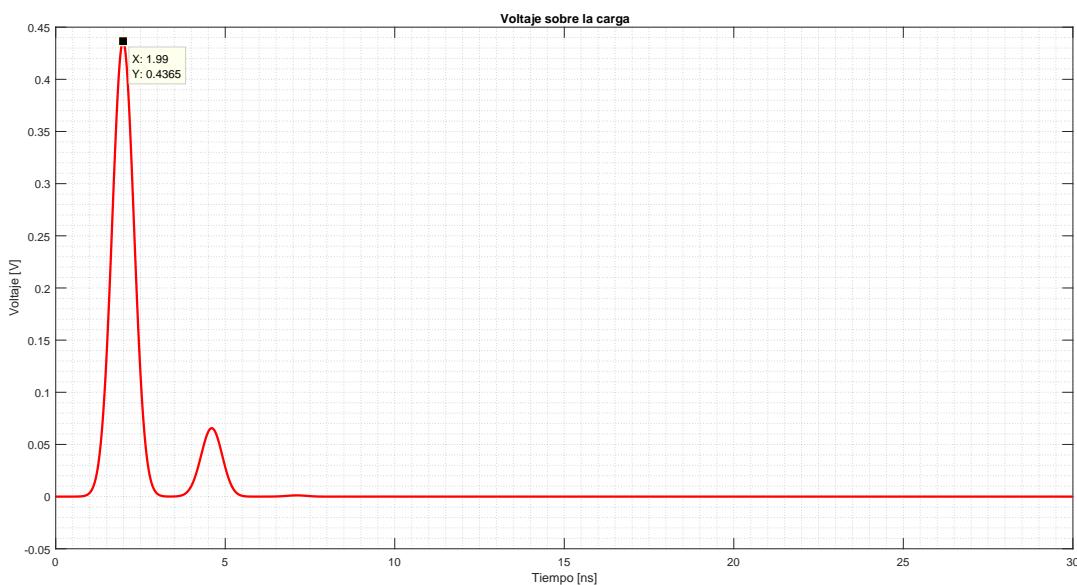


Figura 5.3: Voltaje sobre la carga con dieléctrico  $\varepsilon_r = 1.731$ . **Impedancia calculada:**  $64.62 \Omega$

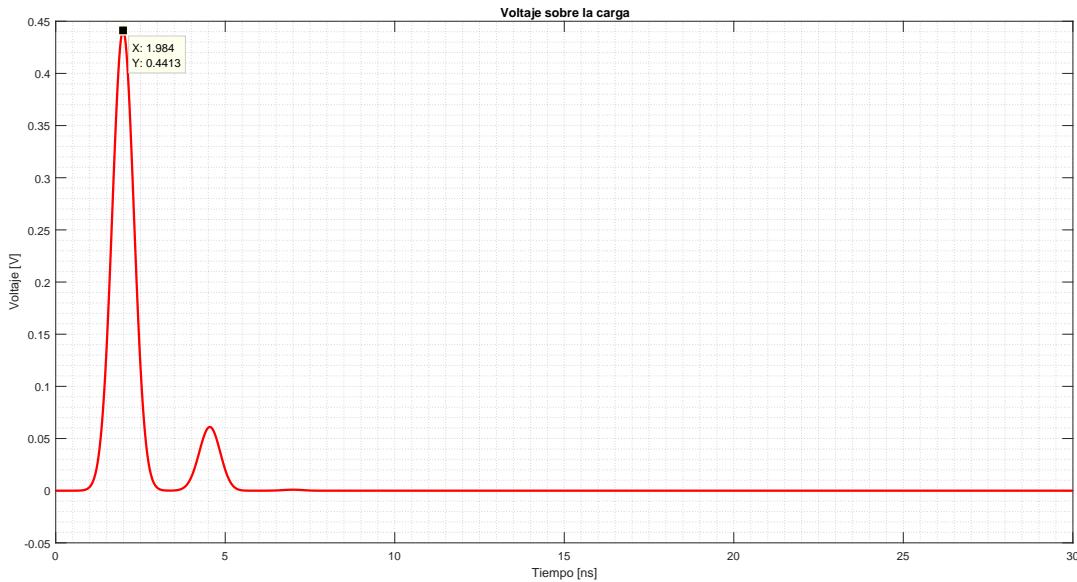


Figura 5.4: Voltaje sobre la carga con dieléctrico  $\epsilon_r = 1.663$ . **Impedancia calculada:**  $63.30 \Omega$

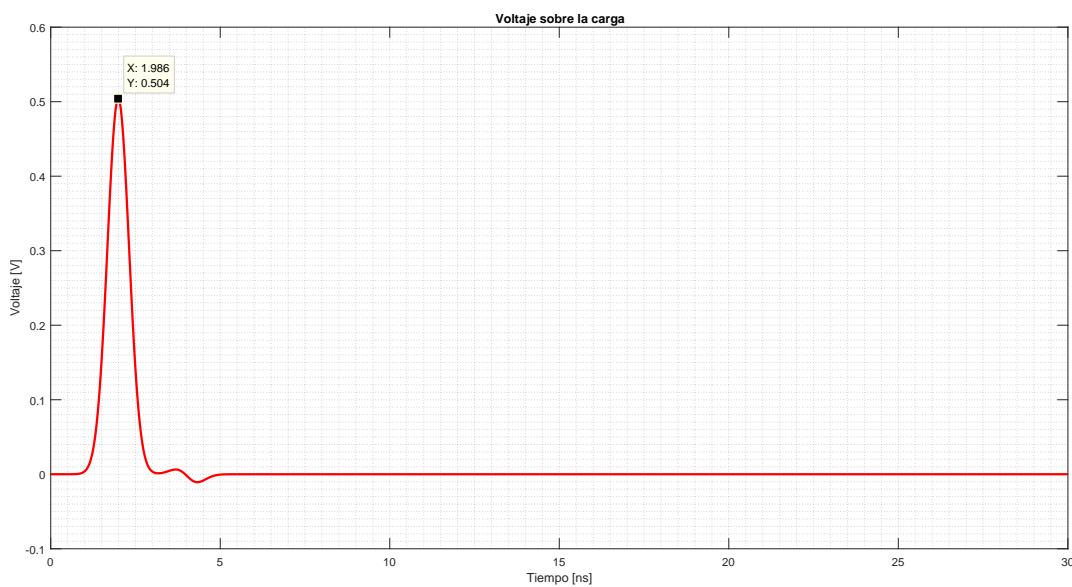


Figura 5.5: Voltaje sobre la carga con dieléctrico  $\epsilon_r = 1$ . **Impedancia calculada:**  $49.21 \Omega$

$a = 4\text{mm}$ . El modelo geométrico del cable se presenta en la figura 5.6. Teóricamente este cable debería tener una impedancia de  $50 \Omega$ , sin embargo se anticiparon discrepancias con los resultados de la ecuación (5.1) ya que las secciones circulares aún no lucen como círculos.

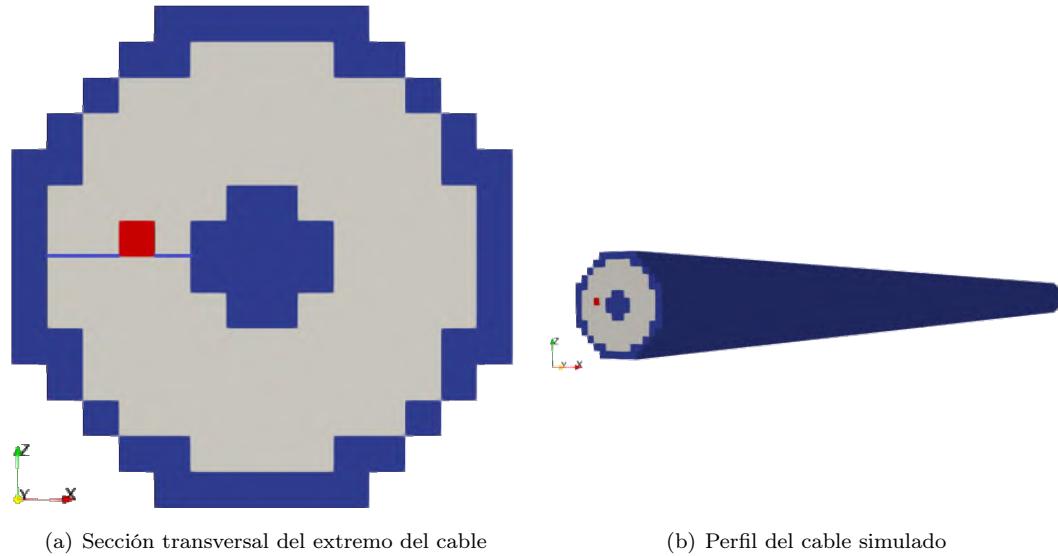


Figura 5.6: Cable coaxial construido en gprMax con dimensiones  $b = 12\text{mm}$  y  $a = 4\text{mm}$

Para este caso el comportamiento del voltaje sobre la carga es muy bueno para una permitividad de  $\epsilon_r = 2.4$  del dieléctrico, como se muestra en la figura 5.7. La impedancia del cable obtenida es de  $Z_c = 49.2 \Omega$ .

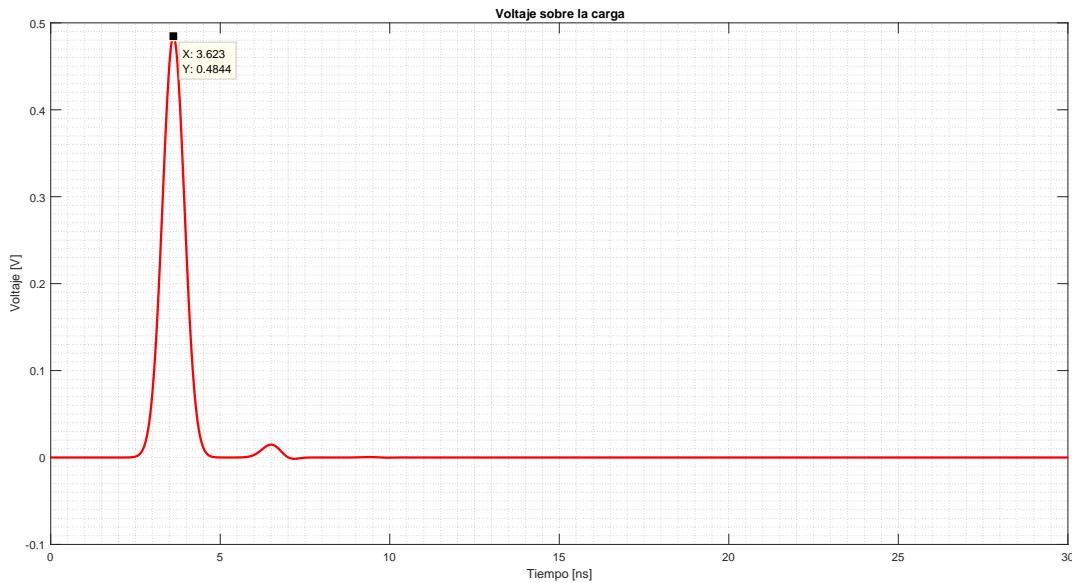


Figura 5.7: Voltaje sobre la carga con dieléctrico  $\epsilon_r = 2.4$ . **Impedancia calculada:**  $49.2 \Omega$

### 5.1.2. Construcción de la sonda

La sonda se construye en gprMax a partir la geometría de los elementos que la componen, del mismo modo que se creó el cable coaxial: se identifican las figuras geométricas básicas que describen las componentes de las sondas, se describen las figuras geométricas con sus dimensiones, se caracterizan eléctricamente los materiales y se unen todos los elementos creados.

Los elementos que componen la sonda son:

- Cable coaxial: Descrito por cilindros como se identificó anteriormente en este capítulo. Los conductores del cable son de un material conductor eléctrico perfecto (PEC) y el dieléctrico del material es de un polímero de alta densidad con  $\epsilon_r = 2.4$ ,  $\mu_r = 1$  y  $\sigma = 0$ .
- Placa conectora: Placa que conecta el conductor externo del cable con las varillas. Esta placa es de material PEC y se representa a través de un paralelepípedo rectangular muy delgado, el paralelepípedo tiene un corte cilíndrico en la mitad por donde pasa la varilla que se conecta con el conductor interno del cable. Las dimensiones de esta placa son: alto = 2 mm, ancho = 4.7 cm y largo = 4 mm. En la Figura 5.8 se muestra la placa y el cable simulado conectados.
- Varillas: Varillas que se conectan a la placa y el cable, y que son insertadas en el material a caracterizar. Las varillas son cilindros de acero inoxidable. El alto de las varillas es de 40 cm, donde 30 cm se pueden introducir en el medio a caracterizar y 10 cm están en el cabezal de la sonda. El diámetro de las varillas es de 0.8 cm para un modelo de sonda y de 0.4 cm para otro modelo.
- Cabezal: Cabezal que recubre el la parte superior de las varillas. El cabezal es un paralelepípedo rectangular de resina epólica con propiedades  $\epsilon_r = 3.6$ ,  $\mu_r = 1$  y  $\sigma = 0$ . Las dimensiones del cabezal son: alto = 10.8 cm, ancho = 7 cm y largo = 1.9 cm.

En la Figura 4.5, se describen las dimensiones de las sondas simuladas. En la Figura 5.9 se muestran las dos sondas construidas en gprMax.

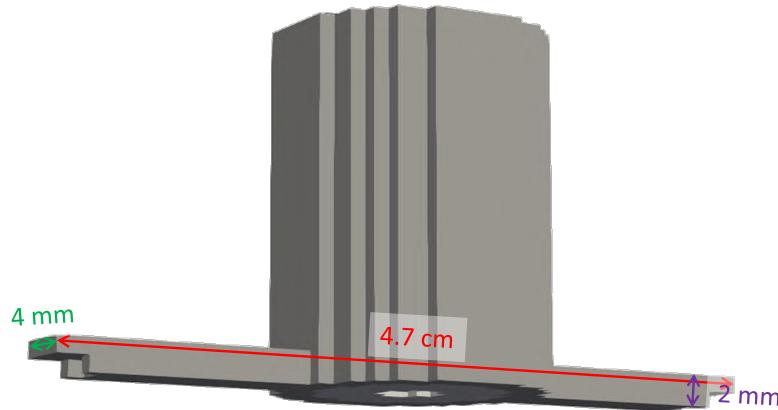


Figura 5.8: Configuración del cable y la placa en la sonda simulada.



Figura 5.9: Sondas simuladas en gprMax. A la derecha se muestra la sonda Simulada 1 y a la izquierda la sonda Simula 2. Las dimensiones de las sondas se describen en la Figura 4.5.

### 5.1.3. Pulso de excitación

Con la geometría ya construida en gprMax se debe construir el pulso de TDR con el que se excita la sonda. Siendo fiel a la idea de reproducir la medición que se obtiene con el TDR-200 y la sonda CS610 de Campbell Scientific, se construyó el pulso con las características del pulso generado por el TDR-200: 250 mV de amplitud y 85 ps de tiempo de subida.

Antes de construir el pulso, se debe tener en cuenta que este no viole las condiciones de estabilidad del algoritmo FDTD. Se debe cumplir que los pasos de tiempo ( $\Delta t$ ) cumplan con la condición de estabilidad de Courant [18], presentada en la Ecuación (5.2); la condición de estabilidad de Courant se interpreta como la condición para que las ondas electromagnéticas viajen a la velocidad apropiada a través de las celdas. También se debe cumplir que el flanco de subida esté representado por al menos 10 pasos de tiempo:  $t_{rise} \geq 10 \times \Delta t$  y que el tiempo de retardo antes de iniciar el flanco de subida sea de al menos 6 veces el tiempo de subida:  $t_{delay} \geq 6 \times t_{rise}$ . La resolución espacial con la que se construyen las sondas es de  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.001$  m, esto implica que los pasos de tiempo son  $\Delta t = 1.93$  ps (tomando la condición de igualdad para la Ecuación (5.2)); por lo tanto el tiempo de subida cumple con la condición:  $t_{rise} = 85$  ps  $\geq 19.3$  ps; y el tiempo de retardo debe ser  $t_{delay} \geq 510$  ps.

$$\Delta t \leq \frac{1}{c_0 \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (5.2)$$

El perfil de subida de la señal se modela a través del perfil de subida de un pulso Gaussiano, para que no se presenten cambios abruptos en el voltaje introducido a la simulación y así evitar errores numéricos. El pulso Gaussiano que describe el perfil de subida del pulso se construye a partir de la Ecuación (5.3). Una vez el punto Gaussiano alcanza su amplitud máxima la señal se estabiliza en 250 mV, de modo que la ecuación que describe al

pulso incidente es la Ecuación (5.4).

$$GaussianPulse = 0.25 \cdot \exp - \left( \frac{t - t_{delay}}{\frac{t_{rise}}{2}} \right)^2 [V] \quad (5.3)$$

$$V_{inc} = \begin{cases} 0.25 \cdot \exp - \left( \frac{t - t_{delay}}{\frac{t_{rise}}{2}} \right)^2 [V], & t \leq t_{delay} + t_{rise} \\ 0.25 [V], & t > t_{delay} + t_{rise} \end{cases} \quad (5.4)$$

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, el pulso de excitación se construye en Matlab y las amplitudes correspondientes a cada intervalo de tiempo se almacenan en un archivo .txt para que sea leído por gprMax. La gráfica del pulso de excitación en función del tiempo se muestra en la Figura 5.10. El script que genera el pulso de excitación se encuentra en el apéndice A.3.

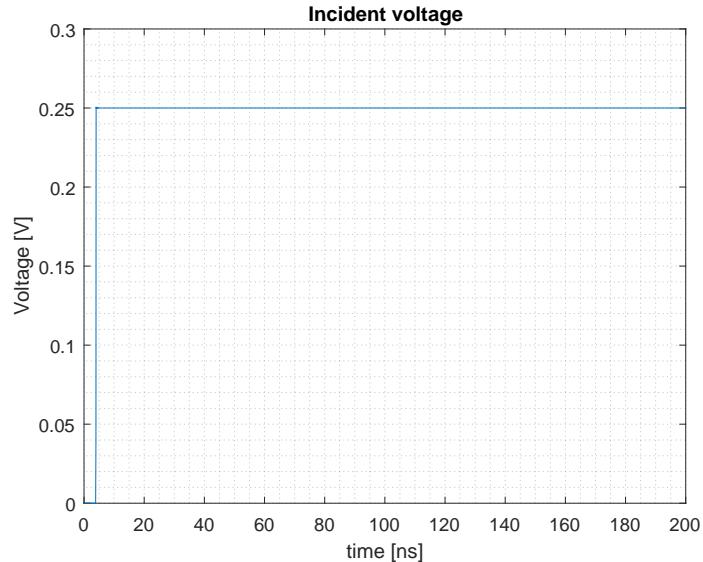


Figura 5.10: Pulso incidente construido para las sondas simuladas en gprMax.

#### 5.1.4. Simulación y lectura de los datos simulados

La sonda simulada se construye mediante una biblioteca de Python, con dos funciones, y se inserta en gprMax mediante la implementación de los comandos #python: y #end\_python:, que permiten insertar código Python en los scripts de gprMax. En medio de los comandos #python: y #end\_python:, se insertan las instrucciones para cargar la sonda es decir: se importa la biblioteca de la sonda, se hace el llamado a la función de definición de materiales y se hace el llamado a la función que inserta la sonda.

Las funciones que se deben llamar desde el script de gprMax son:

- `CS610_materials()`
- `insert_probe(x, y, z, ext_file, waveformname, rotate90)`

La función `CS610_materials()` se encarga de definir las características eléctricas de los materiales que componen la sonda. Esta función no tiene argumentos ya que los materiales de la sonda son siempre los mismos.

La función `insert_probe()` se encarga de construir la sonda e introducirla en el dominio. Los argumentos de esta función son:

- `x` (float): Ubicación de la sonda sobre el eje  $x$ , ubica el centro de la sonda en esta posición [m].
- `y` (float): Ubicación de la sonda sobre el eje  $y$ , ubica el centro de la sonda en esta posición [m].
- `z` (float): Ubicación de la IED sobre el eje  $z$ , ubica el punto superior de la sonda en esta posición [m].
- `ext_file` (string): Nombre del archivo con el pulso de excitación. El archivo debe estar ubicado en la misma carpeta del sistema que el script a correr.
- `waveformname` (string): Nombre que identifica al pulso de excitación en el simulador.
- `rotate90` (bool): Bandera que indica si la sonda se rota 90 grados sobre el plano  $x, y$ .

Antes de introducir la sonda en el dominio de simulación se debe definir el medio a caracterizar. Luego se inserta la sonda, teniendo en cuenta que las varillas expuestas deben quedar completamente inmersas en el medio a caracterizar. Ya con la sonda insertada se puede simular el script. A continuación se muestra un ejemplo donde se inserta la sonda en agua desionizada, en la Figura 5.11 se muestra el escenario generado.

```
#title: 23_CS610
#domain: 0.2 0.5 0.2
#dx_dy_dz: 0.001 0.001 0.001
#time_window: 200e-9

#material: 4.22 0 1 0 dem_water
#add_dispersion_debye: 3 0.0719 5.84e-09 36.2356 1.11e-11 38.3546 8.04e-12 dem_water
#box: 0 0 0 0.2 0.4 0.2 dem_water

#python:
import user_libs.TDR.CS610_txline as CS610
CS610.CS610_materials()
CS610.insert_probe(0.1,0.45,0.1,'TDR_waveform.txt','TDR_pulse',False)
#end_python:

#geometry_view: 0 0 0 0.2 0.5 0.2 0.001 0.001 0.001 23_CS610 n
```

## 5.2. Calibración de las mediciones

Incluso en simulación es necesario calibrar las sondas de TDR para obtener la longitud efectiva de las varillas ( $L_e$ ) y el factor de forma ( $g$ ). La longitud efectiva ( $L_e$ ) corresponde a la longitud de las varillas percibida por las ondas electromagnéticas, esta longitud difiere ligeramente de la longitud mecánica. La longitud efectiva se obtiene

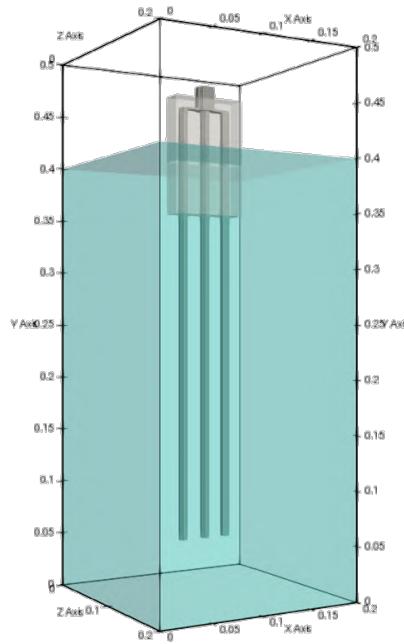


Figura 5.11: Sonda simulada en agua desionizada.

del análisis de permitividad aparente de dos materiales conocidos. El factor de forma ( $g$ ) es el parámetro utilizado para encontrar la conductividad de las mediciones, este parámetro compensa la diferencia entre la sonda TDR y una línea de transmisión coaxial. El factor de forma se obtiene del análisis de conductividad de dos materiales conocidos.

Los materiales utilizados para calibración en este proyecto son: etanol-96 % y agua desionizada, para las mediciones; y etanol-90 % y agua desionizada, para las simulaciones. La caracterización teórica de estos materiales se tomó de Sato y Buchner [39]. Los resultados para las diferentes sondas se muestran en la Tabla 5.1. Los algoritmos de calibración se encuentran en los apéndices A.6 y A.7.

	CS610	Artesanal epóxica	Simulada 1	Simulada 2
$L_e$	0.4302	0.3347	0.3233	0.3641
$g$	0.2150	0.2622	1.5352	1.1960

Tabla 5.1: Parámetros de calibración para las diferentes sondas.

### 5.3. Recuperación de la permitividad relativa compleja

El desarrollo del algoritmo que recupera la permitividad de los materiales se hizo originalmente sobre las señales simuladas. Trabajar con el TDR en simulación tiene la ventaja que siempre se conoce de antemano la permitividad de los medios donde se ubica la sonda y por lo tanto se tiene el resultado esperado disponible para comparar contra el resultado obtenido.

Durante el desarrollo del proyecto se crearon simuló la sonda en más de 50 medios diferentes. Las caracterizaciones resultantes de 5 medios, los medios denominados por letras son medios que no tienen ninguna base física pero fueron creados en simulación para probar el algoritmo en condiciones específicas.

### 5.3.1. Resultados de simulación

A continuación se presentan los resultados de simulación para la sonda inmersa en los medios descritos en la Tabla 5.2. Las propiedades verdaderas de los medios se muestran bajo las columnas con título “Entrada” En las Figuras 5.12 - 5.16 se muestran la gráficas de la señal reflejada, el análisis de permitividad aparente, el análisis de conductividad, el análisis de permitividad en frecuencia cero y el análisis del parámetro  $S_{11}$  para el medio “A”.

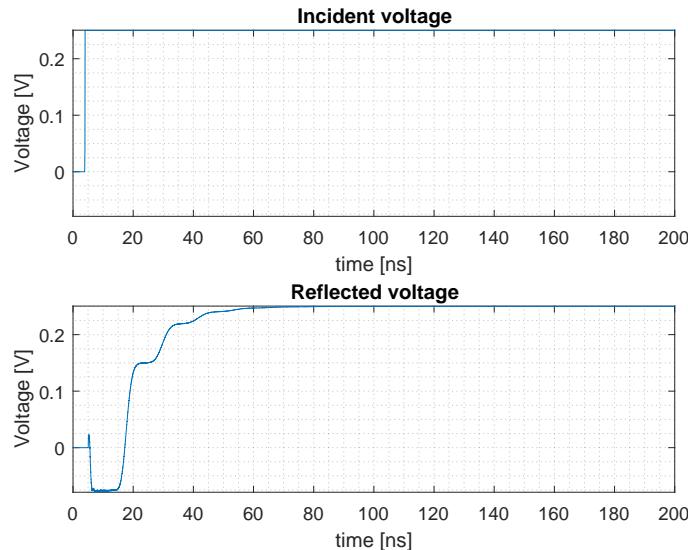


Figura 5.12: Voltaje incidente y reflejado por la sonda inmersa en el *Medio A*.

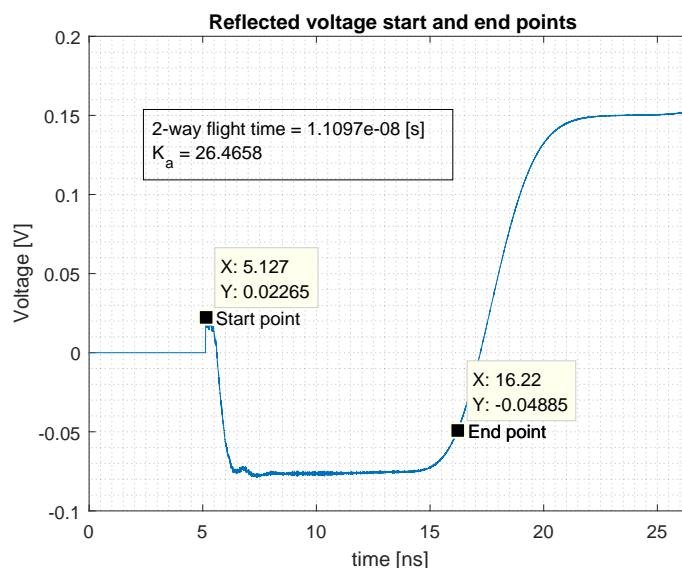
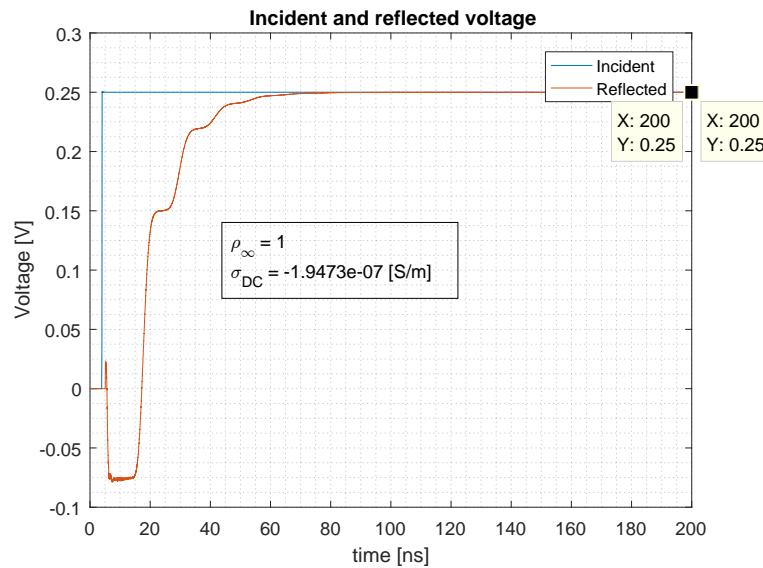
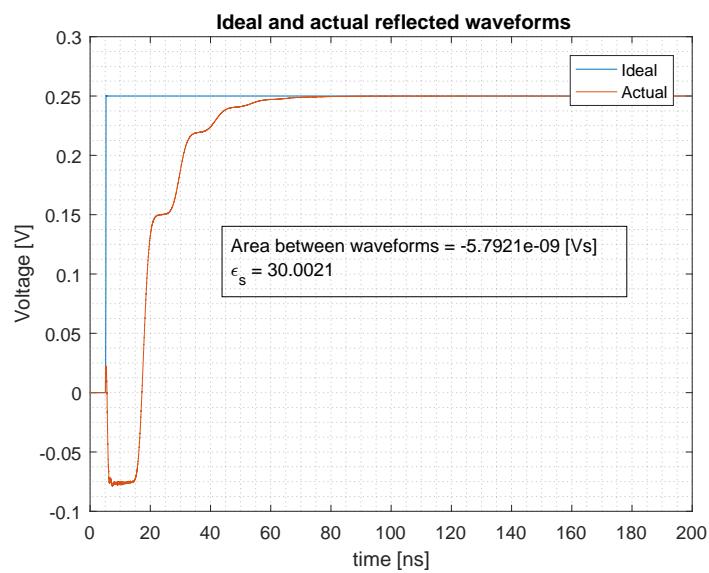
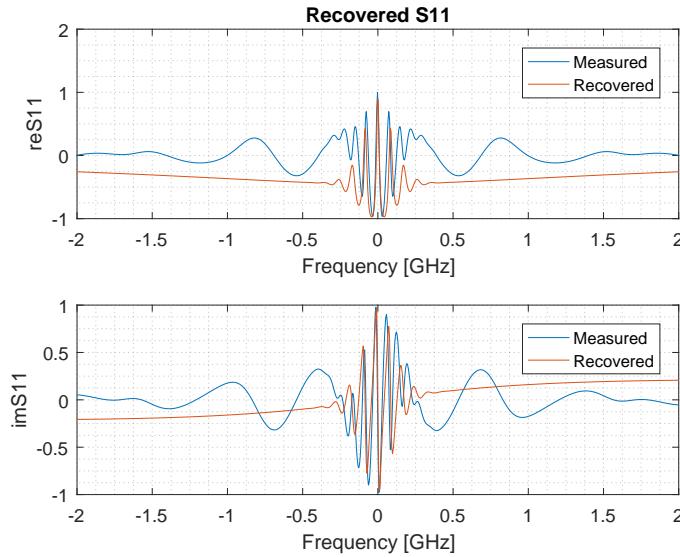


Figura 5.13: Análisis de permitividad aparente ( $K_a$ ) para el *Medio A*.

Figura 5.14: Análisis de conductividad ( $\sigma_{DC}$ ) para el Medio A.Figura 5.15: Análisis de permitividad estática ( $\epsilon_s$ ) para el Medio A.

Figura 5.16: Parámetro  $S_{11}$  medido y recuperado para el Medio A.

### Validación de los resultados

En la Tabla 5.2 se pueden ver los resultados obtenidos de la caracterización eléctrica de los medios, bajo las columnas con título “Recuperados”: los parámetros del modelo Debye y la conductividad. En las Figura 5.17 se comparan los resultados obtenidos de la caracterización contra la definición original de los medios.

Medio:	A		B		C		D		E	
Parametros	Entrada	Recuperados	Entrada	Recuperados	Entrada	Recuperados	Entrada	Recuperados	Entrada	Recuperados
$\epsilon_s$	30	30.0021	25.2	30.2309	30.3	30.7624	26.5	17.2759	79.9	76.019
$\epsilon_\infty$	5	3.9927	4.52	5.8310	5.3	4.1713	2.68	2.759	4.22	2.32
$f_{rel}$	800 MHz	801.2 MHz	124 MHz	106 MHz	17.3 GHz	12.22 GHz	1.12 GHz	1.15 GHz	17 GHz	17.7 GHz
$\tau_0$	199 ps	198.65 ps	1.27 us	1.50 us	9.2 ps	13.02 ps	142 ps	138.39 ps	9.36 ps	8.99 ps
$\sigma_{DC}$ [S/m]	0	-1.94x10^-7	0.00992	0.0073	0.003	0.0022	0	-1.66x10^-7	0	2.58x10^-5
$K_a$		26.4658		15.1187		32.692		26.5854		83.6034

Tabla 5.2: Parámetros que describen eléctricamente los medios simulados y los parámetros de los medios recuperados por el algoritmo.

### 5.3.2. Validación del algoritmo para mediciones

Con la técnica ya validada en simulación se procedió a revisar el funcionamiento del algoritmo para las dos sondas físicas. Se utilizaron como medios para la validación los mismos medios utilizados para obtener la longitud efectiva y el factor de forma: etanol-96 % y agua desionizada. Cabe aclarar que el análisis en frecuencia no se ve afectado por la calibración de los parámetros anteriores y por lo tanto se tiene una prueba ciega, es decir que conocer el resultado esperado no afecta el resultado obtenido por el algoritmo.

Primero se verificaron discrepancias entre la respuesta de las sondas. En la Figura 5.18 se puede ver la comparación del voltaje reflejado entre las sondas en aire, etanol-96 % y agua desionizada. Es evidente que existen diferencias en los tiempos de retardo de las respuestas, esto se debe a la longitud del cable con que se hace la medición. Fuera

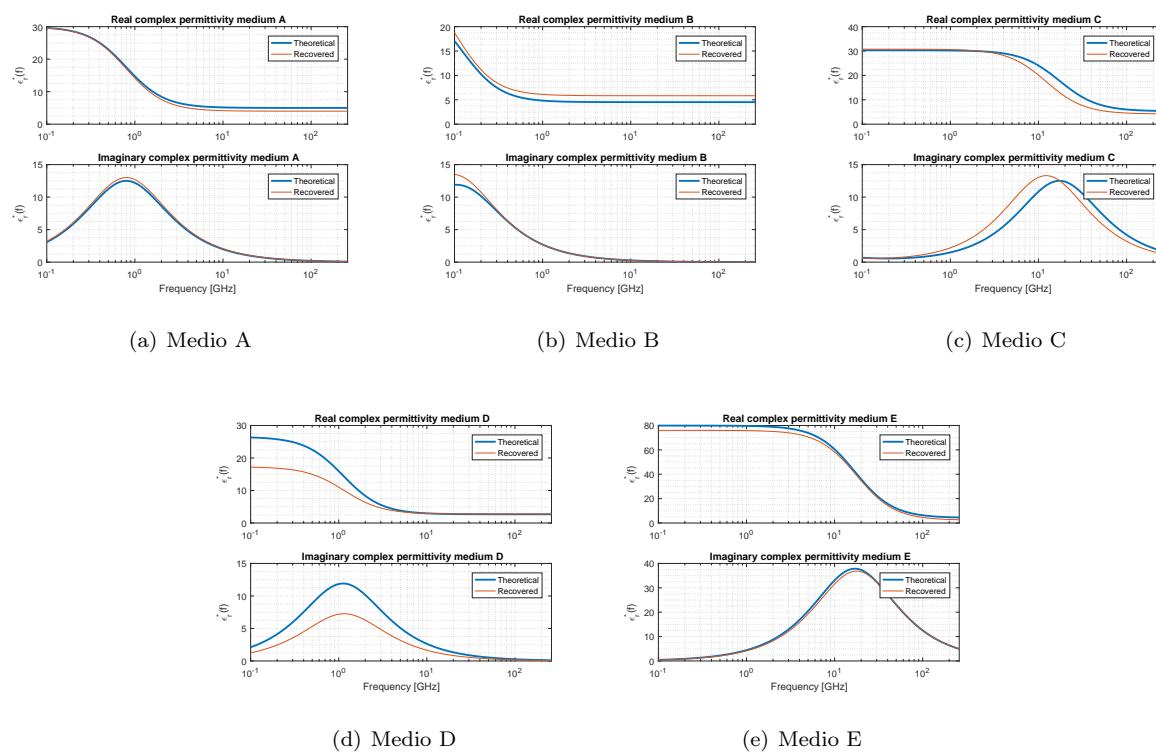


Figura 5.17: Permitividad relativa compleja: teórica y recuperada.

de esto, las mediciones son muy parecidas y los parámetros recuperados de ellas también. Sin embargo el estado estable de la sonda CS610 es mejor que el de la sonda fabricada, por eso se utiliza esta para obtener todos los resultados mostrados más adelante en el documento.

La gráfica de voltaje reflejado obtenido corresponde al mostrado en la Figura 5.19. En la Figura 5.20 se muestra el análisis de la permitividad aparente en los dos materiales. En la Figura 5.21 se muestra el análisis de conductividad. En la Figura 5.22 se muestra el análisis de permitividad en estática. En la Figura 5.23 se muestra el parámetro de dispersión  $S_{11}$  obtenido de las mediciones. En la Figura 5.24 se muestra el parámetro  $S_{11}$  recuperado con el algoritmo y el parámetro  $S_{11}$  de las mediciones. Finalmente en la Figura 5.25 se muestra la permitividad recuperada y la permitividad teórica de ambos materiales. La permitividad recuperada es bastante parecida a la permitividad teórica para el rango de frecuencias de interés por lo tanto se valida el funcionamiento del algoritmo.

## 5.4. Medición de suelos colombianos

Con el algoritmo validado para las mediciones con el TDR-200 se puede proceder a hacer las mediciones en campo de los suelos colombianos. Antes de seleccionar los suelos se estudió que parámetros influyen para que se presenten diferencias en los suelos. Castro et. al del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) [40] afirma que el suelo varía significativamente con el ambiente, clima, mineralogía, geografía y el uso que se le da en los diferentes sitios donde se encuentra.

Utilizando la caracterización de mineralogía, vegetación y usos, y descripción del suelo del IGAC [41] se seleccionaron 5 sitios en Colombia cercanos entre sí, con diferentes propiedades. Los sitios donde se tomaron las mediciones son:

- Prado de San Albeto Magno, Universidad de los Andes, Bogotá D.C.
- Hacienda el Noviciado, Universidad de los Andes, Cota, Cundinamarca
- Ubaté, Cundinamarca
- Vereda Quintoque, San Miguel de Sema, Boyacá
- Desierto de la Candelaria, Ráquira, Boyacá

El mapa en la Figura 5.26 muestra la ubicación de los sitios escogidos y en la Tabla 5.3 la descripción de los suelos en estos sitios. En las Figuras 5.27 - 5.31 se muestran fotografías de los sitios de medición.

### 5.4.1. Descripción del procedimiento de medición

Primero se hizo la medición en el prado de San Alberto Magno en la Universidad de los Andes. En este terreno fue necesario abrir los huecos para las sondas previamente, ya que después de enterrar 20 cm de las varillas de las sondas el suelo más profundo y compacto impedía seguir enterrándolas (ver Figura 5.32(a)). Para no dañar las sondas de medición, se creó una sonda inerte utilizando varillas exactamente iguales y con la misma separación pero unidas por el cabezal sin el conector SMA. La sonda inerte se enterró a la profundidad máxima alcanzada normalmente y luego se le golpeó con un mazo plástico repetidamente en su cabezal, hasta enterrarla completamente. Sacar la sonda completamente enterrada probó ser difícil también; para sacarla se hizo palanca con una llave uniformemente por todos los lados de la sonda (para no doblar las varillas), una vez se desenterraran 5 cm de la sonda se haló con fuerza para sacarla. Con los huecos ya hecho la sonda comercial y la fabricada con resina epoxica entraron fácilmente,

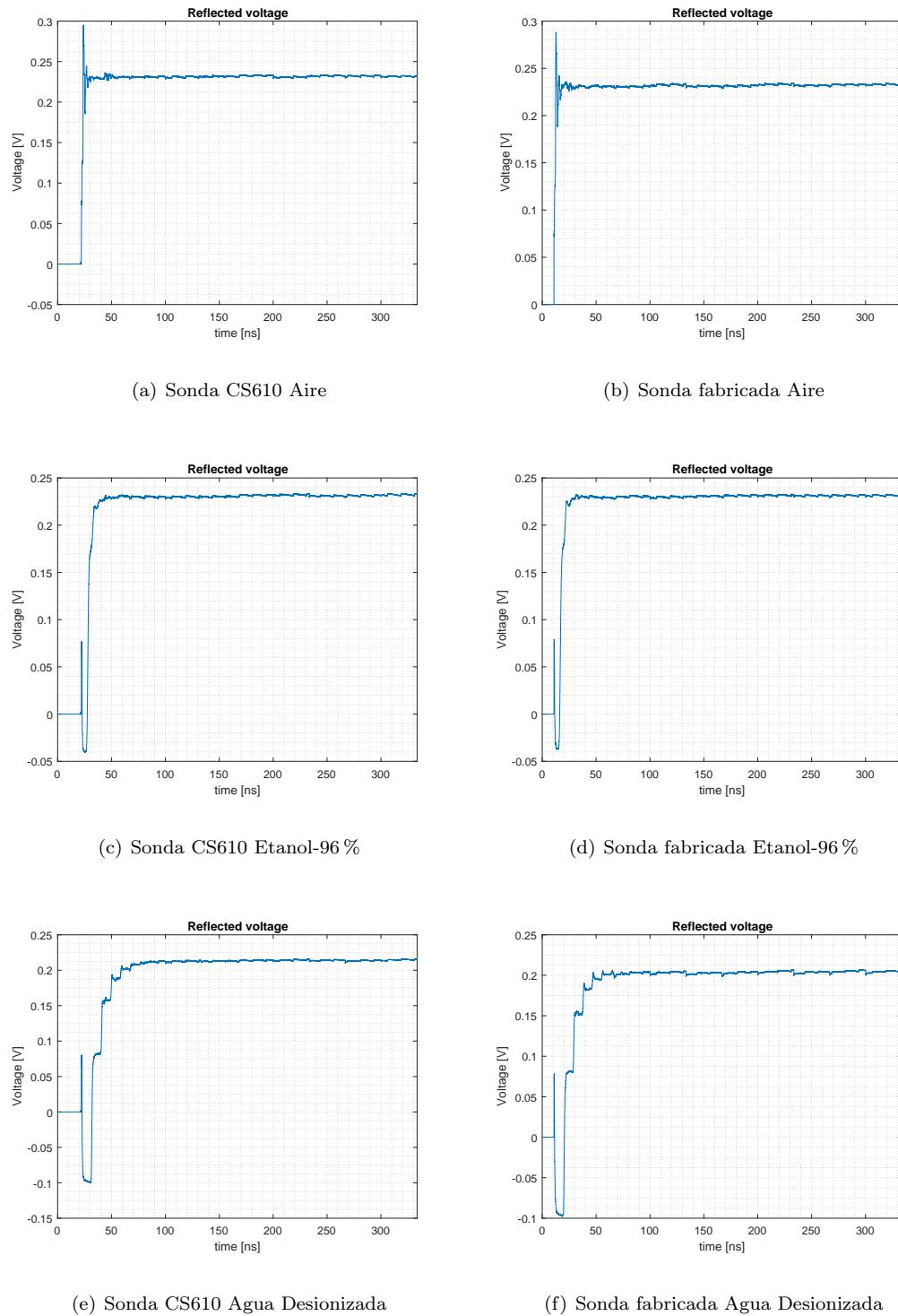


Figura 5.18: Comparación del voltaje reflejado por las sondas.

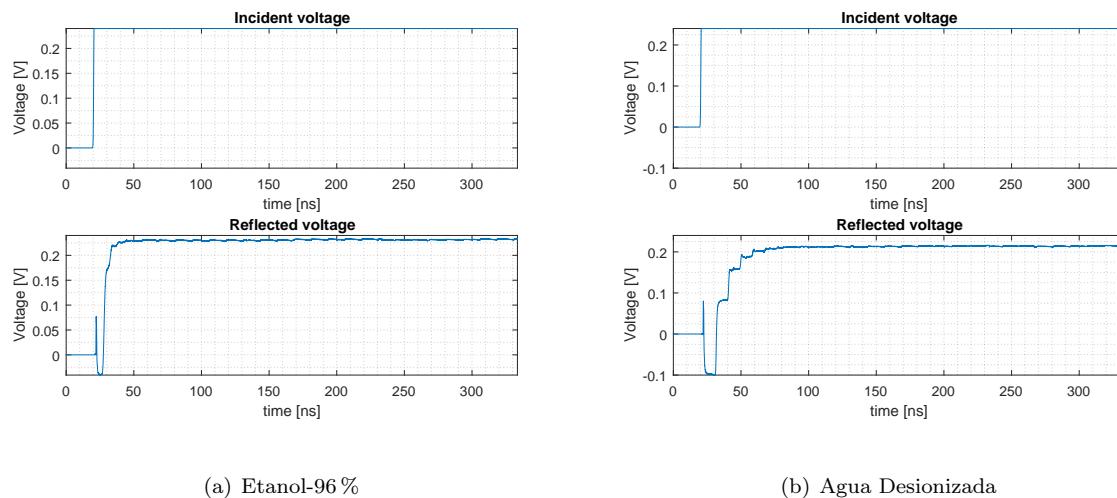


Figura 5.19: Voltaje incidente y reflejado sobre la sonda.

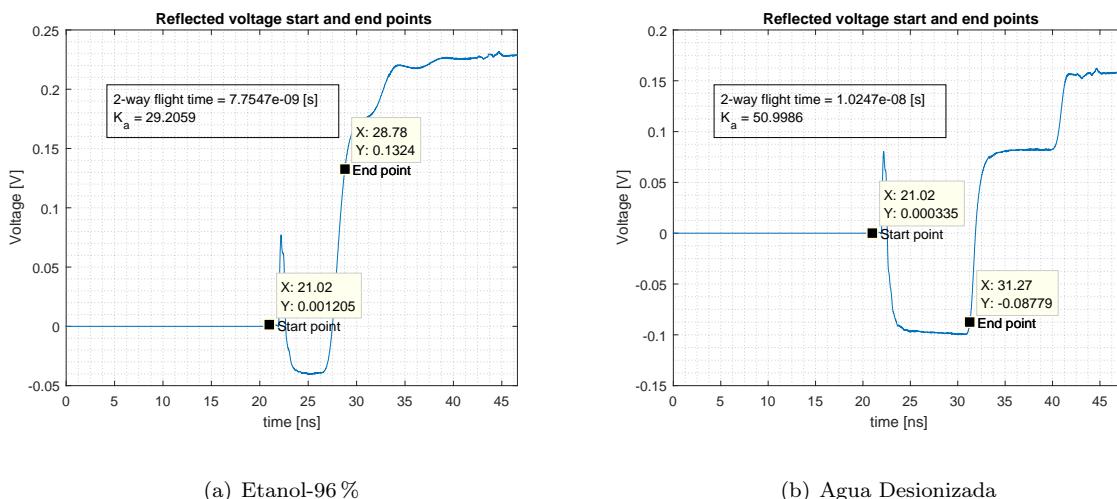


Figura 5.20: Análisis de permitividad aparente.

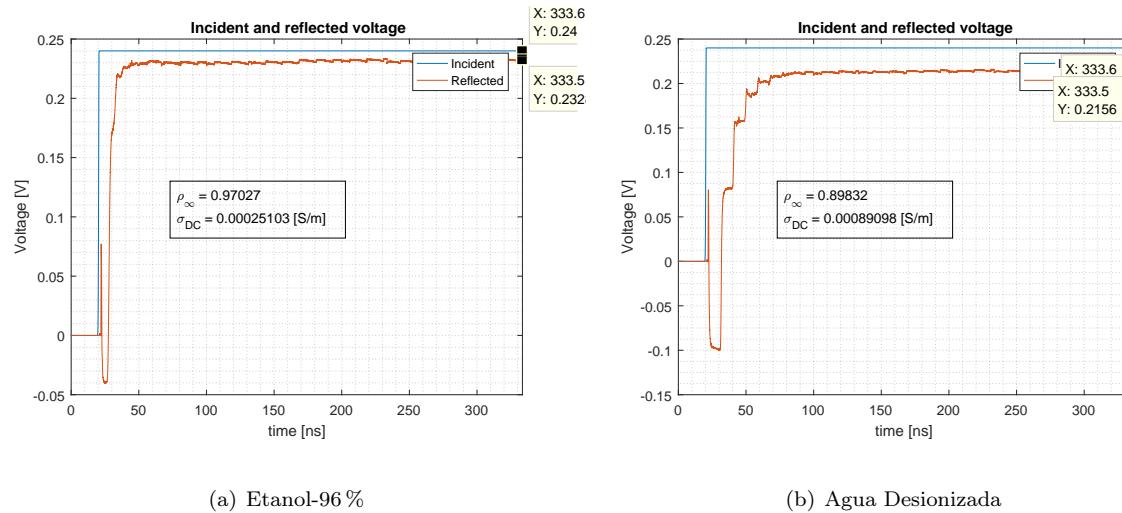


Figura 5.21: Análisis de conductividad.

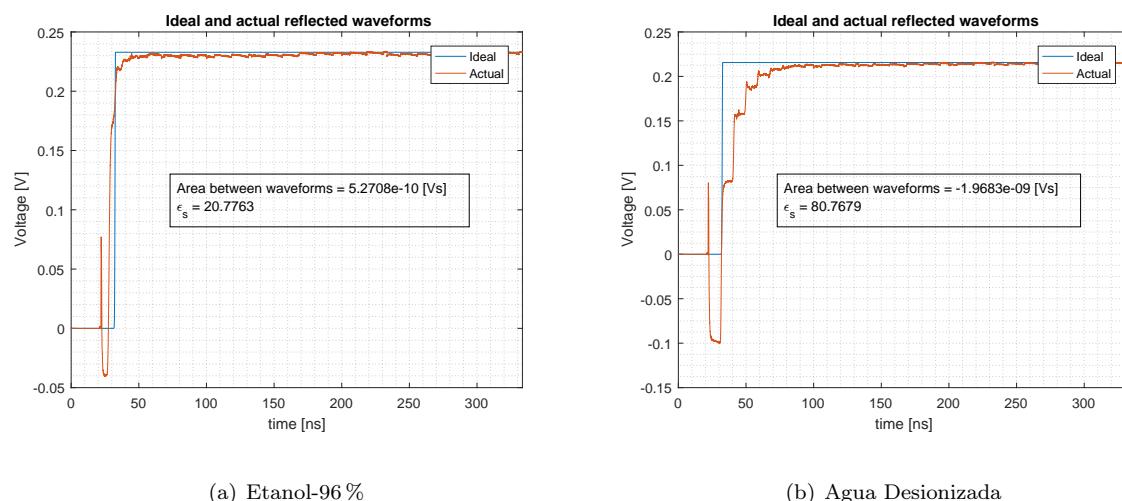
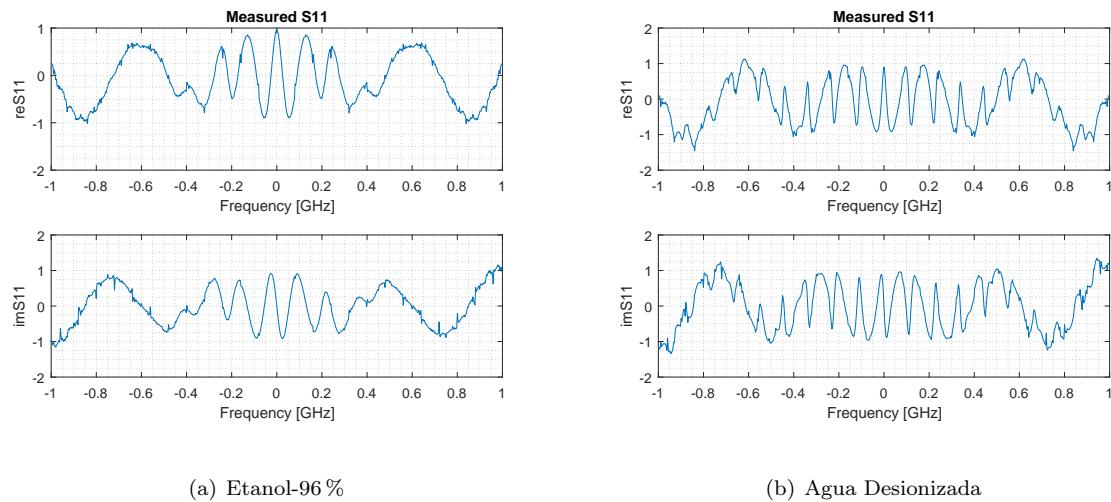
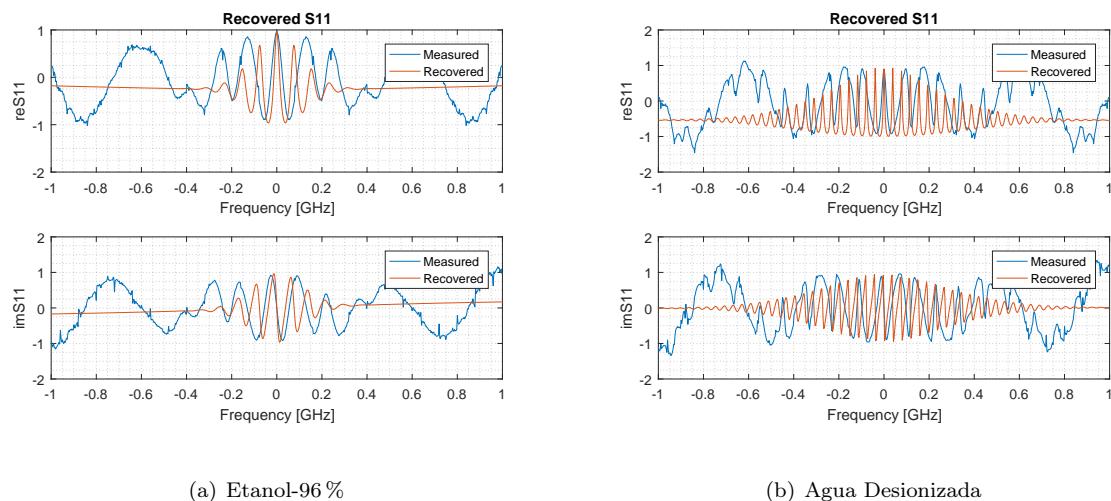


Figura 5.22: Análisis de permitividad estática.

Figura 5.23: Parámetro  $S_{11}$  medido.Figura 5.24: Parámetro  $S_{11}$  medido y recuperado.

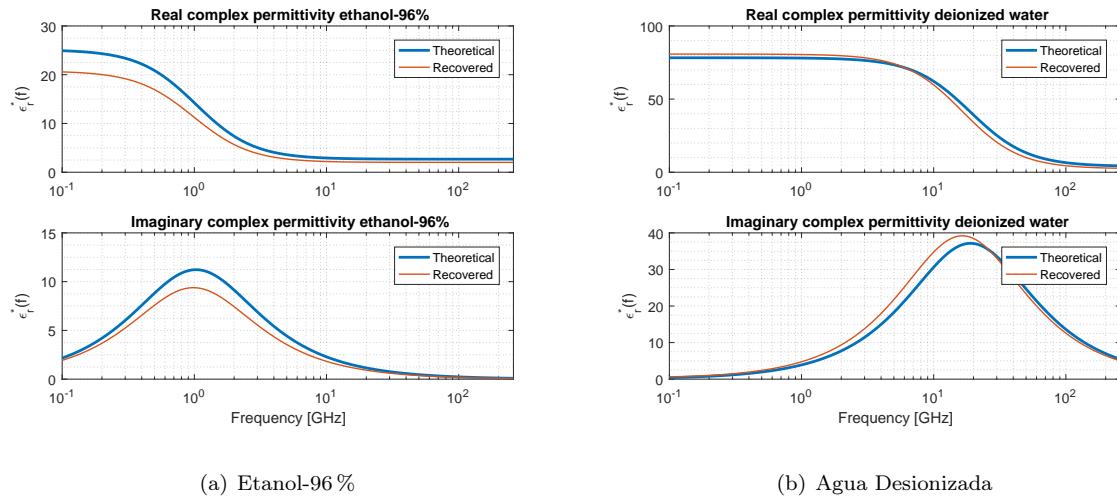
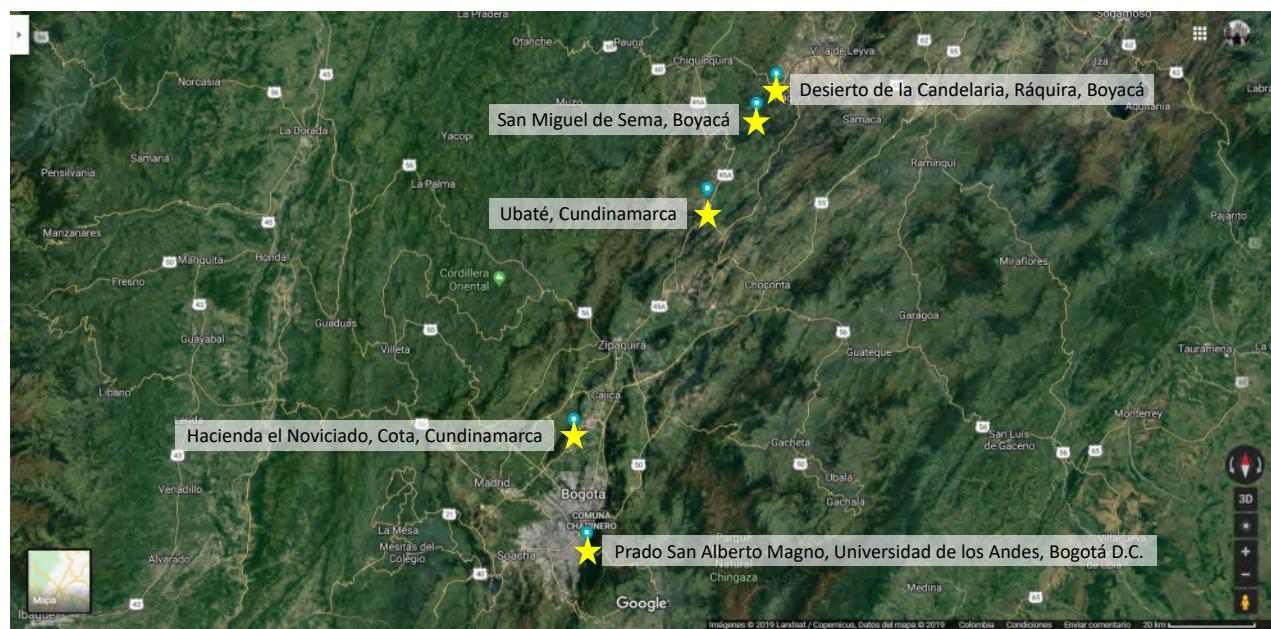


Figura 5.25: Permitividad relativa compleja: teórica y recuperada.

Figura 5.26: Mapa con ubicación de los sitios de medición. *Ubicaciones y mapa tomados de Google Maps App.*

	San Alberto Magno	Hacienda el Noviciado	Ubaté	San Miguel de Sema	Desierto de la Candelaria
<b>Mineralogía de fracción de arena</b>	Feldespato - Vidrio volcánico Anfíboles - Cuarzo (FVAQ)	Cuarzo - Feldespato Anfíboles (QFA)	Cuarzo - Feldespato Anfíboles (QFA)	Cuarzo - Feldespato Anfíboles - Vidrio volcánico Alterados (QFVAL)	Cuarzo - Feldespato Alterados (QFAL)
<b>Mineralogía de fracción de arcilla</b>	Montmorillonita Caolinita (MtK)	Caolinita - Micas Allofanita (KMA)	Caolinita - Micas Allofanita (KMA)	Caolinita - Micas Cuarzo (KMQ)	Caolinita - Micas Cuarzo (KMQ)
<b>Vegetación y uso</b>	Pastos manejados: Áreas con adecuación civil, control de maleza y fertilización	Misceláneos: Áreas con cultivos transitorios, perennes y semi-perennes	Pastos manejados: Áreas con adecuación civil, distribución y rotación de corrales	Pastos manejados: Áreas con pastizales densos, distribución y rotación de corrales	Pajonales y áreas sin vegetación
<b>Descripción del suelo</b>	Suelos de climas muy fríos, húmedos a muy húmedos, en áreas de páramo, ácidos y poco saturados	Suelos desarrollados en áreas de todos los climas, deprimidas e inundadas	Suelos de climas muy fríos, húmedos a muy húmedos, en áreas de páramo, ácidos y poco saturados	Suelos desarrollados en áreas de todos los climas, deprimidas e inundadas	Áreas severamente erosionadas
<b>Temperatura de medición (°C)</b>	16	17	12	17	22

Tabla 5.3: Descripción de los suelos en los sitios de medición. Extraída los mapas del Instituto geográfico Agustín Codazzi [41].



Figura 5.27: Fotografías de las mediciones en San Alberto Magno.



Figura 5.28: Fotografías de las mediciones en Hacienda el Noviciado.



Figura 5.29: Fotografías de las mediciones en Ubaté.

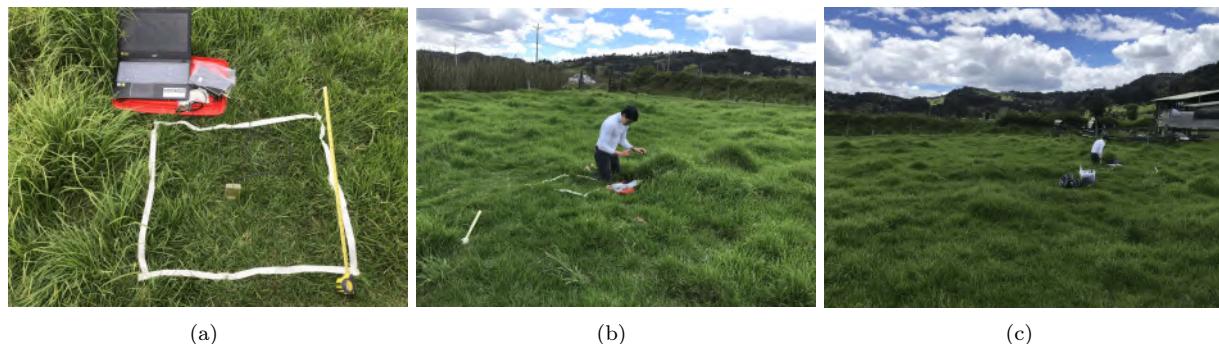


Figura 5.30: Fotografías de las mediciones en San Miguel de Sema.

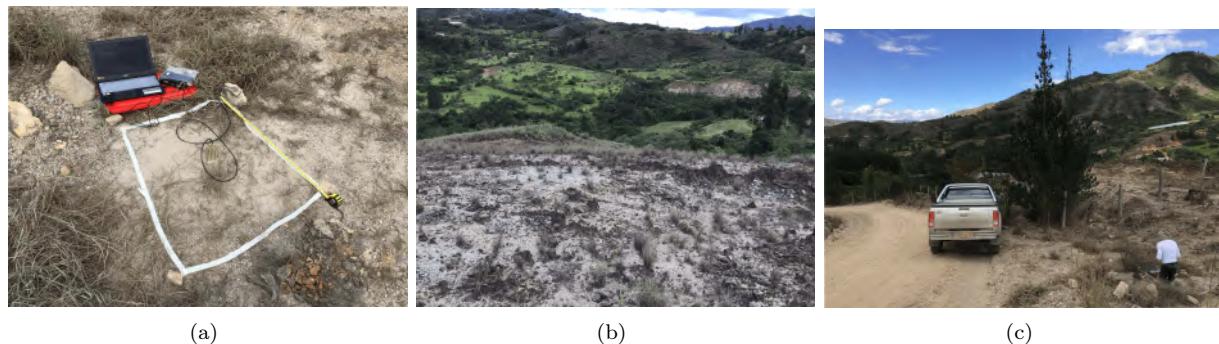


Figura 5.31: Fotografías de las mediciones en el desierto de la Candelaria.

y se realizaron las mediciones. Las mediciones en la Hacienda el Noviciado, Ubaté y el Desierto de la Candelaria presentaron el mismo problema al enterrar las sondas. Para estos casos, con base en la experiencia en adquirida en el primer sitio de medición, se utilizó una broca de las dimensiones de las varillas para abrir previamente los huecos. La broca fue enterrada y desenterrada con ayuda de un villamarquin como se muestra en la Figura 5.32(b).



Figura 5.32: Fotografías del procedimiento de medición.

El software PC-TDR controla las mediciones que se realizan con el TDR-200 desde un computador, donde se especifica para cada medición: la cantidad de promedios a tomar, el número de muestras, la longitud del cable, la ventana de tiempo, la longitud enterrada de las varillas, la longitud total de las varillas (enterrada + cabezal) y la permitividad del cabezal. En la Figura 5.33 se muestra la ventana de mediciones del software. Para realizar una medición las sondas se conectan al TDR-200, por medio del cable coaxial, y el TDR-200 al computador por la interfaz USB. Los valores de amplitud de reflexión y la configuración de las mediciones se almacenan en un archivo de texto .dat. Este archivo posteriormente es leído por un script de Matlab para obtener la curva del voltaje reflejado y hacer todo el análisis del algoritmo.

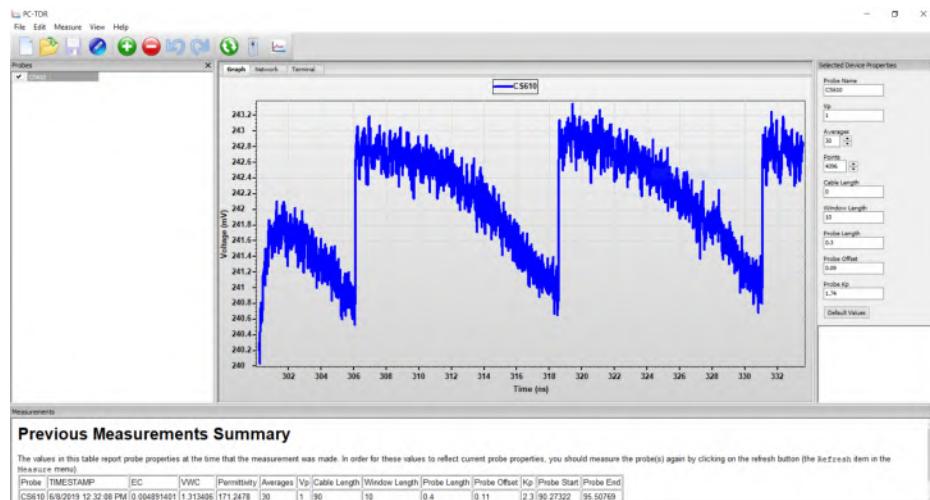


Figura 5.33: Interfaz de medición del software PC-TDR.

### 5.4.2. Resultados de mediciones

En la Tabla 5.4 se presentan los resultados de la caracterización de los suelos. En la Figura 5.34 se presentan las gráficas obtenidas para cada medición realizada en los sitios.

	<b>San Alberto Magno</b>	<b>Hacienda el Noviciado</b>	<b>Ubaté</b>	<b>San Miguel de Sema</b>	<b>Desierto de la Candelaria</b>
$\varepsilon_s$	14.62	29.8685	6.7487	30.8998	35.1896
$\varepsilon_\infty$	4.156	3.708	4.0838	3.76446	4.2156
$f_{relax}$	2.4875 GHz	9.6862 GHz	6.6423 GHz	873.26 MHz	595.19 MHz
$\tau_0$	63.98 ps	16.43 ps	23.96 ps	182.25 ps	267.4 ps
$\sigma_{DC}$ [S/m]	0.0074	0.0081	0.0068	0.0060	0.0011
$K_a$	25.6404	14.2292	8.0144	27.7512	8.2224

Tabla 5.4: Parámetros del modelo de relajación Debye recuperados para los suelos colombianos.

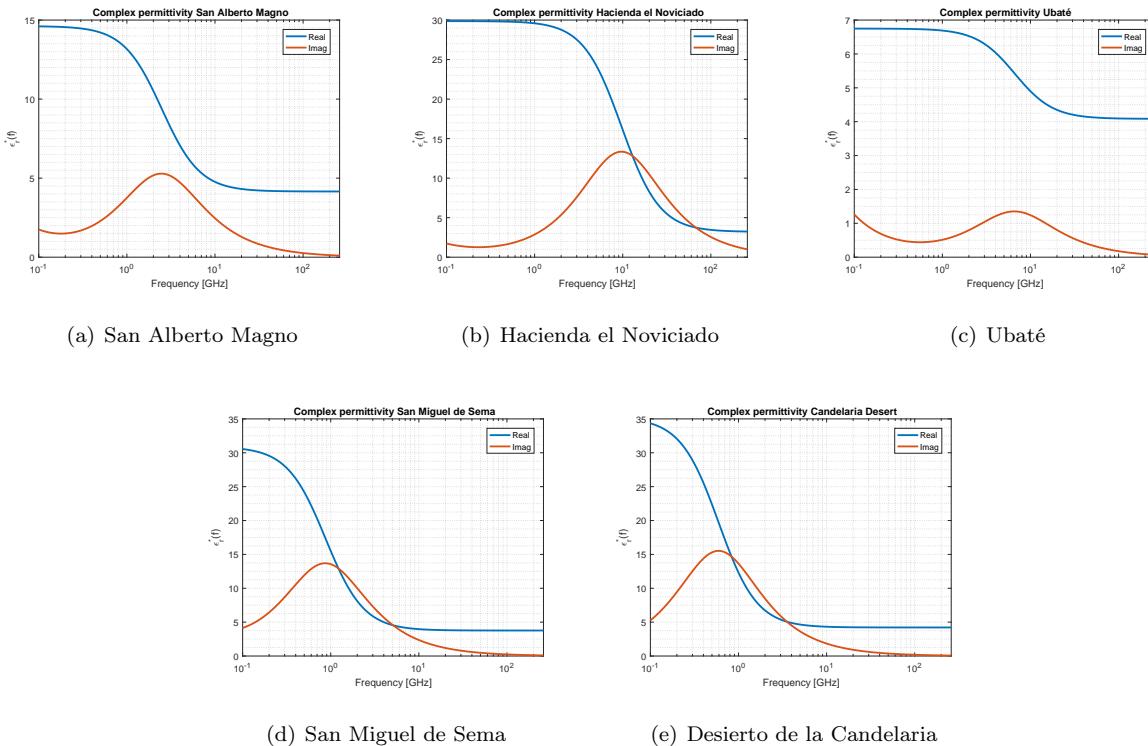


Figura 5.34: Permitividad relativa compleja recuperada de los suelos.

## Capítulo 6

# Artefactos explosivos improvisados

Las IEDs producidas en Colombia por los grupos al margen de la ley se componen de una variedad de mecanismos de activación, explosivos, cubierta y metralla. A continuación se enuncian algunas configuraciones comunes para cada parte de la IED. Mecanismos de activación: jeringas, cables de trampa, ganchos de ropa, trampas para ratones, cuñas y controles remotos. Explosivos: nitrato de amonio, mezclas de nitrato de amonio con aceites combustibles (ANFO), mezclas de aluminio con ANFO (ALANFO), mezclas de aserrín con ALANFO (R1), hidro-geles, emulsiones, nitroglicerina y trinitrotolueno (TNT). Cubierta: materiales plásticos (tubos de PVC, botellas, etc.), textiles, vidrio y madera. Metralla: estiércol, vidrio, puntillas y pedazos plásticos [2, 3, 42].



Figura 6.1: Artefactos explosivos improvisados en Colombia. Extraídas de [2, 3, 42].

En la Figura 6.1 se muestran fotografías de algunos artefactos explosivos improvisados, tomadas de la literatura [2, 3, 42]. A partir de estas se identificó la geometría de la IED en la Figura 6.1(h), tomada de [3], para reproducir en gprMax.

## 6.1. Materiales, componentes y geometría

La IED identificada en la Figura 6.1(h) tiene un recubrimiento, compuesto de un tubo de PVC y dos tapas para el tubo. El mecanismo de activación es a partir de una jeringa; según Hendrickx et al. y Prada y Chávez [2, 3], las jeringas pueden activar el explosivo en la IED de dos formas: eléctricamente o químicamente; el mecanismo de

activación eléctrico consiste en ubicar dos placas metálicas en la jeringa, que al unirse cierran un circuito y activan el explosivo; el mecanismo de activación químico consiste en llenar las jeringas de ácido sulfúrico y llenar el cuerpo de la IED con nitrato de potasio, cuando estos materiales entran en contacto se genera una reacción química que resulta en una explosión. En las IED activadas eléctricamente se ubica una batería, como se ve en la Figura 6.1(a). El explosivo y la metralla se ubica dentro del recubrimiento de la IED y puede componerse de diferentes materiales como se menciona anteriormente.

En la Figura 6.2 se muestra la IED de la Figura 6.1(h) con sus diferentes componentes identificadas en geometrías básicas, para crearla modularmente en gprMax.



Figura 6.2: Componentes de la IED-tubo. Fotografía extraída de [3]

## 6.2. Construcción de un IED en gprMax

Teniendo en cuenta que la fabricación de IEDs es artesanal, existe una gran cantidad de materiales y tamaños para la IED identificada. Con gprMax es posible obtener cualquier tipo de configuración en cuanto a geometría y materiales que se quiera reproducir. Por lo tanto se crearon funciones en Python, donde mediante los parámetros de la función, se da flexibilidad para escoger las dimensiones y los materiales de la IED. Las bibliotecas en Python pueden construir geometrías complejas definiendo celda por celda los diferentes materiales o combinando diferentes geometrías sencillas (i.e. cilindros, paralelepípedos rectangulares, prismas triangulares, esferas, etc.). De esta forma puede reproducirse cualquier IED en gprMax.

Ya que el mecanismo de activación de la IED es la jeringa, se creó una función dedicada para construcción de las jeringas en gprMax. Con base en la fotografía 6.2 se puede ver que se utilizan jeringas estándar con el mecanismo de activación anteriormente discutido. Una jeringa estándar está compuesta de cilindros de diferentes tamaños: un cilindro pequeño en la punta, un cilindro grande que es el cuerpo de la jeringa y los cilindros del mecanismo que empuja el contenido de la jeringa. Por lo tanto para crear la jeringa en gprMax se utilizaron cilindros con diferentes longitudes y diámetros. Para que la jeringa guarde la proporción con la IED insertada, su tamaño está definido por el tamaño de las diferentes IED. Los mecanismos de activación eléctrico y químico se representan también a través de cilindros; en el caso eléctrico, dos cilindros metálicos delgados que representan los contactos; y en el caso químico ácido sulfúrico líquido que toma la forma de la jeringa. En la figura 6.3 se muestran las jeringas en gprMax, con

diferentes tamaños y mecanismos de acción.

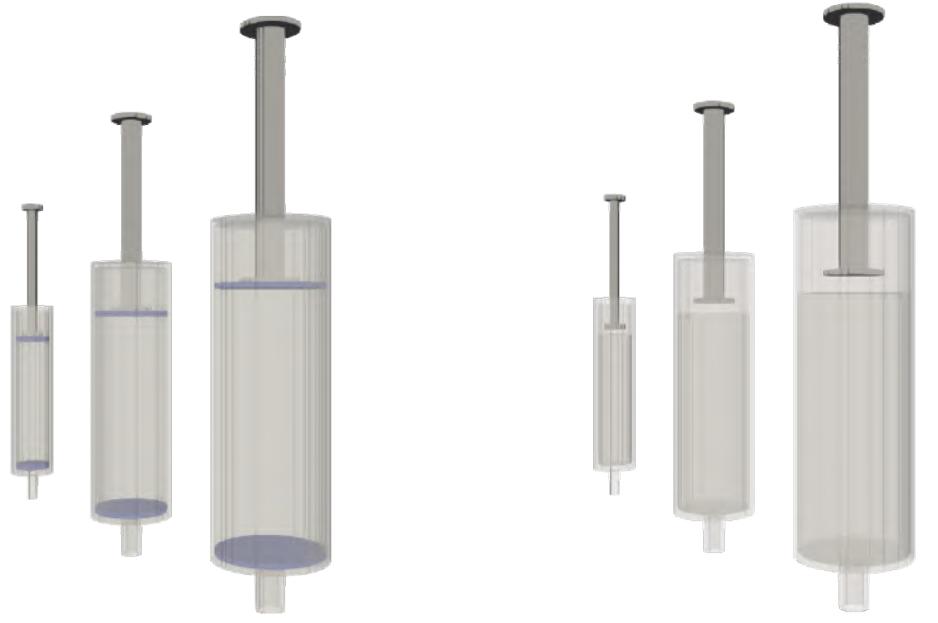


Figura 6.3: Modelo geométrico de las jeringas en gprMax.

El cuerpo de la IED se compone de cilindros, un cilindro sin tapas que representa el tubo y dos cilindros con una sola tapa que representan las tapas en el extremo del tubo. Las paredes de la IED por defecto se crean en PVC, pero para hacer la función más flexible el material de las paredes puede ser modificado por parámetro. Del mismo modo, el explosivo por defecto es ANFO y puede ser modificado a otro explosivo mediante los parámetros. Con los parámetros también se puede indicar si el mecanismo de acción es eléctrico o químico, si la IED tiene metralla, y las dimensiones de la IED: altura y diámetro. En la figura 6.4 se muestran diferentes configuraciones en gprMax de la IED-tubo.

Las funciones de Python encargadas de construir la IED que se llaman desde gprMax son:

- `IED_materials(enclosure, explosive, first_run, **kwargs)`
- `pipeIED(x, y, z, height, width, resolution, rotate90, elec_mechanism, enclosure, explosive, shrapnel)`

En la función `IED_materials()` se define la descripción eléctrica de los materiales que describen la IED de la siguiente forma:

- `enclosure` (string): Nombre del material que define el recubrimiento de la IED [PVC, Glass, Wood, *otro*].
- `explosive` (string): Nombre del material que define el material del explosivo [Ammonium\_Nitrate, ANFO, ALANFO, R1, Nitroglicerina, TNT, Potassium\_Nitrate, *otro*].
- `first_run` (bool): Bandera que indica si es el primer llamado a la función en un script. Esta bandera es útil cuando se insertan varias IED en un mismo script y estas son de materiales diferentes.



Figura 6.4: Modelo geométrico de las IED-tubo con diferentes configuraciones en gprMax.

- `kwargs (dict)`: Variables opcionales para definir las propiedades eléctricas de los materiales que se ingresan diferentes a los materiales por defecto.
  - `enc_er (float)`: Permitividad relativa del recubrimiento
  - `enc_mr (float)`: Permeabilidad relativa del recubrimiento
  - `enc_sg (float)`: Conductividad del recubrimiento [S/m]
  - `exp_er (float)`: Permitividad relativa del explosivo
  - `exp_mr (float)`: Permeabilidad relativa del explosivo
  - `exp_sg (float)`: Conductividad del explosivo [S/m]

En la función `pipeIED()` se inserta la IED en el dominio de simulación de la siguiente forma:

- `x (float)`: Ubicación de la IED sobre el eje  $x$ , ubica el centro de la IED en esta posición [m].
- `y (float)`: Ubicación de la IED sobre el eje  $y$ , ubica el centro de la IED en esta posición [m].
- `z (float)`: Ubicación de la IED sobre el eje  $z$ , ubica la tapa inferior de la IED en esta posición [m].
- `height (float)`: Altura de la IED [m].
- `width (float)`: Radio de la IED [m].
- `resolution (float)`: Resolución espacial para construir la IED [m].
- `rotate90 (bool)`: Bandera que indica si la IED se rota 90 grados sobre el plano  $x, y$ .

- elec\_mechanism (bool): Bandera que indica el mecanismo de activación de la IED. Si es verdadero es una IED eléctrica y si es falso es una IED química.
- enclosure (string): Nombre del material que define el recubrimiento de la IED [PVC, Glass, Wood, *otro*].
- explosive (string): Nombre del material que define el material del explosivo [Ammonium\_Nitrate, ANFO, ALANFO, R1, Nitroglicerín, TNT, Potassium\_Nitrate, *otro*].
- shrapnel (bool): Bandera que indica si la IED contiene metralla.

Las funciones llamadas desde gprMax se encargan de llamar a las demás funciones que ayudan a construir la IED: `shrapnel_circle()`, `shrapnel_prism()` y `syringe()`. La biblioteca que contiene estas funciones se puede encontrar en el apéndice A.2.

La IED se inserta en gprMax mediante la implementación de los comandos `#python:` y `#end_python:`, que permiten insertar código Python en los scripts de gprMax. En medio de los comandos `#python:` y `#end_python:`, se insertan las instrucciones para cargar la IED es decir: se importa la biblioteca de la IED, se hace el llamado a la función de definición de materiales y se hace el llamado a la función que inserta la IED. Un ejemplo de inserción de la IED en gprMax se muestra a continuación, en la Figura 6.4 se muestra la geometría generada por el script.

```
#title: 09_IED
#domain: 0.5 0.2 0.7
#dx_dy_dz: 0.001 0.001 0.001
#time_window: 10e-9

#python:
import user_libs.IED.IED_v3 as IED
IED.IED_materials(enclosure='Glass', explosive='ANFO')
IED.IED_materials(enclosure='Wood', explosive='TNT', first_run=False)
IED.IED_materials(enclosure='PVC', explosive='ALANFO', first_run=False)
IED.pipe_IED(0.05, 0.1, 0.05, 0.2, 0.05, 0.001, rotate90=False, elec_mechanism=True, enclosure='Glass',
explosive='ANFO', shrapnel=False)
IED.pipe_IED(0.18, 0.1, 0.05, 0.3, 0.06, 0.001, rotate90=False, elec_mechanism=False, enclosure='Wood',
explosive='TNT', shrapnel=True)
IED.pipe_IED(0.35, 0.1, 0.05, 0.4, 0.07, 0.001, rotate90=False, elec_mechanism=True, enclosure='PVC',
explosive='ALANFO', shrapnel=True)
#end_python:

#geometry_view: 0 0 0 0.5 0.2 0.7 0.001 0.001 0.001 09_IED_model n
```

## Capítulo 7

# Detección de IED en simulaciones de radar de penetración de suelos

Al obtener el resultado de la caracterización de suelos en el modelo Debye, la implementación de los suelos en gprMax es directa como se indica en el capítulo 2. Los suelos se introdujeron en la simulación en escenarios independientes como se muestra en la Figura 7.1. Los escenarios son en todos los sentidos iguales excepto en la descripción del suelo, donde se utiliza el suelo caracterizado para cada sitio.

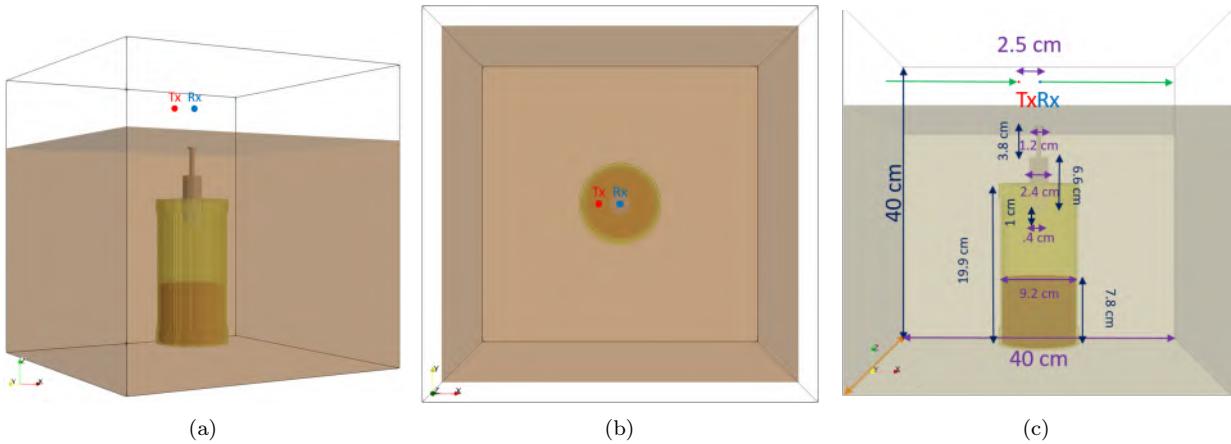
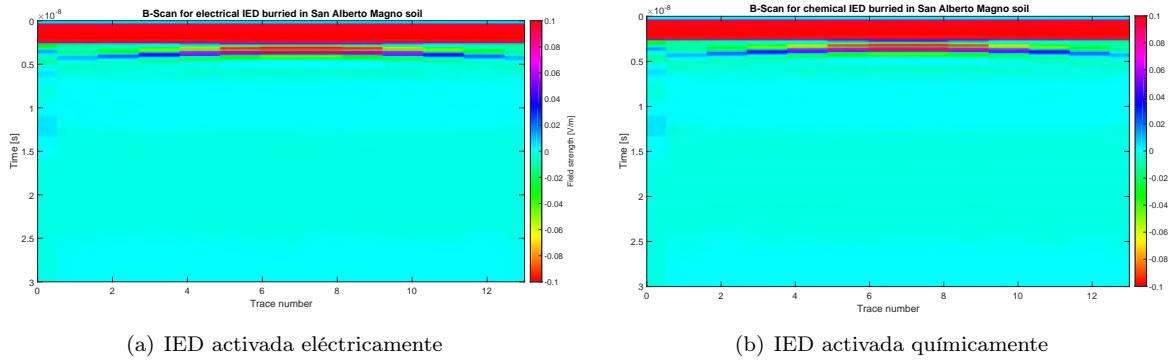


Figura 7.1: Escenario de simulación para evaluar la detección de la IED en los diferentes suelos.

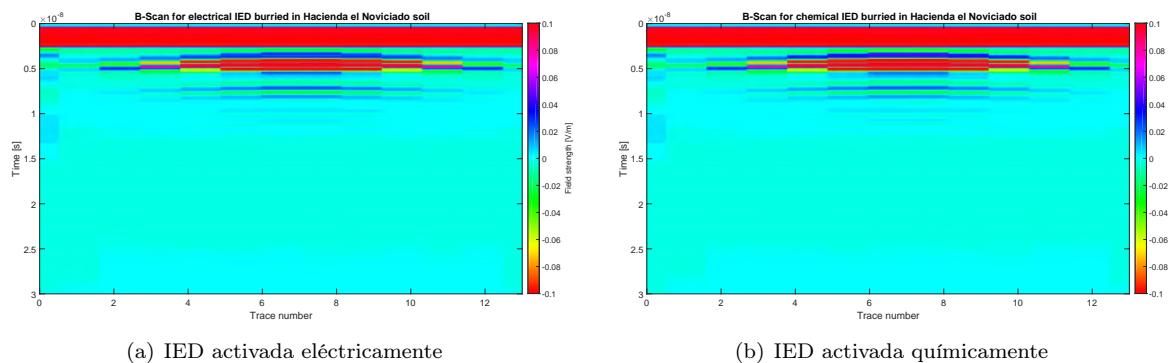
En las Figuras 7.2 - 7.6 se puede ver el resultado de la traza-B de la simulación, para los diferentes suelos. Se puede notar que en todos los casos se el GPR percibe la señal reflejada IED, aunque la señal esté muy atenuada con respecto a la señal reflejada por el suelo. Esto indica que la detección de este tipo de IED en los suelos caracterizados es posible. Las señales de las Figuras 7.2 - 7.6 no tienen ningún tipo de procesamiento sobre ellas, son las respuestas brutas del radar, esto significa que después de una buena calibración del GPR y con un buen procesamiento de señales se puede dar una detección efectiva de las IED.



(a) IED activada eléctricamente

(b) IED activada químicamente

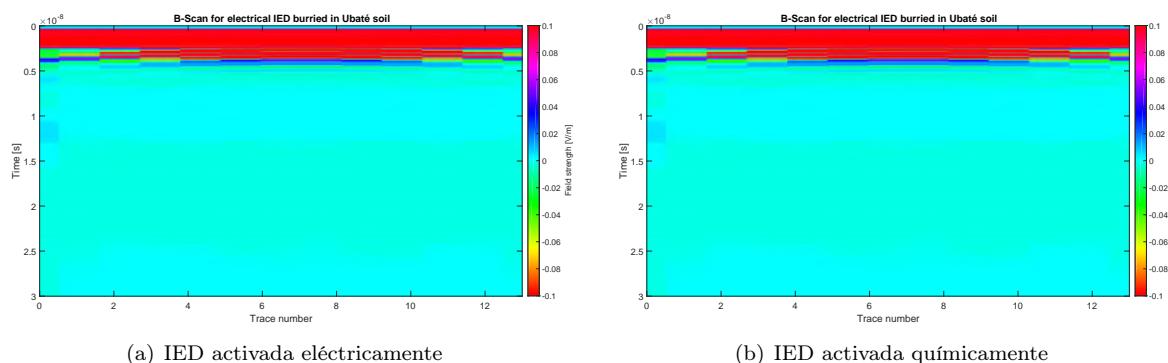
Figura 7.2: Traza-B en el suelo del prado de San Alberto Magno.



(a) IED activada eléctricamente

(b) IED activada químicamente

Figura 7.3: Traza-B en el suelo de la Hacienda el Noviciado.



(a) IED activada eléctricamente

(b) IED activada químicamente

Figura 7.4: Traza-B en el suelo de Ubaté.

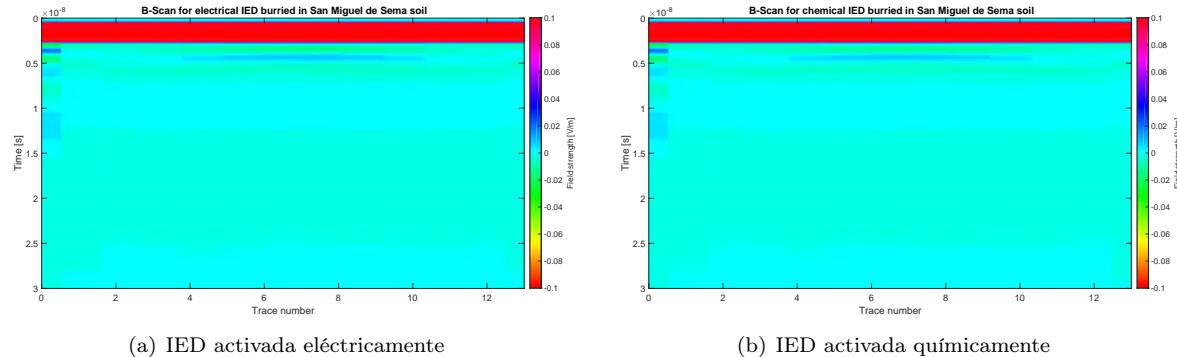


Figura 7.5: Traza-B en el suelo de San Miguel de Sema.

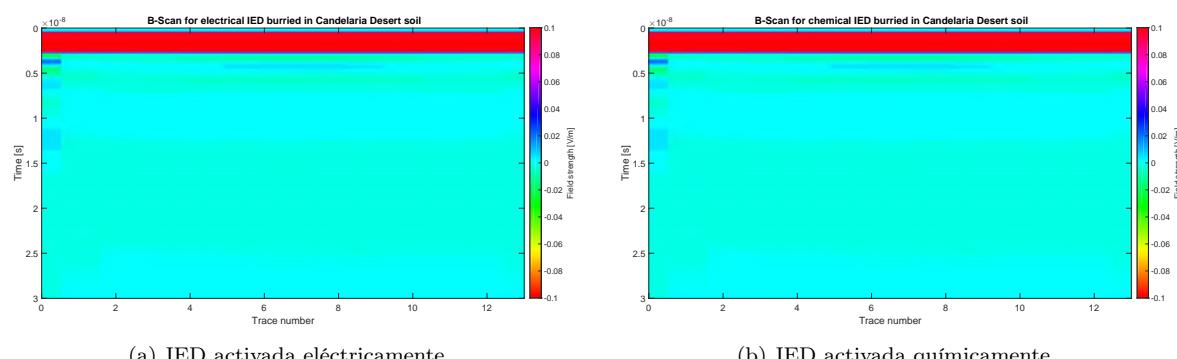


Figura 7.6: Traza-B en el suelo del desierto de la Candelaria.

## Capítulo 8

# Conclusiones

La técnica de TDR y los algoritmos desarrollados son una herramienta que permite determinar las propiedades eléctricas de los suelos en un amplio rango de frecuencias (300 MHz - 12 GHz); tener las propiedades eléctricas de los suelos es importante para la reproducción de escenarios verdaderos de detección de IEDs con GPR. Una herramienta de *benchmarking* para GPRs puede ser creada de la recuperación de propiedades eléctricas de los suelos; al reproducir las características de los mismos en laboratorio o en simulación. La fácil implementación de la caracterización obtenida a través del modelo de relajación Debye (incluido en gprMax), permite una creación eficiente de escenarios; esto combinado con la facilidad de crear código para gprMax donde se crean módulos y objetos con diferentes geometrías, hace a este simulador una herramienta muy práctica para las aplicaciones de GPR en el contexto de desminado humanitario. Muchos escenarios pueden crearse con gprMax: ubicando las IEDs en diferentes posiciones y profundidades, utilizando diferentes descripciones de los suelos y configurando muchas otras variables que permitan tener una amplia base de datos que eventualmente puede ser utilizada como fuente para problemas de machine learning.

Los valores de permitividad relativa compleja ( $\varepsilon_r^*(f)$ ) recuperados muestran que la permitividad aparente ( $K_a$ ) no es una descripción adecuada de los medios para el contexto de GPR. Al comparar los valores de  $K_a$  con los parámetros del modelo Debye obtenidos, se llega a la conclusión que  $K_a$  es muy parecido a la permitividad en frecuencia cero ( $\varepsilon_s$ ) para materiales con frecuencia de relajación cercana a 1 GHz. Para materiales con frecuencias de relajación inferiores a 1 GHz,  $K_a$  se ve más bajo que  $\varepsilon_s$ ; y para materiales con frecuencias de relajación superiores a 1 GHz,  $K_a$  se ve más alto que  $\varepsilon_s$ . Vale la pena comprobar si este comportamiento se mantiene al variar los tiempos de subida del pulso que excita la sonda y encontrar una relación entre  $K_a$  y  $\varepsilon_s$ .

La compensación del factor de forma ( $g$ ) probó ser útil para el cálculo de la permitividad en frecuencia cero ( $\varepsilon_s$ ). Esto se pudo validar con los diferentes materiales simulados y con el agua y etanol medidos con las sondas reales. Añadir este factor a la fórmula para el cálculo de  $\varepsilon_s$  puede considerarse como una mejora a la fórmula original, para el problema de TDR con sondas de tres varillas.

Aunque el método utilizado probó tener resultados aceptables, se observó a lo largo de la tesis que la frecuencia de relajación de los medios puede ser determinada del análisis de la señal reflejada en el dominio del tiempo. Se observa que los medios con frecuencia de relajación más alta toman una mayor cantidad de tiempo en alcanzar su estado estable. En la revisión del estado de arte no se encontró una relación entre estos parámetros. El estudio de este fenómeno puede contribuir al marco teórico de la caracterización de medios con TDR.

Es necesario hacer ajustes en el algoritmo de recuperación de las características de los medios, ya que las mediciones reales traen mucho ruido consigo y los parámetros medidos varían mucho entre ejecuciones del algoritmo. A simple vista, del análisis de la respuesta  $S_{11}$  es posible que aplicando a esta señal un filtrado de frecuencias bajas se pueda mejorar la visualización y el ajuste con las señales teóricas.

Las mediciones con TDR probaron tener un procedimiento muy demorado, mayormente gracias al tiempo consumido enterrando y desenterrando las sondas. Las sondas deben ser tratadas con cuidado, ya que cualquier cambio en la separación de sus varillas o pequeñas abolladuras cambian los resultados de la medición. Incluso abriendo previamente los huecos para las varillas de las sondas, enterrarlas y desenterrarlas requiere de la aplicación de una fuerza considerable. Una forma de mejorar el tiempo de este procedimiento puede ser utilizando sondas más cortas, que aunque reducen el volumen de cada medición pueden ayudar a cubrir una mayor cantidad de terreno en un tiempo más corto. Una ventaja que se tuvo con la sonda artesanal frente a la sonda comercial es la capacidad de

remover el cable de la misma, esto permite utilizar cables de diferentes longitudes fácilmente, hace la sonda más fácil de transportar y permite el cambio del cable si este llega a dañarse. Adicionalmente, al enterrar las sondas se tiene la facilidad de poder clavar la sonda artesanal con el mazo sin preocupaciones de pegarle al cable lo que significa reducción en el tiempo de medición. En un trabajo futuro puede mejorarse el diseño del cabezal de la sonda para que ayude con el tiempo que implica enterrarla y desenterrarla. Al comparar las mediciones hechas con las dos sondas, se puede ver que ambas se comportan de forma muy similar lo que indica que la forma como se conectan (con el conector SMA o el cable directamente) tiene poca influencia en las mediciones.

La caracterización eléctrica de los suelos hecha con TDR puede complementarse de mediciones de las propiedades mecánicas de los suelos. Esto permitiría probar algunos modelos empíricos que relacionan las propiedades eléctricas con las mecánicas, para validarlos o ajustarlos a los suelos en Colombia.

Finalmente se propone como trabajo futuro hacer un análisis de las señales en el dominio del tiempo mediante una regresión para una gran cantidad de datos. Esto puede brindar una fórmula para encontrar la permitividad sin recurrir a los métodos de optimización en el dominio de la frecuencia.

## Bibliografía

- [1] D. J. Daniels, *Ground penetrating radar*, vol. 1. IET, 2004.
- [2] J. M. H. Hendrickx, A. Molina, D. Diaz, M. Grasmueck, H. A. Moreno, and R. D. Hernández, “Humanitarian IED clearance in Colombia,” *SPIE Defense and Security Symposium*, vol. 2, no. 1, p. 69530C, 2008.
- [3] P. A. Prada and M. Chávez Rodríguez, “Demining Dogs in Colombia - A Review of Operational Challenges, Chemical Perspectives, and Practical Implications,” *Science and Justice*, vol. 56, no. 4, pp. 269–277, 2016.
- [4] I. Giannakis, A. Giannopoulos, and C. Warren, “A Realistic FDTD Numerical Modeling Framework of Ground Penetrating Radar for Landmine Detection,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, no. 1, pp. 1–15, 2015.
- [5] M. Sato and K. Takahashi, “Development of the Hand held dual sensor ALIS and its evaluation,” *2007 4th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*, pp. 3–7, 2007.
- [6] M. Sato, K. Takahashi, and J. Fujiwara, “Hand held dual sensor ALIS and its evaluation test in Cambodia,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 18–21, 2007.
- [7] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, and M. A. El-Rayes, “Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-23, no. 1, pp. 35–46, 1985.
- [8] M. T. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. C. Dobson, M. a. El-Rayes, and L.-K. Wu, “Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part I: Empirical Models and Experimental Observations,” *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. GE-23, no. 1, pp. 25–34, 1985.
- [9] J. Igel, *On the Small-Scale Variability of Electrical Soil Properties and Its Influence on Geophysical Measurements*. PhD thesis, Goethe University Frankfurt, 2007.
- [10] S. Lambot, *Hydrogeophysical characterization of soil using ground penetrating radar (Chapter 4 : GPR design and modeling for identifying the shallow subsurface dielectric properties)*. PhD thesis, Université catholique de Louvain, 2003.
- [11] N. R. Peplinski, F. T. Ulaby, and M. C. Dobson, “Dielectric Properties of Soils in the 0.3–1.3-GHz Range,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 3, pp. 803–807, 1995.
- [12] N. R. Peplinski, F. T. Ulaby, and M. C. Dobson, “Corrections to “Dielectric Properties of Soils in the 0.3–1.3-GHz Range”,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 6, p. 9415882, 1995.
- [13] P. Debye, “Polar Molecules,” *Journal of the Society of Chemical Industry*, vol. 48, no. 43, pp. 1036–1037, 1929.
- [14] I. Giannakis, A. Giannopoulos, and N. Davidson, “Incorporating dispersive electrical properties in FDTD GPR models using a general Cole-Cole dispersion function,” *2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, vol. 14, no. 3, pp. 232–236, 2012.
- [15] D. F. Kelley, T. J. Destan, and R. J. Luebbers, “Debye function expansions of complex permittivity using a hybrid particle swarm-least squares optimization approach,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 7, pp. 1999–2005, 2007.

- [16] M. Loewer and J. Igel, "FDTD simulation of GPR with a realistic multi-pole debye description of lossy and dispersive media," in *Proceedings of 2016 16th International Conference of Ground Penetrating Radar, GPR 2016*, 2016.
- [17] O. Lopera and N. Milisavljevic, "Prediction of the effects of soil and target properties on the antipersonnel landmine detection performance of ground-penetrating radar: A Colombian case study," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 63, no. 1, pp. 13–23, 2007.
- [18] A. Giannopoulos, "Modelling ground penetrating radar by GprMax," *Construction and Building Materials*, vol. 19, no. 10, pp. 755–762, 2005.
- [19] C. Warren and A. Giannopoulos, "gprMax User Guide," 2017.
- [20] C. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*. CourseSmart Series, Wiley, 2012.
- [21] D. A. Robinson, M. G. Schaap, D. Or, and S. B. Jones, "On the effective measurement frequency of time domain reflectometry in dispersive and nonconductive dielectric materials," *Water Resources Research*, vol. 41, no. 2, pp. 1–9, 2005.
- [22] K. S. Cole and R. H. Cole, "Dispersion and absorption in dielectrics i. alternating current characteristics," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 9, no. 4, pp. 341–351, 1941.
- [23] K. S. Yee and J. S. Chen, "The finite-difference time-domain (FDTD) and the finite-volume time-domain (FVTD) methods in solving Maxwell's equations," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997.
- [24] K. C. Yaw(Rohde&Schwarz), "Measurement of dielectric material properties Application Note," *Measurement Techniques*, pp. 1–35, 2006.
- [25] J. Igel, "The Small-Scale Variability of Electrical Soil Properties - Influence on GPR Measurements," *12th International Conference on Ground Penetrating Radar*, p. 10, 2008.
- [26] G. C. Topp, J. L. Davis, and A. P. Annan, "Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines," *Water Resources Research*, 1980.
- [27] T. J. Heimovaara, "Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms - 1. Meaurement of the complex dielectric permittivity of soils," *Water Resources Research*, vol. 30, no. 2, pp. 189–199, 1994.
- [28] S. B. Jones and D. Or, "Frequency Domain Analysis for Extending Time Domain Reflectometry Water Content Measurement in Highly Saline Soils," *Soil Science Society of America Journal*, 2004.
- [29] T. Heimovaara and W. Bouten, "A Computer-Controlled 36-Channel Time Domain Reflectometry System for Monitoring Soil Water Contents," *Water Resources Research*, vol. 26, no. 10, pp. 2311–2316, 1990.
- [30] "Mathworks smooth." <https://la.mathworks.com/help/curvefit/smooth.html>. Accessed: 2019-06-11.
- [31] K. Giese and R. Tiemann, "Determination of the complex permittivity from thin-sample time domain reflectometry improved analysis of the step response waveform," *Advances in Molecular Relaxation Processes*, vol. 7, no. 1, pp. 45–59, 1975.
- [32] Campbell Scientific, "Instruction Manual: TDR200-Based Time-Domain Reflectometry System," 2016.
- [33] Campbell Scientific, "CS610-L 3-Rod TDR Probe with RG8 Cable," 2018.
- [34] Campbell Scientific, "Instruction Manual: HydroSense II (HS2) Support Software User Guide," 2011.
- [35] IMKO, "Manual: Handheld device HD2," 2018.
- [36] MOHR, "MOHR CT100B Series TDR Cable Analyzers datasheet," 2016.

- [37] T. J. Heimovaara, "Design of triple wire time domain reflectometry probes in practice and theory.," *Soil Science Society of America journal*, vol. 57, pp. 1410–1417, 1993.
- [38] Pasternack, "Flexible RG8 Coax Cable Single Shielded with Black PVC Jacket."
- [39] T. Sato and R. Buchner, "Dielectric relaxation processes in ethanol/water mixtures," *Journal of Physical Chemistry A*, 2004.
- [40] D. Castro Malagón, R. Siachoque Bernaluy, and J. Serna Giraldo, *El ABC de los suelos para no expertos*, vol. 1. Subdirección de Agrología Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2010.
- [41] D. Castro Malagón, C. Pulido Roa, R. D. Llinás Rivera, C. Chamorro Bello, and J. Fernández Lamus, *Suelos de Colombia: origen, evolución, clasificación, distribución y uso*, vol. 1. Subdirección de Agrología Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1995.
- [42] Comando General Fuerzas Militares de Colombia, "Testigos Fieles - Victimas del Horror de las Minas Antipersonal," 2008.

## Apéndice A

# Código desarrollado

## A.1. Biblioteca Sonda TDR

```
import os
import math

from gprMax.exceptions import CmdInputError
from gprMax.input_funcs import *

moduledirectory = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))

def CS610_materials():
    material(1, 58e6, 1, 0, 'cooper')
    material(2.35, 0, 1, 0, 'hdpe')
    material(3.6, 0, 1, 0, 'epoxy')
    material(1, 1.1e6, 1, 0, 'stainless_steel')

def insert_probe(x, y, z, extc_file, waveformname, rotate90=False):
    """This function inserts a CS610 probe into the simulation domain.

    Args:
        x, y, z (float): Coordinates of a location in the model to insert the probe. Rod excitation point.
        rotate90 (bool): Rotate model 90 degrees CCW in xy plane.
        ...
    """

    # Dimensions of the RG8 coaxial cables:
    inner_conductor_diameter = 0.002 # [m] -2 mm
    dielectric_diameter = 0.006 # [m] -7 mm
    outer_conductor_diameter = dielectric_diameter + 0.002 # [m] -8 mm
    jacket_diameter = 0.010 # [m] -1 cm

    cable_length = 0.300 # [m] -30 cm

    # Dimensions of probe head (epoxy enclosure)
    head_length = 0.108 # [m] -10.8 cm
    head_width = 0.070 # [m] -7 cm
    head_thickness = 0.019 # [m] -1.9 cm

    separation_head_rods = 0.010 # [m] -1 cm

    # Dimensions of the probe rods
    probe_diameter = 0.004 # [m] -4 mm
    probe_outer_length = 0.300 # [m] -30 cm
    probe_length = (head_length - separation_head_rods) + probe_outer_length # [m] -40.8 cm
    probe_spacing_out2out = 0.045 # [m] -4.5 cm
    probe_spacing = probe_spacing_out2out / 2 # [m] -2.25 cm

    # Brass plate dimensions
    brass_width = probe_spacing_out2out + 0.002 # [m] -4.7 cm
    brass_length = 0.002 # [m] -2 mm
    brass_thickness = probe_diameter * 2 # [m] -8 mm
    brass_length_cylinder = 0.020 # [m] -2 cm

    # Set origin for rotation to geometric centre of antenna in x-y plane if required, and set output component for receiver
    if rotate90:
        rotate90origin = (x, y)
    else:
        rotate90origin = ()

    # ===== Probe head =====
    # As the probe head is the most outer element in the probe geometry it is constructed first:
    low_left_head = [x - head_width / 2, y - head_length + separation_head_rods, z - head_thickness / 2]
    upp_right_head = [x + head_width / 2, y + separation_head_rods, z + head_thickness / 2]
    box([low_left_head[0], low_left_head[1], low_left_head[2], upp_right_head[0], upp_right_head[1],
         upp_right_head[2]], 'epoxy', rotate90origin=rotate90origin)

    # ===== Brass =====
    # Brass Plate =
    low_left_brass = [x - brass_width / 2, y - brass_length / 2, z - brass_thickness / 2]
    upp_right_brass = [x + brass_width / 2, y + brass_length / 2, z + brass_thickness / 2]
    box([low_left_brass[0], low_left_brass[1], low_left_brass[2], upp_right_brass[0], upp_right_brass[1],
         upp_right_brass[2]], 'pec', rotate90origin=rotate90origin)
    # = Brass Outer Cylinder
    low_brass_cyl = [x, y - brass_length / 2, z]
    upp_brass_cyl = [x, y + brass_length / 2, z]
    cylinder(low_brass_cyl[0], low_brass_cyl[1], low_brass_cyl[2], upp_brass_cyl[0], upp_brass_cyl[1],
              upp_brass_cyl[2], outer_conductor_diameter, 'pec')
    # = Brass Inner Cylinder =
    cylinder(low_brass_cyl[0], low_brass_cyl[1], low_brass_cyl[2], upp_brass_cyl[0], upp_brass_cyl[1],
              upp_brass_cyl[2], dielectric_diameter, 'hdpe')
    # = Brass Inner Conductor =
    cylinder(low_brass_cyl[0], low_brass_cyl[1], low_brass_cyl[2], upp_brass_cyl[0], upp_brass_cyl[1],
              upp_brass_cyl[2], inner_conductor_diameter, 'pec')
```

```

# ===== Probes =====
low_cent_probe_cyl = [x, y -probe_length, z]
upp_cent_probe_cyl = [x, y, z]
cylinder(low_cent_probe_cyl[0], low_cent_probe_cyl[1], low_cent_probe_cyl[2], upp_cent_probe_cyl[0],
          upp_cent_probe_cyl[1], upp_cent_probe_cyl[2], probe_diameter, 'stainless_steel')

low_left_probe_cyl = [x -probe_spacing, y -probe_length, z]
upp_left_probe_cyl = [x -probe_spacing, y, z]
cylinder(low_left_probe_cyl[0], low_left_probe_cyl[1], low_left_probe_cyl[2], upp_left_probe_cyl[0],
          upp_left_probe_cyl[1], upp_left_probe_cyl[2], probe_diameter, 'stainless_steel')

low_right_probe_cyl = [x +probe_spacing, y -probe_length, z]
upp_right_probe_cyl = [x +probe_spacing, y, z]
cylinder(low_right_probe_cyl[0], low_right_probe_cyl[1], low_right_probe_cyl[2], upp_right_probe_cyl[0],
          upp_right_probe_cyl[1], upp_right_probe_cyl[2], probe_diameter, 'stainless_steel')

# === Excitation ===
# ===== Excitation -Gaussian pulse =====#
tx = [upp_brass_cyl[0] + inner_conductor_diameter + 0.001, upp_brass_cyl[1], upp_brass_cyl[2]]

sourceresistance = 50
excitation_file(exct_file)
# print('#waveform: gaussian 1 {} '.format(.5e9) + waveformname)
transmission_line('x', tx[0], tx[1], tx[2], sourceresistance, waveformname, dxdy=(0.001, 0.001), rotate90origin=rotate90origin)
#voltage_source('x', tx[0], tx[1], tx[2], sourceresistance, waveformname, dxdy=(0.001, 0.001),
# rotate90origin=rotate90origin)
# === Edges to connect the source
edge(upp_brass_cyl[0], tx[1], tx[2], tx[0], tx[1], tx[2], 'pec',
      rotate90origin=rotate90origin)
edge(tx[0] + 0.001, tx[1], tx[2], upp_brass_cyl[0] + outer_conductor_diameter, tx[1], tx[2], 'pec',
      rotate90origin=rotate90origin)

```

## A.2. Biblioteca IED

```

import os
import random
import math
import numpy as np
from gprMax.input_cmds import *

moduledirectory = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))

"""This library contains models of IEDs. The height and radius of the IED change as parameter of the function.
"""

def shrapnel_circle(radius):
    theta = 2 * np.pi * random.random()

    return math.cos(theta) * radius, math.sin(theta) * radius

def shrapnel_prism(xshp1, xshp2, xshp3, yshp1, yshp2, yshp3, zmin, zheight):
    # Calculate the length of the prism in x coordinate direction
    dim_x = xshp3 - xshp1
    # Pick random x coordinate
    x = xshp1 + dim_x * random.random()
    # Calculate y coordinate lower limit so the y-random pick is inside the triangle
    eq1 = yshp1
    if x <= xshp2:
        slope = (yshp2 - yshp1) / (xshp2 - xshp1)
        cut = yshp1 - slope * xshp1
    else:
        slope = (yshp3 - yshp2) / (xshp3 - xshp2)
        cut = yshp2 - slope * xshp2
    eq2 = slope * x + cut

    dim_y = eq1 - eq2
    # Pick a random y coordinate
    y = eq2 + dim_y * random.random()
    # Pick a random z coordinate
    z = zmin + zheight * random.random()

    return x, y, z

def IED_materials(enclosure, explosive, first_run=True, **kwargs):
    """Inserts the IED material characterization to the simulation. It receives as parameter the name of the material of
    the enclosure, the explosive and as optional arguments the properties of the materials selected for the enclosure
    and the explosive.
    When a new material wants to be used it must not be named the same as the default materials (PVC, Glass, Wood,
    Ammonium_Nitrate, ANFO, ALANFO, R1, Nitroglycerin, TNT, Potassium_Nitrate).
    """

    Args:
        enclosure (string): Name of the enclosure material [PVC, Glass, Wood, other].
        explosive (string): Name of the explosive material [Ammonium_Nitrate, ANFO, ALANFO, R1, Nitroglycerin, TNT,
                           Potassium_Nitrate, other].
    kwargs (dict): Optional variables.
        enc_er (float): Relative permittivity for the enclosure
        enc_mr (float): Relative permeability for the enclosure
        enc_sg (float): Conductivity for the enclosure
        exp_er (float): Relative permittivity for the explosive
        exp_mr (float): Relative permeability for the explosive
        exp_sg (float): Conductivity for the explosive
    """

```

```

if first_run:
    # Trigger material definition
    material(4, 0, 1, 0, 'Syringe_Body')
    material(4, 0, 1, 0, 'Syringe_Back')

    # Activation material for non-electric IEDs definition
    material(1, 0, 1, 0, 'Sulfuric_Acid')

    # shrapnel material definition
    material(4, 0, 1, 0, 'Manure')

    # Enclosure material definition
    if enclosure is 'PVC':
        material(2.7, 0, 1, 0, enclosure)
    else:
        if enclosure is 'Glass':
            material(5.5, 0, 1, 0, enclosure)
        else:
            if enclosure is 'Wood':
                material(6, 0, 1, 0, enclosure)
            else:
                enc_er = kwargs['enc_er']
                enc_mr = kwargs['enc_mr']
                enc_sg = kwargs['enc_sg']
                material(enc_er, enc_mr, enc_sg, 0, enclosure)

    if explosive is 'Ammonium_Nitrate':
        material(6, 0, 1, 0, 'Ammonium_Nitrate')
    else:
        if explosive is 'ANFO':
            material(1.4, 0, 1, 0, 'ANFO')
        else:
            if explosive is 'ALANFO':
                material(1.4, 0, 1, 0, 'ALANFO')
            else:
                if explosive is 'R1':
                    material(1.4, 0, 1, 0, 'R1')
                else:
                    if explosive is 'Nitroglycerin':
                        material(1.4, 0, 1, 0, 'Nitroglycerin')
                    else:
                        if explosive is 'TNT':
                            material(1.4, 0, 1, 0, 'TNT')
                        else:
                            if explosive is 'Potassium_Nitrate':
                                material(1.8, 0, 1, 0, 'Potassium_Nitrate')
                            else:
                                exp_er = kwargs['exp_er']
                                exp_mr = kwargs['exp_mr']
                                exp_sg = kwargs['exp_sg']
                                material(exp_er, exp_mr, exp_sg, 0, explosive)

def syringe(x, y, z, height, width, resolution, rotate90origin, elec_mechanism):
    # Definition of thickness of the syringe materials
    syringe_thickness = resolution

    # Definition of heights
    height_tip = height/20
    if height_tip <= resolution:
        height_tip = resolution
    height_body = height/3
    if height_body <= 5*resolution:
        height_body = 5*resolution
    height_back = height/4
    if height_back <= 4*resolution:
        height_back = 4*resolution
    if elec_mechanism:
        height_contacts = resolution
    else:
        height_acid = height/4
        if height_acid <= 4*resolution:
            height_acid = 4*resolution

    # Definition of radius and widths
    radius_body = width/2
    if radius_body <= 4*resolution:
        radius_body = 4*resolution
    radius_tip = radius_body / 4
    if radius_tip <= 2*resolution:
        radius_tip = 2*resolution
    radius_back = radius_body / 2
    if radius_back <= 2*resolution:
        radius_back = 2*resolution
    if elec_mechanism:
        radius_contacts = radius_body - syringe_thickness
    else:
        radius_acid = radius_body - syringe_thickness

    # Creation of the syringe body
    z_body = z-height_body/2
    cylinder(x, y, z_body, x, y, z_body + height_body, radius_body, 'Syringe_Body',
             rotate90origin=rotate90origin)

    # Creation of the syringe tip
    z_tip = z-height_body/2-height_tip
    cylinder(x, y, z_tip, x, y, z_tip + height_tip, radius_tip, 'Syringe_Body', rotate90origin=rotate90origin)

    # Air on the syringe body and tip
    cylinder(x, y, z_body + syringe_thickness, x, y, z_body + height_body - syringe_thickness,
              radius_body - syringe_thickness, 'free_space', rotate90origin=rotate90origin)
    cylinder(x, y, z_tip + height_tip + syringe_thickness, radius_tip - syringe_thickness, 'free_space',
              rotate90origin=rotate90origin)

```

```

# Creation of the syringe back
z_back = z + height_body/2 -height_back/4
cylinder(x, y, z_back, x, y, z_back + syringe_thickness, radius_back, 'Syringe_Back',
          rotate90origin=rotate90origin)
cylinder(x, y, z_back + syringe_thickness, x, y, z_back + height_back, radius_back/2,
          'Syringe_Back', rotate90origin=rotate90origin)
cylinder(x, y, z_back + height_back, x, y, z_back + height_back + syringe_thickness, radius_back,
          'Syringe_Back', rotate90origin=rotate90origin)

if elec_mechanism:
    # Creation of the PEC contacts on both ends of the syringe
    z_contact_upper = z_back -height_contacts
    cylinder(x, y, z_contact_upper, x, y, z_contact_upper + height_contacts, radius_contacts, 'pec',
              rotate90origin=rotate90origin)
    z_contact_lower = z_body + syringe_thickness
    cylinder(x, y, z_contact_lower, x, y, z_contact_lower + height_contacts, radius_contacts, 'pec',
              rotate90origin=rotate90origin)
else:
    z_acid = z_body + syringe_thickness
    cylinder(x, y, z_acid, x, y, z_acid + height_acid, radius_acid, 'Sulfuric_Acid',
              rotate90origin=rotate90origin)

def pipeIED(x, y, z, height, width, resolution=0.002, rotate90=False, elec_mechanism=True, enclosure='PVC',
            explosive='ANFO', shrapnel=False):
    """This function inserts an IED into the simulation domain.

    Args:
        x, y, z (float): Coordinates of a location in the model to insert the bottom cylinder of the IED.
        height (float): Specifies the height of the PVC enclosure of the IED. [m]
        width (float): Specifies the width of the PVC enclosure of the IED. [m]
        rotate90 (bool): Rotate model 90 degrees CCW in xy plane.
        ...
        if rotate90:
            rotate90origin = (x, y)
        else:
            rotate90origin = ()

    # Definition of thickness of the pipe materials
    pipe_thickness = resolution

    # Definition of heights
    height_ends = height/10
    if height_ends <= 2*resolution:
        height_ends = 2*resolution
    height_body = 8*height/10
    if height_body <= 8*resolution:
        height_body = 8*resolution
    height_explosive = 4*height/10
    if height_explosive <= 4*resolution:
        height_explosive = 4*resolution

    # Definition of radius
    radius_ends = width/2
    if radius_ends <= 3*resolution:
        radius_ends = 3*resolution
    radius_body = radius_ends - pipe_thickness
    radius_explosive = radius_body - pipe_thickness

    # Creation of the bottom end of the IED
    cylinder(x, y, z, x, y, z + height_ends, radius_ends, enclosure, rotate90origin=rotate90origin)
    # Creation of the body of the IED
    z_body = z + height_ends
    cylinder(x, y, z_body, x, y, z_body + height_body, radius_body, enclosure, rotate90origin=rotate90origin)
    # Creation of the top end of the IED
    z_top_end = z_body + height_body
    cylinder(x, y, z_top_end, x, y, z_top_end + height_ends, radius_ends, enclosure, rotate90origin=rotate90origin)

    # Definition of the space inside the IED as free space
    cylinder(x, y, z + pipe_thickness, x, y, z + height - pipe_thickness, radius_explosive, 'free_space',
              rotate90origin=rotate90origin)

    # Creation of the explosive inside the IED
    cylinder(x, y, z + pipe_thickness, x, y, z + pipe_thickness + height_explosive, radius_explosive, explosive,
              rotate90origin=rotate90origin)

    # Insert shrapnel in the IED
    if shrapnel:
        qshrapnell = 20
        shrapnel_size = 2*resolution
        for i in range(0, qshrapnell):
            [xshrapnel, yshrapnel] = shrapnel_circle((radius_explosive - shrapnel_size) * random.random())
            if i % 2:
                sphere(x + xshrapnel, y + yshrapnel, z + pipe_thickness + height_explosive, shrapnel_size, 'pec')
            else:
                sphere(x - xshrapnel, y - yshrapnel, z + pipe_thickness + height_explosive, shrapnel_size, 'Manure')

    # Check activation mechanism to place battery if needed
    if elec_mechanism:
        height_battery = height/10
        if height_battery <= resolution:
            height_battery = resolution
        radius_battery = width/4
        if radius_battery <= resolution:
            radius_battery = resolution
        cylinder(x, y, z + pipe_thickness, x, y, z + pipe_thickness + height_battery, radius_battery, 'pec',
                  rotate90origin=rotate90origin)

    # Call for syringe insert function

```

```

z_syringe = z_top_end + height_ends
diam_syringe = width/4
if diam_syringe <= 2*resolution:
    diam_syringe = 2*resolution
syringe(x, y, z_syringe, height, diam_syringe, resolution, rotate90origin, elec_mechanism)

```

### A.3. Script generación del pulso incidente

```

% % Creacion de pulso TDR para gprMax
% Este script genera un archivo de texto con los valores de amplitud de un
% pulso TDR para gprMax.
%
% Daniel Julian Gonzalez Ramirez
% 2019-02-01
clear, clc
close all
%% Constantes importantes para los calculos
eps_o = 8.85418717e-12; % Permittividad del vacio
mu_o = 1.256637061e-6; % Permeabilidad del vacio
c_o = 1/sqrt(eps_o*mu_o); % Velocidad de propagacion en vacio [m/s]
%% Seleccion de la discretizacion temporal
% La discretizacion temporal en el metodo de FDTD depende del tamano de la
% grilla. Para crear el pulso adecuadamente se debe utilizar la
% discretizacion temporal apropiada. En esta parte del codigo se identifica
% cual es la discretizacion temporal a utilizar.
dx = 0.001; dy = 0.001; dz = 0.001; % Discretizacion espacial [m]
dt = 1/(c_o*sqrt(1/dx^2 + 1/dy^2 + 1/dz^2)); % Discretizacion temporal [s]
% Seleccion de la ventana de tiempo y creacion del vector de tiempo
% Se debe seleccionar un tiempo de simulacion y crear el vector con los
% tiempos para generar el pulso de manera adecuada.
time_window = 200e-9; % Ventana de tiempo [s]
time_window = (round(time_window / dt) + 1) * dt;
time = 0:dt:time_window; % Vector de tiempo [s]
iterations = length(time);
%% Creacion del perfil de subida de la senal
% El pulso de TDR tiene un tiempo de subida de 85 ps de 0 a 250 mV, aunque
% el fabricante del equipo no especifica la forma del perfil de subida se
% puede asumir de forma exponencial. Asumir que el pulso tiene una forma
% exponencial de subida tiene un gran beneficio para el algoritmo de FDTD,
% ya que la senal entra al dominio de manera suave evitando errores de
% dispersion numerica.
delay = 4e-9; % Retardo para el inicio del pulso [s]
amplitude = 0.25; % Amplitud del pulso [V]
rise_time = 85e-12; % Tiempo de subida del pulso [s]
gaussian = amplitude .* exp(-((time-delay)./(rise_time/2)).^2);

figure('Name', 'Pulso Gaussiano para el perfil de subida')
plot(time, gaussian, 'LineWidth', 2); grid minor; xlim([time(1) time(end)]);
xlabel('tiempo [s]'); ylabel('Amplitud [V]')
title('Pulso Gaussiano para el perfil de subida')
%% Creacion del pulso en estado estable
% Cuando el pulso alcanza su amplitud maxima debe conservar la misma
% amplitud por el resto de la simulacion. Para lograrlo se utiliza el
% perfil de subida concatenado con un vector constante en 250 mV.
[~,peak_index] = max(gaussian);
pulse = [gaussian(1:peak_index) amplitude.*ones(1,iterations-peak_index)];

figure('Name', 'Pulso TDR')
plot(time, pulse, 'LineWidth', 2); grid minor; xlim([time(1) time(end)]);
xlabel('tiempo [s]'); ylabel('Amplitud [V]')
title('Pulso TDR')
%% Almacenamiento del pulso en formato .txt para gprMax
TDR_waveform = fopen('TDR_waveform.txt','wt');
fprintf(TDR_waveform, 'TDR_pulse\n');
for i = 1:iterations
    fprintf(TDR_waveform, '%f\n', pulse(i));
end
fclose(TDR_waveform);

```

### A.4. Script de procesamiento de las señales de TDR simuladas

```

% TDR data processing
% This script reads the TDR output files (from gprMax and PCTDR) and
% obtains the complex relative permittivity through time-domain and
% frequency-domain (FFT) analysis of the signals.
% Author:
% Daniel Julian Gonzalez Ramirez -dj.gonzalez1203@uniandes.edu.co
% april 2019
close all
clear, clc
% References

```

```

% [1] Heimovaara, T. J., & Bouten, W. (1990). A Computer-Controlled
% 36-Channel Time Domain Reflectometry System for Monitoring Soil Water
% Contents.
% % Anonymus functions
% Calculation of Havriliak Negami permittivity model:
Havriliak_Negami = @(eps_inf, eps_s, f, t_o, alpha, beta) eps_inf +...
    (eps_s - eps_inf)./((1 + (1i * 2 * pi * t_o .* f)).^(1 - alpha)).^beta;
% Calculation of complex rho for the coaxial probe:
rho_calc = @(z,eps) (1 - z.*sqrt(eps))./(1 + z.*sqrt(eps));
% Calculation of complex gamma for the coaxial probe:
gamma_calc = @(f,eps,c) (1i*2*pi.*f.*sqrt(eps))./c;
% Calculation of the S11 parameter for the coaxial probe:
S11_calc = @(rho,gamma,l) (rho + exp(-2*l.*gamma))./(1 +...
    rho.*exp(-2*l.*gamma));
% % Constants
% The following are the values for the constant parameters for the coaxial
% TDR probe.
eps_o = 8.854187817e-12; % Vacuum permittivity
mu_o = 1.256637061e-6; % Vacuum permeability
c_o = 1/sqrt(eps_o*mu_o); % Propagation velocity in vacuum [m/s]
Z_c = 50; % Impedance of the cable [Ohms]
Lmech = 0.30; % Mechanical length of the probe [m]
%a = 0.004; % Rod diameter [m]
a = 0.008; % Rod diameter [m]
b = 0.045; % Distance between outer rods [m]
Z_p = Z_c/Z_p; % Impedance of the probe in vacuum [Ohms]
z = Z_c/Z_p; % Impedance ratio
L_epoxy = 0.1; % Length of the epoxy head [m]
eps_epoxy = 3.6; % Relative permittivity of the epoxy
low_freq = 0.01; % Low frequency of TDR range [GHz]
high_freq = 2; % High frequency of TDR range [GHz]
% % File load
% Prompt the user to select the source of the data to be used.
% Version 1 of TDR script will only accept gprMax files.
default_route = 'D:\OneDrive\OneDrive - Pontificia Universidad Javeriana\2019_10\TESIS\gprMax\TDR\*.out';
filename pathname = uigetfile(default_route, 'Select gprMax output file');
full_file_name = [pathname filename];
clear default_route
% Retrieval of the desired information from the output file
[header, Vinc, Vref, Vinc_prime, Vref_prime, S11, time, freq, head...]
= load_gprMax_files(full_file_name, eps_epoxy, L_epoxy);
tsamp = time(2) - time(1); % Sampling time [ns]
fsamp = freq(2) - freq(1); % Sampling freq [GHz]
% % Load calibration
% The electrical length of the probe might differ from the actual length.
% In order to calibrate the length to the electrical distance, an open-air
% signal is analyzed.
load('calibration_2019-06-18-19-50-26.mat') % Big a three error USE THIS
%load('calibration_2019-05-30-10-22-15.mat') % Big a three error
%load('calibration_2019-05-30-11-11-43.mat') % Small a three error
%load('calibration_2019-05-30-14-25-47.mat') % Small a two error
%load('calibration_2019-06-26-16-14-52.mat') % Small a three error USE THIS
% % Time-Domain analysis
% Time-Domain analysis accounts for the determination of the electrical
% conductivity and the apparent relative permittivity of the medium.

% High-frequency components account for errors in the determination of the
% inflection points for the time-domain signal. Time-windowed smoothing is
% used to eliminate the undesirable frequency components.
cut_off_freq = 30e9; % Cut-off frequency [Hz]
cut_off_samples = floor(1 / (cut_off_freq * header.dt));
Vinc_smoothed = smooth(Vinc, cut_off_samples);
Vref_smoothed = smooth(Vref, cut_off_samples);

Vinc_prime_smooth = diff(Vinc_smoothed);
Vinc_prime_smooth = [Vinc_prime_smooth Vinc_prime_smooth(end)]./tsamp;
Vref_prime_smooth = diff(Vref_smoothed);
Vref_prime_smooth = [Vref_prime_smooth Vref_prime_smooth(end)]./tsamp;

% To find the reflection point in the TDR reflected signal one must
% locate the inflection point of the first reflection (S), through the
% first derivative of the reflected voltage.
S_loc = S_point_location(Vref_prime_smooth);

% After the location of the inflection point one must determine the time
% intervals for the reflection point analysis as in Heimovaara and Bouten
% [1]. This algorithm has a different approach than [1] for the calculation
% of the time intervals, although the current algorithm relies also on
% empirical parameters it has a systematic approach to the calculation
% based on percentages of the inflection point time.

dt_min = 0.1*time(S_loc);
time_min = time(S_loc) - dt_min;
min_loc = find(time >= time_min, 1);
time_min = time(min_loc:S_loc);

dt_base = 60*tsamp;
dt_infl = 20*tsamp;

% With the time intervals set now the linear approximation for the base and
% inflection intervals are needed. In this algorithm they are done using
% the first and last points of the interval to determine the slope and
% intercept of the lines. This approach showed better results than linear
% regression and weighter linear regression.

line_base = line_calc(Vref, time, dt_base, time_min, min_loc, 1);
line_infl = line_calc(Vref, time, dt_infl, time_min, S_loc, 2);

% Apparent permittivity calculation. Using the interception point of both
% inflection line and base line as the reflection point (sto point), and
% the first peak as the start point

```

```

start_time_loc = find(Vref == 0, 1);
%line_difference = abs(line_infl.^2 - line_base.^2);
stop_time_loc = find(line_infl >= line_base,1); % Location in time_min
%[<]stop_time_loc] = min(line_difference);
stop_time_loc = find(time == time_min(stop_time_loc));
flight_time = (time(stop_time_loc) - time(start_time_loc))*1e-9; % [s]
apparent_permittivity = ((flight_time * c_o)/(2*L))^2;
display(apparent_permittivity)

% Electrical conductivity calculation. The electrical conductivity is
% calculated using the reflected voltage at infinity-time and the geometry
% of the probe.
rho_infty = Vref(end)/Vinc(end);
sigma_dc = ((eps_o*c_o)/(z*L))*((1-rho_infty)/(1+rho_infty));
display(sigma_dc)

% Response of an ideal medium. The area between the reflected waveforms of
% an ideal medium with eps = 1 - j*sigma/(eps_o*2*pi*f) and the actual
% reflected waveform gives the value of the static relative permittivity
% eps_s.
%delay = 2*L/c_o;
delay = 0;
steps_delay = delay/header.dt;
time_index = ceil(start_time_loc + steps_delay);
length_high = length(Vref)-time_index;
first_nonzero = find(Vinc > 0,1);

Vref_ideal = [zeros(1,time_index) Vinc(first_nonzero:first_nonzero+length_high-1)];
Vref_ideal = rho_infty.*Vref_ideal;

wf_difference = Vref_ideal - Vref;
area = trapz(wf_difference,time.*10^-9);
eps_static = abs((area*c_o)/(g*(Vref(end))*z*L)) + 1;

display(eps_static)
%% Graphics from time-domain analysis
% Incident and reflected voltage waveforms
figure('Name','Incident and reflected voltage')
subplot(2,1,1); plot(time, Vinc); grid minor;
xlabel('time [ns]'); ylabel('Voltage [V]'); title('Incident voltage');
xlim([time(1) time(end)]);
ylim([min(min(Vinc) min(Vref)) max(max(Vinc) max(Vref))]);
subplot(2,1,2); plot(time, Vref); grid minor;
xlabel('time [ns]'); ylabel('Voltage [V]'); title('Reflected voltage');
xlim([time(1) time(end)]);
ylim([min(min(Vinc) min(Vref)) max(max(Vinc) max(Vref))]);

% End point location and tangent lines
figure('Name','End reflection point')
hplot = plot(time, Vref); hold on; grid minor;
plot(time_min, line_base); hold on;
plot(time_min, line_infl); hold on;
xlabel('time [ns]'); ylabel('Voltage [V]');
title('Reflected voltage end reflection');
xlim([time_min(1)-1 time_min(end)+1]);

dcm_obj = datacursormode();
dtip = createDatatip(dcm_obj, hplot);
dtip.Position = [time(stop_time_loc),Vref(stop_time_loc)];
text(time(stop_time_loc),Vref(stop_time_loc),'End point')

clear hplot dtip dcm_obj

% Location of start and end point on the reflected voltage
figure('Name','Start and end point')
hplot = plot(time, Vref); hold on; grid minor;
xlabel('time [ns]'); ylabel('Voltage [V]');
title('Reflected voltage start and end points');
xlim([time(1) 1.5*time_min(end)]);

dcm_obj = datacursormode();
dtip1 = createDatatip(dcm_obj, hplot);
dtip1.Position = [time(start_time_loc),Vref(start_time_loc)];
text(time(stop_time_loc),Vref(stop_time_loc),'End point')
dtip2 = createDatatip(dcm_obj, hplot);
dtip2.Position = [time(stop_time_loc),Vref(stop_time_loc)];
text(time(start_time_loc),Vref(start_time_loc),'Start point')
text(time(stop_time_loc),Vref(stop_time_loc),'End point')

dim = [.2 .5 .3 .3];
str = {['2-way flight time = ', num2str(flight_time), ' [s]'],...
['K a = ',num2str(apparent_permittivity)']];
annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');

clear hplot dtip1 dtip2 dcm_obj dim str

% Comparisson between incident amplitude and stable reflected amplitude
figure('Name','Incident and reflected voltage comparisson')
hplot1 = plot(time, Vinc); hold on; grid minor;
hplot2 = plot(time, Vref);
xlabel('time [ns]'); ylabel('Voltage [V]');
title('Incident and reflected voltage');
legend('Incident', 'Reflected');
xlim([time(1) time(end)]);

dcm_obj = datacursormode();
dtip1 = createDatatip(dcm_obj, hplot1);
dtip1.Position = [time(end),Vinc(end)];

```

```

dtip2 = createDatatip(dcm_obj, hplot2);
dtip2.Position = [time(end),Vref(end)];

dim = [.3 .5 .1 .1];
str = {'\rho_\infty = ', num2str(rho_infty)},...
      {'\sigma_{DC} = ', num2str(sigma_dc), ' [S/m]'}];
annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');

clear hplot1 hplot2 dtip1 dcm_obj dim str

% Ideal reflected waveform and actual reflected waveform
figure('Name','Ideal and actual reflected waveforms')
plot(time, Vref_ideal); hold on; grid minor;
plot(time, Vref);
xlabel('time [ns]'); ylabel('Voltage [V]');
title('Ideal and actual reflected waveforms');
legend('Ideal', 'Actual');
xlim([time(1) time(end)]);

dim = [.3 .5 .1 .1];
str = {'Area between waveforms = ', num2str(area), ' [Vs]},...
      {'\epsilon_s = ', num2str(eps_static)}];
annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');

clear dim str
%% Frequency-Domain analysis -Calibration
% Frequency-Domain analysis accounts for the determination of the frequency
% dependent complex relative permittivity of the medium.

S11_smoothed = fftshift(fft(Vref_prime_smooth))./fftshift(fft(Vinc_prime_smooth));

% To obtain the frequency dependent complex relative permittivity, the S11
% parameter of the measurement needs to be calibrated with the error
% functions for the system.
%S11_calibrated = (S11_smoothed - E_dir)./(E_smh.* (S11_smoothed - E_dir) + E_ftr);
%S11_calibrated = (S11_smoothed - E_dir)./(E_ftr);
S11_calibrated = S11_smoothed;
figure('Name','Measured S11')
subplot(2,1,1);
plot(freq,real(S11_smoothed));
xlim([-high_freq high_freq]);
grid minor;
xlabel('Frequency [GHz]'); ylabel('re{S11}');
title('Measured S11');
subplot(2,1,2);
plot(freq,imag(S11_smoothed));
xlim([-high_freq high_freq]);
grid minor;
xlabel('Frequency [GHz]'); ylabel('im{S11}');

%% Recovery of the parameters
% Then the S11 parameter will be used to solve the permittivity from the
% coaxial line equation using particle swarm optimization (PSO) method.
% Each particle will move in three dimensions that correspond to the three
% variables not yet determined from a Cole-Cole dispersion model for
% permittivity: Relaxation frequency, and Eps_infty.

Nd = 2; % Dimensiones de las partículas
Qparticles = 100; % Cantidad de partículas a utilizar
rfreq_l = 10e6;
rfreq_h = 20e9;
epsinfty_l = 1;
epsinfty_h = 5;

low_index = find(freq >= -0.5,1);
high_index = find(freq >= 0.5,1);
freq_cut = freq(low_index:high_index);
S11_calibrated_cut = S11_calibrated(low_index:high_index);
S11_smoothed_cut = S11_smoothed(low_index:high_index);

QPSOruns = 10;
globalBests = zeros(QPSOruns,Nd);
globalFitness = zeros(QPSOruns,1);

for global_runs = 1:QPSOruns
    particles = zeros(Qparticles,Nd); % Arreglo de partículas
    velocities = zeros(Qparticles,Nd); % Arreglo de velocidades de partículas

    % Particles are located randomly within constrains of their dimensions.
    for i = 1:Qparticles
        [particles(i,1), particles(i,2)] = ...
            random_particle_locator_v2(rfreq_l, rfreq_h, epsinfty_l, epsinfty_h);
    end

    % Stores the adjustment of particle produces on the current iteration:
    current_fitness = zeros(Qparticles, 1);
    % Stores the best adjustment each particle produces (particle best fitness):
    pBestFitness = zeros(Qparticles, 1);
    % Stores the location of each particle (particle best) where it best
    % adjusted the model:
    pBest = zeros(Qparticles, Nd);
    % Stores the best global adjustment the particles produced:
    gBestFitness = 0;
    % Stores the location of the particle that produced the best adjustment:
    gBest = zeros(1, Nd);

    % Velocity update constants:
    w = 0.5; c1 = 1.4; c2 = 1.4;

    % Exit condition is the number of iterations:
    Qiterations = 100;

```

```
% % Iterative process
save_1 = particles;
% figure
for c_iter = 1:Qiterations
    % scatter(particles(:,1), particles(:,2))
    % title(num2str(c_iter))
    % xlim([rfreq_1 rfreq_h]); ylim([0 10]);
    % drawnow
    if c_iter == 33
        save_2 = particles;
    elseif c_iter == 66
        save_3 = particles;
    elseif c_iter == 100
        save_4 = particles;
    end
    for c_part = 1:Qparticles
        if particles(c_part,1) > rfreq_h || particles(c_part,1) < rfreq_1
            [particles(c_part,1), ~] = ...
            random_particle_locator_v2(rfreq_1, rfreq_h, epsinfty_1, epsinfty_h);
        end
        if particles(c_part,2) < epsinfty_1
            [~, particles(c_part,2)] = ...
            random_particle_locator_v2(rfreq_1, rfreq_h, epsinfty_1, epsinfty_h);
        end
        frelax = particles(c_part,1);
        eps_inf = particles(c_part,2);
        alpha = 0;
        beta = 1;

        t_o = 1/(2*pi*frelax);
        eps_aux = Havriliak_Negami(eps_inf, eps_static, freq_cut.*10^9, t_o, alpha, beta);
        eps_recov = eps_aux -(li*sigma_dc)./(2*pi*eps_o.* (freq_cut.*10^9));

        rho_recov = rho_calc(z,eps_recov);
        gamma_recov = gamma_calc(freq_cut.*10^9,eps_recov,c_o);
        S11_recov = S11_calc(rho_recov,gamma_recov,L);

        %real_fit = sum(real(S11_recov).^2 - real(S11_calibrated_cut).^2);
        %imag_fit = sum(imag(S11_recov).^2 - imag(S11_calibrated_cut).^2);
        %abs_fit = sum(abs(S11_recov).^2 - abs(S11_calibrated_cut).^2);

        peaks_recov = numel(findpeaks(real(S11_recov)));
        peaks_measu = numel(findpeaks(real(S11_calibrated_cut)));

        current_fitness(c_part) = abs(peaks_recov - peaks_measu);
        %current_fitness(c_part) = real_fit;

        if c_iter == 1
            pBestFitness(c_part) = current_fitness(c_part);
            pBest(c_part,:) = particles(c_part,:);
        else
            if current_fitness(c_part) < pBestFitness(c_part)
                pBestFitness(c_part) = current_fitness(c_part);
                pBest(c_part,:) = particles(c_part,:);
            end
        end
    end
end
% The best fitness and particle location obtained among particles is
% stored.
[current_best, best_pos] = min(abs(pBestFitness));
% The current best is compared against the former best. If the current
% betters the former, it will be stored into gBestFitness and gBest.
if c_iter == 1
    gBestFitness = current_best;
    gBest(:) = pBest(best_pos,:);
else
    if current_best < gBestFitness
        gBestFitness = current_best;
        gBest(:) = pBest(best_pos,:);
    end
end
for c_part = 1:Qparticles
    velocities(c_part,:) = w.*velocities(c_part,:) +...
        c1 * rand .* (pBest(c_part,1:Nd) - particles(c_part,:)) +...
        c2 * rand .* (gBest(1:Nd) - particles(c_part,:));
    particles(c_part,:) = particles(c_part,:) + velocities(c_part,:);
end
globalFitness(global_runs) = gBestFitness;
globalBests(global_runs,:) = gBest;
end
[~,bestComp] = min(globalFitness);
% gBest(1) = mean(globalBests(:,1));
% gBest(2) = mean(globalBests(:,2));
gBest(1) = globalBests(bestComp,1);
gBest(2) = globalBests(bestComp,2);
%% Plot solution
sol.frelax = gBest(1);
sol.eps_inf = gBest(2);
sol.eps_s = eps_static;
sol.sigma_dc = sigma_dc;
sol.t_o = 1/(2*pi*sol.frelax);
sol.alpha = 0;
sol.beta = 1;

eps_aux = Havriliak_Negami(sol.eps_inf, sol.eps_s, freq.*10^9, sol.t_o, sol.alpha, sol.beta);
complex_eps = eps_aux -(li*sol.sigma_dc)./(2*pi*eps_o.* (freq.*10^-9));

rho_sol = rho_calc(z,complex_eps);
```

```

gamma_sol = gamma_calc(freq.*10^9,complex_eps,c_o);
S11_sol = S11_calc(rho_sol,gamma_sol,L);

figure('Name','Recovered S11')
subplot(2,1,1);
plot(freq,real(S11_calibrated)); hold on;
plot(freq,real(S11_sol)); hold on;
xlim([-high_freq high_freq]); legend('Measured', 'Recovered');
grid minor;
xlabel('Frequency [GHz]'); ylabel('re{S11}');
title('Recovered S11');
subplot(2,1,2);
plot(freq,imag(S11_calibrated)); hold on;
plot(freq,imag(S11_sol)); hold on;
xlim([-high_freq high_freq]); legend('Measured', 'Recovered');
grid minor;
xlabel('Frequency [GHz]'); ylabel('im{S11}');

figure('Name', 'Recovered complex permittivity')
semilogx(freq, real(complex_eps), 'LineWidth', 2); hold on
semilogx(freq, abs(imag(complex_eps)), 'LineWidth', 2); grid minor
xlim([low_freq 12]);
xlabel('Frequency [GHz]'); ylabel('Relative permittivity');
legend('real', 'imag');
title('Complex permittivity measured with TDR');

% Plot particles
figure('Name','Particles 1')
scatter(save_1(:,1),save_1(:,2)); grid minor;
xlim([rfreq_l rfreq_h]); ylim([0 8]);
xlabel('Frequency [Hz]'); ylabel('|\epsilon_\infty|');
title('Iteration 1')

figure('Name','Particles 2')
scatter(save_2(:,1),save_2(:,2)); grid minor;
xlim([rfreq_l rfreq_h]); ylim([0 8]);
xlabel('Frequency [Hz]'); ylabel('|\epsilon_\infty|');
title('Iteration 33')

figure('Name','Particles 2')
scatter(save_3(:,1),save_3(:,2)); grid minor;
xlim([rfreq_l rfreq_h]); ylim([0 8]);
xlabel('Frequency [Hz]'); ylabel('|\epsilon_\infty|');
title('Iteration 66')

figure('Name','Particles 2')
scatter(save_4(:,1),save_4(:,2)); grid minor;
xlim([rfreq_l rfreq_h]); ylim([0 8]);
xlabel('Frequency [Hz]'); ylabel('|\epsilon_\infty|');
title('Iteration 100')

```

#### A.4.1. Función de lectura de los archivos

```

function [header, Vinc, Vref, Vinc_prime, Vref_prime, S11, time, freq, ...
time_in_head] = load_gprMax_files(file_name,eps,Lhead)
%load_gprMax_files Carga los archivos de TDR simulados con gprMax
% La función carga los valores de los archivos de la sonda TDR en gprMax.
%
% Argumentos:
% full_file_name: Nombre completo del archivo .out de gprMax.
% eps: Permittividad del cabezal de la sonda
% Lhead: longitud del cabezal de la sonda
%
% Salidas:
% header: Cabecera de la simulacion en gprMax.
% Vinc: Voltaje incidente a la sonda.
% Vref: Voltaje reflejado por la sonda.
% Vinc_prime: Primera derivada del voltaje incidente.
% Vref_prime: Primera derivada del voltaje reflejado.
% S11: Parametro S11 de medido de la sonda.
% time: vector de tiempo [ns].
% freq: vector de frecuencia [GHz].
%
% Constants
eps_o = 8.854187817e-12; % Vacuum permittivity
mu_o = 1.256637061e-6; % Vacuum permeability
c_o = 1/sqrt(eps_o*mu_o); % Propagation velocity in vacuum [m/s]

Lhead = 0.1; % Length of the epoxy head [m]
%eps = 3.6; % Relative permittivity of the epoxy
%
% Header retrieval
header.title = h5readatt(file_name,'/','Title'); % Simulation title
header.iterations = double(h5readatt(file_name,'/','Iterations')); % Amount of iterations
temp = h5readatt(file_name,'/','dx_dy_dz');
header.dx = temp(1); % Size step in x [m]
header.dy = temp(2); % Size step in y [m]
header.dz = temp(3); % Size step in z [m]
temp_domain = double(h5readatt(file_name,'/','nx_ny_nz'));
header.x = temp(1)*temp_domain(1); % Size of x domain [m]
header.y = temp(2)*temp_domain(2); % Size of y domain [m]
header.z = temp(3)*temp_domain(3); % Size of z domain [m]
header.dt = h5readatt(file_name,'/','dt'); % Time step [s]
header.nsrc = h5readatt(file_name,'/','nsrc'); % Amount of sources
header.nrx = h5readatt(file_name,'/','nrx'); % Amount of receivers

```

```

temp_pos = h5readatt(file_name, '/tls/tl1', 'Position'); % Source pos.
header.sx = temp_pos(1);
header.sy = temp_pos(2);
header.sz = temp_pos(3);
%% Time vector
tsamp = (header.dt)*1E9; % Sampling time [ns]
time = (0:header.iterations-1)*tsamp;
%% Retrieval of incident and total voltage
Vinc = double(h5read(file_name, '/tls/tl1/Vinc'));
Vtot = double(h5read(file_name, '/tls/tl1/Vtotal'));
%% Numerical error clean-up for total voltage
first_nonzero = find(Vinc ~= 0, 1);
Vtot = [ones(1,first_nonzero-1).*Vtot(first_nonzero) Vtot(first_nonzero:end)];
time_in_head = (2*Lhead*sqrt(eps)/c_o)*10^9;
head_index = find(time >= time(first_nonzero) + time_in_head, 1);
%% Reflected voltage calculation
Vref = Vtot - Vinc;
Vref = [zeros(1,head_index) Vref(head_index+1:end)];
%% Calculate derivatives
Vref_prime = diff(Vref);
Vref_prime = [Vref_prime Vref_prime(end)]./tsamp;
%% Frequency vector
fsamp = (1/header.dt)*1E-9;
freq = (-header.iterations/2:header.iterations/2-1)*fsamp/header.iterations;
%% S11 parameter
Vinc_prime = diff(Vinc);
Vinc_prime = [Vinc_prime Vinc_prime(end)]./tsamp;
S11 = fftshift(fft(Vref_prime))./fftshift(fft(Vinc_prime));
end

```

#### A.4.2. Función de ubicación aleatoria de las partículas

```

function [f, eps] = random_particle_locator_v2(freq_l, freq_h, eps_l, eps_h)
%Places the particles in a random location on each of its dimensions within
%the range given.
% freq_l: lower limit of the relaxation frequency range.
% freq_h: higher limit of the relaxation frequency range.
% eps_l: lower limit of the eps_infty range.
% eps_h: higher limit of the eps_infty range.

f = freq_l + (freq_l+freq_h)*rand;
eps = eps_l + (eps_l+eps_h)*rand;
end

```

#### A.5. Script de procesamiento de las señales de TDR medidas

```

%% TDR data processing
% This script reads the TDR output files (from gprMax and PCTDR) and
% obtains the complex relative permittivity through time-domain and
% frequency-domain (FFT) analysis of the signals.
% Author:
% Daniel Julian Gonzalez Ramirez -dj.gonzalez1203@uniandes.edu.co
% june 2019
close all
clear
%% References
% [1] Heimovaara, T. J., and Bouten, W. (1990). A Computer-Controlled
% 36-Channel Time Domain Reflectometry System for Monitoring Soil Water
% Contents.
%% Anonymous functions
% Calculation of Havriliak Negami permittivity model:
Havriliak_Negami = @(eps_inf, eps_s, f, t_o, alpha, beta) eps_inf +...
    (eps_s -eps_inf)./( (1 + (li * 2 * pi * t_o .*f)).^(1 -alpha)).^beta;
% Calculation of complex rho for the coaxial probe:
rho_calc = @(z,eps) (1 -z.*sqrt(eps))./(1 + z.*sqrt(eps));
% Calculation of complex gamma for the coaxial probe:
gamma_calc = @(f,eps,c) (li*2*pi.*f.*sqrt(eps))./c;
% Calculation of the S11 parameter for the coaxial probe:
S11_calc = @(rho,gamma,l) (rho + exp(-2*l.*gamma))./(1 +...
    rho.*exp(-2*l.*gamma));
%% Constants
% The following are the values for the constant parameters for the coaxial
% TDR probe.
eps_o = 8.854187817e-12; % Vacuum permittivity
mu_o = 1.256637061e-6; % Vacuum permeability
c_o = 1/sqrt(eps_o*mu_o); % Propagation velocity in vacuum [m/s]
Z_c = 50; % Impedance of the cable [Ohms]
Lmech = 0.30; % Mechanical length of the probe [m]
a = 0.00476; % Rod diameter [m]
b = 0.045; % Distance between outer rods [m]
Z_p = 60 * log(b/a); % Impedance of the probe in vacuum [Ohms]
z = Z_c/Z_p; % Impedance ratio

```

```

L_epoxy = 0.11; % Length of the epoxy head [m]
eps_epoxy = 4.6; % Relative permittivity of the epoxy
low_freq = 0.01; % Low frequency of TDR range [GHz]
high_freq = 1; % High frequency of TDR range [GHz]
%% File load
% Prompt the user to select the source of the data to be used.
% Version 1 of TDR script will only accept gprMax files.
def_route = 'D:\OneDrive\OneDrive - Pontificia Universidad Javeriana\2019_10\TESIS\TDR200\*.dat';
[filename, pathname] = uigetfile(def_route, 'Select output file');
fullfilename = [pathname filename];
%% Retrieval of the desired information from the output file
[header, Vinc, Vref, Vinc_prime, Vref_prime, S11, time, freq, thead]...
= TDR200_read(fullfilename);
tsamp = time(2) - time(1); % Sampling time [ns]
fsamp = freq(2) - freq(1); % Sampling freq [GHz]
dt = tsamp * 10^-9;
freq(20481) = eps;
%% Load calibration
% The electrical length of the probe might differ from the actual length.
% In order to calibrate the length to the electrical distance, an open-air
% signal is analyzed.
%load('calibration_2019-06-19-09-01-00.mat')
load('calibration_2019-06-25-11-32-05.mat')
%% Time-Domain analysis
% Time-Domain analysis accounts for the determination of the electrical
% conductivity and the apparent relative permittivity of the medium.

% High-frequency components account for errors in the determination of the
% inflection points for the time-domain signal. Time-windowed smoothing is
% used to eliminate the undesirable frequency components.
cut_off_freq = 12e9; % Cut-off frequency [Hz]
cut_off_samples = floor(1 / (cut_off_freq * dt));
Vinc_smoothed = smooth(Vinc,cut_off_samples);
Vref_smoothed = smooth(Vref,cut_off_samples);

Vinc_prime_smooth = diff(Vinc_smoothed);
Vinc_prime_smooth = [Vinc_prime_smooth Vinc_prime_smooth(end)]./tsamp;
Vref_prime_smooth = diff(Vref_smoothed);
Vref_prime_smooth = [Vref_prime_smooth Vref_prime_smooth(end)]./tsamp;

% To find the reflection point in the TDR reflected signal one must
% locate the inflection point of the first reflection (S), through the
% first derivative of the reflected voltage.
S_loc = S_point_location(Vref_prime_smooth);

% After the location of the inflection point one must determine the time
% intervals for the reflection point analysis as in Heimovaara and Bouten
% [1]. This algorithm has a different approach than [1] for the calculation
% of the time intervals, although the current algorithm relies also on
% empirical parameters it has a systematic approach to the calculation
% based on percentages of the inflection point time.

dt_min = 0.1*time(S_loc);
time_min = time(S_loc) - dt_min;
min_loc = find(time >= time_min, 1);
time_min = time(min_loc:S_loc);

dt_base = 60*tsamp;
dt_infl = 20*tsamp;

% With the time intervals set now the linear approximation for the base and
% inflection intervals are needed. In this algorithm they are done using
% the first and last points of the interval to determine the slope and
% intercept of the lines. This approach showed better results than linear
% regression and weighter linear regression.

line_base = line_calc(Vref,time,dt_base,time_min,min_loc,1);
line_infl = line_calc(Vref,time,dt_infl,time_min,S_loc,2);

% Apparent permittivity calculation. Using the interception point of both
% inflection line and base line as the reflection point (sto point), and
% the first peak as the start point
start_time_loc = find(Vref == 0, 1);
line_difference = abs(line_infl.^2 - line_base.^2);
% stop_time_loc = find((line_infl >= line_base,1); % Location in time_min
% [stop_time_loc] = min([line_difference]);
stop_time_loc = find(time == time_min(stop_time_loc));

flight_time = (time(stop_time_loc) - time(start_time_loc))*1e-9; % [s]

apparent_permittivity = ((flight_time * c_o)/(L))^2;
display(apparent_permittivity)

% Electrical conductivity calculation. The electrical conductivity is
% calculated using the reflected voltage at infinity-time and the geometry
% of the probe.
rho_infty = Vref(end)/Vinc(end);
sigma_dc = ((eps_o*c_o)/(z*L))*((1-rho_infty)/(1+rho_infty));
display(sigma_dc)

% Response of an ideal medium. The area between the reflected waveforms of
% an ideal medium with  $\epsilon_s = 1 - j*\sigma/(c_o*2*pi*f)$  and the actual
% reflected waveform gives the value of the static relative permittivity
%  $\epsilon_s$ .
%delay = 2*L/c_o;
delay = 0;
steps_delay = delay/dt;
time_index = ceil(start_time_loc + steps_delay);
time_index = start_time_loc;

length_high = length(Vref) - time_index;

```

```

first_nonzero = 1095;

Vref_ideal = [zeros(1,time_index) Vinc(first_nonzero:first_nonzero+length_high-1)];
Vref_ideal = Vref_ideal*rho_infty;

stop = 8000;
wf_difference = Vref_ideal(1:stop) -Vref(1:stop);
area = trapz(wf_difference,time(1:stop).*10^-9);
eps_static = abs((area*c_o)/(g*(Vref(end))*z*L)) + 1;

display(eps_static)
%% Graphics from time-domain analysis
% Incident and reflected voltage waveforms
figure('Name','Incident and reflected voltage')
subplot(2,1,1); plot(time, Vinc); grid minor;
xlabel('time [ns]'); ylabel('Voltage [V]'); title('Incident voltage');
xlim([time(1) time(end)]);
ylim([min(min(Vinc) min(Vref)) max([max(Vinc) max(Vref)])]);
subplot(2,1,2); plot(time, Vref); grid minor;
xlabel('time [ns]'); ylabel('Voltage [V]'); title('Reflected voltage');
xlim([time(1) time(end)]);
ylim([min(min(Vinc) min(Vref)) max([max(Vinc) max(Vref)])]);

% End point location and tangent lines
figure('Name','End reflection point')
hplot = plot(time, Vref); hold on; grid minor;
plot(time_min, line_base); hold on;
plot(time_min, line_infl); hold on;
xlabel('time [ns]'); ylabel('Voltage [V]');
title('Reflected voltage end reflection');
xlim([time_min(1)-1 time_min(end)+1]);

dcm_obj = datacursormode();
dtip = createDatatip(dcm_obj, hplot);
dtip.Position = [time(stop_time_loc),Vref(stop_time_loc)];
text(time(stop_time_loc),Vref(stop_time_loc),T End point')

clear hplot dtip dcm_obj

% Location of start and end point on the reflected voltage
figure('Name','Start and end point')
hplot = plot(time, Vref); hold on; grid minor;
xlabel('time [ns]'); ylabel('Voltage [V]');
title('Reflected voltage start and end points');
xlim([time(1) 1.5*time_min(end)]);

dcm_obj = datacursormode();
dtip1 = createDatatip(dcm_obj, hplot);
dtip1.Position = [time(start_time_loc),Vref(start_time_loc)];
text(time(stop_time_loc),Vref(stop_time_loc),T End point')
dtip2 = createDatatip(dcm_obj, hplot);
dtip2.Position = [time(stop_time_loc),Vref(stop_time_loc)];
text(time(start_time_loc),Vref(start_time_loc),T Start point')
text(time(stop_time_loc),Vref(stop_time_loc),T End point')

dim = [.2 .5 .3 .3];
str = {[2-way flight time = ', num2str(flight_time), ' [s]',...
[K_a = ,num2str(apparent_permittivity)]];
annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');

clear hplot dtip1 dtip2 dcm_obj dim str

% Comparisson between incident amplitude and stable reflected amplitude
figure('Name','Incident and reflected voltage comparisson')
hplot1 = plot(time, Vinc); hold on; grid minor;
hplot2 = plot(time, Vref);
xlabel('time [ns]'); ylabel('Voltage [V]');
title('Incident and reflected voltage');
legend('Incident', 'Reflected');
xlim([time(1) time(end)]);

dcm_obj = datacursormode();
dtip1 = createDatatip(dcm_obj, hplot1);
dtip1.Position = [time(end),Vinc(end)];
dtip2 = createDatatip(dcm_obj, hplot2);
dtip2.Position = [time(end),Vref(end)];

dim = [.3 .5 .1 .1];
str = {[`rho_infty = ', num2str(rho_infty)],...
[`sigma_DC = ',num2str(sigma_dc),' [S/m]'];
annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');

clear hplot1 hplot2 dtip1 dtip2 dcm_obj dim str

% Ideal reflected waveform and actual reflected waveform
figure('Name','Ideal and actual reflected waveforms')
plot(time, Vref_ideal); hold on; grid minor;
plot(time, Vref);
xlabel('time [ns]'); ylabel('Voltage [V]');
title('Ideal and actual reflected waveforms');
legend('Ideal', 'Actual');
xlim([time(1) time(end)]);

dim = [.3 .5 .1 .1];
str = {[`Area between waveforms = ', num2str(area), ' [Vs]',...
[`epsilon_s = ',num2str(eps_static)],];
annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');

clear dim str
%% Frequency-Domain analysis -Calibration
% Frequency-Domain analysis accounts for the determination of the frequency

```

```
% dependent complex relative permittivity of the medium.

S11_smoothed = fftshift(fft(Vref_prime_smooth))./fftshift(fft(Vinc_prime_smooth));

% To obtain the frequency dependent complex relative permittivity, the S11
% parameter of the measurement needs to be calibrated with the error
% functions for the system.
%$S11_calibrated = (S11_smoothed - E_dir)./(E_smh.* (S11_smoothed - E_dir) + E_ftr);
%$S11_calibrated = (S11_smoothed - E_dir)./(E_ftr);
%$S11_calibrated = smooth(S11_smoothed,27)';
S11_calibrated = S11_smoothed;
figure('Name','Measured S11');
subplot(2,1,1);
plot(freq,real(S11_calibrated));
xlim([-high_freq high_freq]);
grid minor;
xlabel('Frequency [GHz]'); ylabel('re{S11}');
title('Measured S11');
subplot(2,1,2);
plot(freq,imag(S11_calibrated));
xlim([-high_freq high_freq]);
grid minor;
xlabel('Frequency [GHz]'); ylabel('im{S11}');

% Recovery of the parameters
% Then the S11 parameter will be used to solve the permittivity from the
% coaxial line equation using particle swarm optimization (PSO) method.
% Each particle will move in three dimensions that correspond to the three
% variables not yet determined from a Cole-Cole dispersion model for
% permittivity: Relaxation frequency, and Eps_infty.

Nd = 2; % Dimensiones de las partículas
Qparticles = 100; % Cantidad de partículas a utilizar
rfreq_l = 10e6;
rfreq_h = 20e9;
epsinfty_l = 1;
epsinfty_h = 5;

low_index = find(freq >= -0.5,1);
high_index = find(freq >= 0.5,1);
freq_cut = freq(low_index:high_index);
S11_calibrated_cut = S11_calibrated(low_index:high_index);
S11_smoothed_cut = S11_smoothed(low_index:high_index);

QPSOruns = 10;
globalBests = zeros(QPSOruns,Nd);
globalFitness = zeros(QPSOruns,1);
%%%
for global_runs = 1:QPSOruns
    particles = zeros(Qparticles,Nd); % Arreglo de partículas
    velocities = zeros(Qparticles,Nd); % Arreglo de velocidades de partículas

    % Particles are located randomly within constraints of their dimensions.
    for i = 1:Qparticles
        [particles(i,1), particles(i,2)] = ...
            random_particle_locator_v2(rfreq_l, rfreq_h, epsinfty_l, epsinfty_h);
    end

    % Stores the adjustment of particle produces on the current iteration:
    current_fitness = zeros(Qparticles, 1);
    % Stores the best adjustment each particle produces (particle best fitness):
    pBestFitness = zeros(Qparticles, 1);
    % Stores the location of each particle (particle best) where it best
    % adjusted the model:
    pBest = zeros(Qparticles, Nd);
    % Stores the best global adjustment the particles produced:
    gBestFitness = 0;
    % Stores the location of the particle that produced the best adjustment:
    gBest = zeros(1, Nd);

    % Velocity update constants:
    w = 0.5; c1 = 1.4; c2 = 1.4;

    % Exit condition is the number of iterations:
    Qiterations = 100;
    % Iterative process
    save_1 = particles;
    % figure
    for c_iter = 1:Qiterations
        % scatter(particles(:,1), particles(:,2))
        % title(num2str(c_iter))
        % xlim([rfreq_l rfreq_h]); ylim([0 10]);
        % drawnow
        if c_iter == 33
            save_2 = particles;
        elseif c_iter == 66
            save_3 = particles;
        elseif c_iter == 100
            save_4 = particles;
        end
        for c_part = 1:Qparticles
            if particles(c_part,1) > rfreq_h || particles(c_part,1) < rfreq_l
                [particles(c_part,1), ~] = ...
                    random_particle_locator_v2(rfreq_l, rfreq_h, epsinfty_l, epsinfty_h);
            end
            if particles(c_part,2) < epsinfty_l || particles(c_part,2) > eps_static
                [~, particles(c_part,2)] = ...
                    random_particle_locator_v2(rfreq_l, rfreq_h, epsinfty_l, epsinfty_h);
            end
        end
        frelax = particles(c_part,1);
```

```

eps_inf = particles(c_part,2);
alpha = 0;
beta = 1;

t_o = 1/(2*pi*frelax);
eps_aux = Havriliak_Negami(eps_inf, eps_static, freq_cut.*10^9, t_o, alpha, beta);
eps_recov = eps_aux -(li*sigma_dc)./(2*pi*eps_o.*(freq_cut.*10^9));

rho_recov = rho_calc(z,eps_recov);
gamma_recov = gamma_calc(freq_cut.*10^9,eps_recov,c_o);
S11_recov = S11_calc(rho_recov,gamma_recov,L);

%real_fit = sum(real(S11_recov).^2-real(S11_calibrated_cut).^2);
%imag_fit = sum(imag(S11_recov).^2 -imag(S11_calibrated_cut).^2);
%abs_fit = sum(abs(S11_recov).^2-abs(S11_calibrated_cut).^2);

peaks_recov = numel(findpeaks(real(S11_recov)));
peaks_measur = numel(findpeaks(real(S11_calibrated_cut)));

current_fitness(c_part) = abs(peaks_recov-peaks_measur);
%current_fitness(c_part) = real_fit;

if c_iter == 1
    pBestFitness(c_part) = current_fitness(c_part);
    pBest(c_part,:) = particles(c_part,:);
else
    if current_fitness(c_part) < pBestFitness(c_part)
        pBestFitness(c_part) = current_fitness(c_part);
        pBest(c_part,:) = particles(c_part,:);
    end
end
end
% The best fitness and particle location obtained among particles is
% stored.
[current_best, best_pos] = min(abs(pBestFitness));
% The current best is compared against the former best. If the current
% betters the former, it will be stored into gBestFitness and gBest.
if c_iter == 1
    gBestFitness = current_best;
    gBest() = pBest(best_pos,:);
else
    if current_best < gBestFitness
        gBestFitness = current_best;
        gBest() = pBest(best_pos,:);
    end
end
for c_part = 1:Qparticles
    velocities(c_part,:) = w.*velocities(c_part,:)+...
        c1 * rand .* (pBest(c_part,1:Nd)-particles(c_part,:))+...
        c2 * rand .* (gBest(1:Nd)-particles(c_part,:));
    particles(c_part,:) = particles(c_part,:)+velocities(c_part,:);
end
end
globalFitness(global_runs) = gBestFitness;
globalBests(global_runs,:) = gBest;
end
[~,bestComp] = min(globalFitness);
% gBest(1) = mean(globalBests(:,1));
% gBest(2) = mean(globalBests(:,2));
gBest(1) = globalBests(bestComp,1);
gBest(2) = globalBests(bestComp,2);
%% Plot solution
% gBest = globalBests(5,:);
sol.frelax = gBest(1);
sol.eps_inf = gBest(2);
sol.eps_s = eps_static;
sol.sigma_dc = sigma_dc;
sol.t_o = 1/(2*pi*sol.frelax);
sol.alpha = 0;
sol.beta = 1;

eps_aux = Havriliak_Negami(sol.eps_inf, sol.eps_s, freq.*10^9, sol.t_o, sol.alpha, sol.beta);
complex_eps = eps_aux -(li*sol.sigma_dc)./(2*pi*eps_o.*(freq.*10^9));

rho_sol = rho_calc(z,complex_eps);
gamma_sol = gamma_calc(freq.*10^9,complex_eps,c_o);
S11_sol = S11_calc(rho_sol,gamma_sol,L);

figure('Name','Recovered S11')
subplot(2,1,1);
plot(freq,real(S11_calibrated)); hold on;
plot(freq,real(S11_sol)); hold on;
xlim([-high_freq high_freq]); legend('Measured', 'Recovered');
grid minor;
xlabel('Frequency [GHz]'); ylabel('re{S11}');
title('Recovered S11');
subplot(2,1,2);
plot(freq,imag(S11_calibrated)); hold on;
plot(freq,imag(S11_sol)); hold on;
xlim([-high_freq high_freq]); legend('Measured', 'Recovered');
grid minor;
xlabel('Frequency [GHz]'); ylabel('im{S11}');

figure('Name', 'Recovered complex permittivity')
semilogx(freq, real(complex_eps), 'LineWidth', 2); hold on;
semilogx(freq, abs(imag(complex_eps)), 'LineWidth', 2); grid minor;
xlim([low_freq 12]);
xlabel('Frequency [GHz]'); ylabel('Relative permittivity');
legend('real', 'imag');

```

```
title('Complex permittivity measured with TDR');
```

### A.5.1. Función de lectura de los archivos

```
function [probe_info, Vinc, Vref, Vinc_prime, Vref_prime, S11, time, freq, ...
head_delay] = TDR200_read(fullfile);
% % Análisis de señales obtenidas con el TDR200
% El TDR200 de Campbell Scientific se conecta con el computador para hacer
% lecturas de la señal reflejada por una sonda coaxial. A partir de estas
% lecturas se puede determinar la permitividad compleja y la conductividad
% del dielectro donde está insertada la sonda.
% En este script se estudia la onda reflejada para obtener la permitividad
% compleja y la conductividad de los suelos a partir de las mediciones.
%
% Daniel Julian Gonzalez Ramirez
% dj.gonzalez1203@uniandes.edu.co
% 2019-06-17
% % Constantes importantes para los calculos
eps_o = 8.854187817e-12; % Permitividad del vacío
mu_o = 1.256637061e-6; % Permeabilidad del vacío
c_o = 1/sqrt(eps_o*mu_o); % Velocidad de propagación en vacío
%% Extracción del vector de tiempo y del coeficiente de reflexión
Qlines = 10;
[time, rho, header] = read_dat(fullfile,Qlines);
tsamp = time(2)-time(1);
dt = tsamp * 10^-9;
% % Características de la sonda de medición
Qsamples = Qlines*header{3};
eps_head = header{8}; % Permitividad relativa de la cabeza de la sonda [m]
% La separación entre las varillas y el diámetro de las varillas se conoce
% de las dimensiones físicas. Estas dimensiones son diferentes para la
% sonda Campbell Scientific CS610 y la fabricada.
if eps_head == 2.3
    probe_diameter = 0.00476; % Diámetro de las varillas [m]
    probe_spacing = 0.046; % Separación entre las varillas externas [m]
    head_length = header{7}; % Longitud de la cabeza de la sonda [m]
    probe_length = header{6} - head_length; % Longitud enterrable de las varillas [m]
    cable_length = 2; % Longitud del cable coaxial que alimenta la sonda [m]
    cable_vp = 0.66; % Porcentaje de velocidad de propagación del cable
    eps_head = 4.6;
elseif eps_head == 1.74
    probe_diameter = 0.0048; % Diámetro de las varillas [m]
    probe_spacing = 0.045; % Separación entre las varillas externas [m]
    head_length = header{7}; % Longitud de la cabeza de la sonda [m]
    probe_length = header{6}; % Longitud enterrable de las varillas [m]
    cable_length = 4.8768 + .5; % Longitud del cable coaxial que alimenta la sonda [m]
    cable_vp = 0.87; % Porcentaje de velocidad de propagación del cable
else
    probe_diameter = 0.0042; % Diámetro de las varillas [m]
    probe_spacing = 0.046; % Separación entre las varillas externas [m]
end
probe_info.Lmech = probe_length;
probe_info.Lhead = head_length;
probe_info.a = probe_diameter;
probe_info.b = probe_spacing;
probe_info.eps = eps_head;
cable_delay = cable_length / (c_o * cable_vp) * 10^9; % Delay del cable [ns]
%% Creación del perfil de subida de la señal
% El pulso de TDR tiene un tiempo de subida de 85 ps de 0 a 250 mV, aunque
% el fabricante del equipo no especifica la forma del perfil de subida se
% puede asumir de forma exponencial. Asumir que el pulso tiene una forma
% exponencial de subida tiene un gran beneficio para el algoritmo de FDTD,
% ya que la señal entra al dominio de manera suave evitando errores de
% dispersión numérica.
delay = cable_delay; % Retardo para el inicio del pulso [ns]
amplitude = 0.24; % Amplitud del pulso [V]
rise_time = 0.85; % Tiempo de subida del pulso [ns]
gaussian = amplitude .* exp(-((time-delay)./(rise_time/2)).^2);
%% Creación del pulso en estado estable
% Cuando el pulso alcanza su amplitud máxima debe conservar la misma
% amplitud por el resto de la simulación. Para lograrlo se utiliza el
% perfil de subida concatenado con un vector constante en 250 mV.
iterations = length(time);
[~,peak_index] = max(gaussian);
Vinc = [gaussian(1:peak_index) amplitude.*ones(1,iterations-peak_index)];
% Eliminación de los efectos del cabezal de la sonda
head_delay = (head_length * sqrt(eps_head) / c_o) * 10^9;
total_delay = cable_delay + head_delay;
delay_index = find(time >= total_delay,1);
rho_new = [zeros(1,delay_index) rho(delay_index+1:end)];
%% Recuperación del voltaje reflejado
Vref = rho_new.*Vinc;
cut_off_freq = 12e9; % Cut-off frequency [Hz]
cut_off_samples = floor(1 / (cut_off_freq * dt));
Vref_smoothed = smooth(Vref,cut_off_samples)';
Vref_prime_smooth = diff(Vref_smoothed);
Vref_prime = [Vref_prime_smooth Vref_prime_smooth(end)]./tsamp;
%% Frequency vector
fsamp = (1/dt)*1E-9;
freq = (-Qsamples/2:Qsamples/2-1)*fsamp/Qsamples;
```

```
% % S11 parameter
Vinc_smoothed = smooth(Vinc,cut_off_samples)';
Vinc_prime = diff(Vinc_smoothed);
Vinc_prime = [Vinc_prime Vinc_prime(end)]./tsamp;
S11 = fftshift(fft(Vref_prime))./fftshift(fft(Vinc_prime));
end
```

### A.5.2. Función de ubicación aleatoria de las partículas

```
function [f, eps] = random_particle_locator_v2(freq_l, freq_h, eps_l, eps_h)
%Places the particles in a random location on each of its dimensions within
%the range given.
% freq_l: lower limit of the relaxation frequency range.
% freq_h: higher limit of the relaxation frequency range.
% eps_l: lower limit of the eps_infty range.
% eps_h: higher limit of the eps_infty range.

f = freq_l + (freq_l+freq_h)*rand;
eps = eps_l + (eps_l+eps_h)*rand;
end
```

## A.6. Script de calibración de las señales de TDR simuladas

```
% % Full calibration of TDR probe
% Based on three known materials, this code calculates the effective length
% of the TDR probe, form factor and three error functions for S11.
%
% Daniel Julian Gonzalez Ramirez
%
% May 22nd, 2019
clear, clc
close all
%% Anonymus functions
Havriliak_Negami = @(eps_inf, eps_s, f, t_o, alpha, beta) eps_inf +...
(eps_s - eps_inf)./( (1 + (li * 2 * pi * t_o .* f).^(1 - alpha)).^beta);
rho_calc = @(z,eps) (1 - z.*sqrt(eps))./(1 + z.*sqrt(eps));
gamma_calc = @(f,eps,c) (li*2*pi.*sqrt(eps))./c;
S11_calc = @(rho,gamma,l) (rho + exp(-2*l.*gamma))./(1 + rho.*exp(-2*l.*gamma));
%% Constants
eps_o = 8.854187817e-12; % Vacuum permittivity
mu_o = 1.256637061e-6; % Vacuum permeability
c_o = 1./sqrt(eps_o*mu_o); % Propagation velocity in vacuum [m/s]
Z_c = 50; % Impedance of the cable [Ohms]
Lmech = 0.3; % Length of the probe [m]
a = 0.004; % Rod diameter [m]
%a = 0.008; % Rod diameter [m]
b = 0.045; % Distance between outer rods [m]
Z_p = 60 * log(b/a); % Impedance of the probe in vaccum [Ohms]
z = Z_c/Z_p; % Impedance ratio
L_epoxy = 0.1; % Length of the epoxy head [m]
eps_epoxy = 3.6; % Relative permittivity of the epoxy
low_freq = -12; % Low frequency of TDR range [GHz]
high_freq = 12; % High frequency of TDR range [GHz]
%% File load
def_route = 'D:\OneDrive\OneDrive - Pontificia Universidad Javeriana\2019_10\TESIS\gprMax\TDR\*.out';
[filename,pathname] = uigetfile(def_route, 'Select air output file');
full_file_name_air = [pathname filename];
[header, Vinc_air, Vref_air, Vinc_prime_air, Vref_prime_air, S11_air, ...
time, freq] = load_gprMax_files(full_file_name_air,eps_epoxy,L_epoxy);

[filename,pathname] = uigetfile(def_route, 'Select ethanol output file');
full_file_name_eth = [pathname filename];
[~, Vinc_eth, Vref_eth, Vinc_prime_eth, Vref_prime_eth, S11_eth, ...
~, ~] = load_gprMax_files(full_file_name_eth,eps_epoxy,L_epoxy);

[filename,pathname] = uigetfile(def_route, 'Select water output file');
full_file_name_h2o = [pathname filename];
[~, Vinc_h2o, Vref_h2o, Vinc_prime_h2o, Vref_prime_h2o, S11_h2o, ...
~, ~] = load_gprMax_files(full_file_name_h2o,eps_epoxy,L_epoxy);

%% Effective length calibration
t_Ka_air = 1;
t_Ka_eth = 16.2;
t_Ka_h2o = 80.3;
[Lair,st_air] = calibrate_length(full_file_name_air,t_Ka_air);
[Leth,st_eth] = calibrate_length(full_file_name_eth,t_Ka_eth);
[Lh2o,st_h2o] = calibrate_length(full_file_name_h2o,t_Ka_h2o);

L = (Lair+Leth+Lh2o)/3;
display(L)
%% Form factor calibration
t_eps_s_eth = 26.5;
t_eps_s_h2o = 79.9;
```

```

g_eth = calibrate_formfactor(full_file_name_eth,st_eth,L,a,b,t_eps_s_eth);
g_h2o = calibrate_formfactor(full_file_name_h2o,st_h2o,L,a,b,t_eps_s_h2o);
g = (g_eth+g_h2o)/2;
display(g)

```

### A.6.1. Función de calibración de longitud efectiva

```

function [Lcal,start_time_loc] = calibrate_length(full_file_name,target_Ka)
%CALIBRATE_LENGTH
eps_o = 8.854187817e-12; % Vacuum permittivity
mu_o = 1.256637061e-6; % Vacuum permeability
c_o = 1/sqrt(eps_o*mu_o); % Propagation velocity in vacuum [m/s]

[header,~,Vref,~,~,~,time,~] = load_gprMax_files(full_file_name,3.6,0.1);

tsamp = time(2) - time(1); % Sampling time [ns]

% High-frequency components account for errors in the determination of the
% inflection points for the time-domain signal. Time-windowed smoothing is
% used to eliminate the undesirable frequency components.
cut_off_freq = 30e9; % Cut-off frequency [Hz]
cut_off_samples = floor(1 / (cut_off_freq * header.dt));
Vref_smoothed = smooth(Vref,cut_off_samples);

Vref_prime_smooth = diff(Vref_smoothed);
Vref_prime_smooth = [Vref_prime_smooth Vref_prime_smooth(end)]./tsamp;

% To find the reflection point in the TDR reflected signal one must
% locate the inflection point of the first reflection (S), through the
% first derivative of the reflected voltage.
S_loc = S_point_location(Vref_prime_smooth);

% After the location of the inflection point one must determine the time
% intervals for the reflection point analysis as in Heimovaara and Bouter
% [1]. This algorithm has a different approach than [1] for the calculation
% of the time intervals, although the current algorithm relies also on
% empirical parameters it has a systematic approach to the calculation
% based on percentages of the inflection point time.

dt_min = 0.1*time(S_loc);
time_min = time(S_loc) - dt_min;
min_loc = find(time >= time_min, 1);
time_min = time(min_loc:S_loc);

dt_base = 60*tsamp;
dt_infl = 20*tsamp;

% With the time intervals set now the linear approximation for the base and
% inflection intervals are needed. In this algorithm they are done using
% the first and last points of the interval to determine the slope and
% intercept of the lines. This approach showed better results than linear
% regression and weighter linear regression.

line_base = line_calc(Vref,time,dt_base,time_min,min_loc,1);
line_infl = line_calc(Vref,time,dt_infl,time_min,S_loc,2);

% Apparent permittivity calculation. Using the interception point of both
% inflection line and base line as the reflection point (sto point), and
% the first peak as the start point
start_time_loc = find(Vref == 0, 1);
stop_time_loc = find(line_infl >= line_base,1); % Location in time_min
stop_time_loc = find(time == time_min(stop_time_loc));

flight_time = (time(stop_time_loc) - time(start_time_loc))*1e-9; % [s]

Lcal = (flight_time * c_o)/(2*sqrt(target_Ka));
end

```

### A.6.2. Función de calibración de factor de forma

```

function [FormFactor] = calibrate_formfactor(full_file_name,...
    start_time_loc,L,a,b,target_eps_s)
%CALIBRATE_FORMFACTOR
eps_o = 8.854187817e-12; % Vacuum permittivity
mu_o = 1.256637061e-6; % Vacuum permeability
c_o = 1/sqrt(eps_o*mu_o); % Propagation velocity in vacuum [m/s]
Z_c = 50; % Impedance of the cable [Ohms]
Z_p = 60 * log(b/a); % Impedance of the probe in vaccum [Ohms]
z = Z_c/Z_p; % Impedance ratio

[header,Vinc,Vref,~,~,~,time,~] = load_gprMax_files(full_file_name,3.6,0.1);

rho_infty = Vref(end)/Vinc(end);
delay = 0;
steps_delay = delay/header.dt;

```

```

time_index = ceil(start_time_loc + steps_delay);
length_high = length(Vref) - time_index;
first_nonzero = find(Vinc > 0,1);
Vref_ideal = [zeros(1,time_index) Vinc(first_nonzero:first_nonzero+length_high-1)];
Vref_ideal = rho_infty.*Vref_ideal;
wf_difference = Vref_ideal - Vref;
area = abs(trapz(wf_difference,time.*10^-9));
FormFactor = (area*c_o)/((target_eps_s^-1)*Vref(end)*z*L);
end

```

## A.7. Script de calibración de las señales de TDR medidas

```

%% Full calibration of TDR probe
% Based on two known materials, this code calculates the effective length
% of the TDR probe and form factor.
%
% Daniel Julian Gonzalez Ramirez
%
% May 22nd, 2019
clear, clc
close all
%% Anonymous functions
Havriliak_Negami = @(eps_inf, eps_s, f, t_o, alpha, beta) eps_inf +...
(eps_s-eps_inf)./(1+(li*2*pi*t_o.*f).^(1-alpha)).^beta;
rho_calc = @(z,eps) (1-z.*sqrt(eps))./(1+z.*sqrt(eps));
gamma_calc = @(f,eps,c) (li*2*pi*f.*sqrt(eps))./c;
S11_calc = @(rho,gamma,l) (rho + exp(-2*l.*gamma))./(1 + rho.*exp(-2*l.*gamma));
%%
eps_o = 8.854187817e-12; % Vacuum permittivity
mu_o = 1.256637061e-6; % Vacuum permeability
c_o = 1./sqrt(eps_o*mu_o); % Propagation velocity in vacuum [m/s]
Z_c = 50; % Impedance of the cable [Ohms]
low_freq = -12; % Low frequency of TDR range [GHz]
high_freq = 12; % High frequency of TDR range [GHz]
%% File load
def_route = 'D:\*.dat';
[filename, pathname] = uigetfile(def_route, 'Select ethanol output file');
full_file_name_eth = [pathname filename];
[filename, pathname] = uigetfile(def_route, 'Select water output file');
full_file_name_h2o = [pathname filename];
[header, Vinc_eth, Vref_eth, Vinc_prime_eth, Vref_prime_eth, S11_eth,...
time, freq, ~] = TDR200_read(full_file_name_eth);
[~, Vinc_h2o, Vref_h2o, Vinc_prime_h2o, Vref_prime_h2o, S11_h2o,...
~, ~] = TDR200_read(full_file_name_h2o);
%% Read header
Lmech = header.Lmech; % Length of the probe [m]
a = header.a; % Rod diameter [m]
b = header.b; % Distance between outer rods [m]
Z_p = 60 * log(b/a); % Impedance of the probe in vaccum [Ohms]
z = Z_c/Z_p; % Impedance ratio
L_epoxy = header.Lhead; % Length of the epoxy head [m]
eps_epoxy = header.eps; % Relative permittivity of the epoxy
%% Effective length calibration
t_Ka_eth = 16.2;
t_Ka_h2o = 80.3;
[Leth,st_eth] = calibrate_length(full_file_name_eth,t_Ka_eth);
[Lh2o,st_h2o] = calibrate_length(full_file_name_h2o,t_Ka_h2o);
L = (Leth+Lh2o)/2;
display(L)
%% Form factor calibration
t_eps_s_eth = 26.5;
t_eps_s_h2o = 79.9;
[g_eth,sigma_eth] = calibrate_formfactor(full_file_name_eth,st_eth,L,a,b,t_eps_s_eth);
[g_h2o,sigma_h2o] = calibrate_formfactor(full_file_name_h2o,st_h2o,L,a,b,t_eps_s_h2o);
g = (g_eth+g_h2o)/2;
display(g)
date = datestr(now,'yyyy-mm-dd-HH-MM-SS');
name = ['calibration_',date,'.mat'];
save(name,L,'g')

```

### A.7.1. Función de calibración de longitud efectiva

```

function [Lcal,start_time_loc] = calibrate_length(full_file_name,target_Ka)
%CALIBRATE_LENGTH
eps_o = 8.854187817e-12; % Vacuum permittivity
mu_o = 1.256637061e-6; % Vacuum permeability
c_o = 1/sqrt(eps_o*mu_o); % Propagation velocity in vacuum [m/s]
[~,~,Vref,~,~,~,time,~] = TDR200_read(full_file_name);
tsamp = time(2)-time(1); % Sampling time [ns]
dt = tsamp * 10^-9;

% High-frequency components account for errors in the determination of the
% inflection points for the time-domain signal. Time-windowed smoothing is
% used to eliminate the undesirable frequency components.
cut_off_freq = 12e9; % Cut-off frequency [Hz]
cut_off_samples = floor(1 / (cut_off_freq * dt));
Vref_smoothed = smooth(Vref,cut_off_samples);

Vref_prime_smooth = diff(Vref_smoothed);
Vref_prime_smooth = [Vref_prime_smooth Vref_prime_smooth(end)]./tsamp;

% To find the reflection point in the TDR reflected signal one must
% locate the inflection point of the first reflection (S), through the
% first derivative of the reflected voltage.
S_loc = S_point_location_calibration(Vref_prime_smooth,target_Ka);

% After the location of the inflection point one must determine the time
% intervals for the reflection point analysis as in Heimovaara and Boutsen
% [1]. This algorithm has a different approach than [1] for the calculation
% of the time intervals, although the current algorithm relies also on
% empirical parameters it has a systematic approach to the calculation
% based on percentages of the inflection point time.

if target_Ka > 2
    dt_min = 0.1*time(S_loc);
else
    dt_min = 0.03*time(S_loc);
end
time_min = time(S_loc)-dt_min;
min_loc = find(time >= time_min, 1);
time_min = time(min_loc:S_loc);

dt_base = 60*tsamp;
dt_infl = 20*tsamp;

% With the time intervals set now the linear approximation for the base and
% inflection intervals are needed. In this algorithm they are done using
% the first and last points of the interval to determine the slope and
% intercept of the lines. This approach showed better results than linear
% regression and weighter linear regression.

line_base = line_calc(Vref,time,dt_base,time_min,min_loc,1);
line_infl = line_calc(Vref,time,dt_infl,time_min,S_loc,2);

% Apparent permittivity calculation. Using the interception point of both
% inflection line and base line as the reflection point (sto point), and
% the first peak as the start point
start_time_loc = find(Vref ~= 0, 1);
stop_time_loc = find(line_infl >= line_base,1); % Location in time_min
stop_time_loc = find(time >= time_min(stop_time_loc),1);
flight_time = (time(stop_time_loc)-time(start_time_loc))*1e-9; % [s]
Lcal = (flight_time * c_o)/(sqrt(target_Ka));
end

```

### A.7.2. Función de calibración de factor de forma

```

function [FormFactor,sigma_dc] = calibrate_formfactor(full_file_name, ...
    start_time_loc,L,a,b,target_eps_s)
%CALIBRATE_FORMFACTOR

eps_o = 8.854187817e-12; % Vacuum permittivity
mu_o = 1.256637061e-6; % Vacuum permeability
c_o = 1/sqrt(eps_o*mu_o); % Propagation velocity in vacuum [m/s]
Z_c = 50; % Impedance of the cable [Ohms]
Z_p = 60 * log(b/a); % Impedance of the probe in vaccum [Ohms]
z = Z_c/Z_p; % Impedance ratio

[~,Vinc,Vref,~,~,~,time,~] = TDR200_read(full_file_name);
tsamp = time(2)-time(1);
dt = tsamp * 10^-9;

rho_infny = Vref(end)/Vinc(end);
sigma_dc = ((eps_o*c_o)/(z*L))*((1-rho_infny)/(1+rho_infny));

delay = 0;
steps_delay = delay/dt;
time_index = ceil(start_time_loc + steps_delay);

length_high = length(Vref)-time_index;
first_nonzero = find(Vinc > 0,1);

```

```
Vref_ideal = [zeros(1,time_index) Vinc(first_nonzero:first_nonzero+length_high-1)];
Vref_ideal = rho_infty.*Vref_ideal;

wf_difference = Vref_ideal -Vref;
area = abs(trapz(wf_difference,time.*10^-9));
FormFactor = (area*c_o)/((target_eps_s-1)*Vref(end)*z*L);
end
```