

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA FRACTAL PARA DETECCIÓN DE
MINAS ANTIPERSONAL ARTESANALES DE ENVASE PLÁSTICO

Autor:

CRISTIAN HERNANDO BLANCO GÓMEZ



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

BOGOTÁ D.C

2019

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA FRACTAL PARA DETECCIÓN DE
MINAS ANTIPERSONAL ARTESANALES DE ENVASE PLÁSTICO

CRISTIAN HERNANDO BLANCO GÓMEZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Electrónica

Director

HERNAN PAZ PENAGOS, Ph. D

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

BOGOTÁ D.C

2019

RESUMEN

Como consecuencia del conflicto armado en Colombia, gran parte del territorio nacional se encuentra afectado por la presencia de Minas Antipersona (MAP). En nuestro país las MAP son fabricadas principalmente con materiales no convencionales como por ejemplo botellas de plástico, lo cual dificulta su detección. La presente investigación propone el diseño y simulación de una antena fractal para ser utilizada en la detección de minas de envase plástico, por medio del análisis del fenómeno físico de la reflexión de una señal electromagnética, mismo principio utilizado en la tecnología de radar de penetración terrestre (GPR). Para el cumplimiento de este objetivo se realizó una metodología por etapas la cual inicio con una investigación de: los principales tipos de minas utilizadas en nuestro país, el estado del arte en técnicas de detección de minas no convencionales y artefactos explosivos improvisados, un análisis de las propiedades de los fractales y sus aplicaciones en antenas, además de las ecuaciones y cálculos relacionados a los medios de transmisión. Finalizada la parte de investigación, se procedió a diseñar la antena y se realizan las simulaciones de la misma, obteniendo una antena con un parámetro S11 de 32.29 dB y una relación de onda estacionaria (SWR) de nivel 1.049. Posteriormente se realizó la caracterización de los dos medios, tomando como referencia las propiedades eléctricas del suelo en una región del país afectada por la presencia de MAP, se construyeron sus modelos circuitales en parámetros distribuidos, y de esa manera simular el fenómeno físico. En la última etapa se analizaron los resultados obtenidos y se evidencia que la antena diseñada logra generar una señal que al reflejarse en la mina de plástico cuenta con la potencia suficiente para ser captada por un sistema de radar, de esta manera se puede inferir que la antena fractal si puede ser utilizada en la detección de minas, sin embargo se identifica que las propiedades del suelo juegan un papel fundamental en el proceso y la variación de estas propiedades puede afectar el resultado obtenido. Se propone para trabajos futuros realizar estudios con diferentes tipos de suelo utilizando antenas con diferente ancho de banda y de esta manera identificar las condiciones que pueden aumentar las posibilidades de detección según el tipo de suelo.

Palabras clave: antena fractal, detección de minas, minas antipersonal, radar de penetración terrestre.

ABSTRACT

As a consequence of the armed conflict in Colombia, a large part of the national territory is affected by the presence of Antipersonnel Mines (MAP). In our country, MAPs are manufactured mainly with unconventional materials such as plastic bottles, which makes their detection difficult. This research proposes the design and simulation of a fractal antenna to be used in the detection of mines in plastic containers, through the analysis of the physical phenomenon of the reflection of an electromagnetic signal, the same principle used in ground penetrating radar technology. (GPR). To fulfill this objective, a methodology was carried out in stages which began with an investigation of: the main types of mines used in our country, the state of the art in detection techniques for unconventional mines and improvised explosive devices, an analysis of the properties of fractals and their applications in antennas, as well as the equations and calculations related to the transmission media. After the research part, the antenna was designed and simulations were carried out, obtaining an antenna with an S11 parameter of 32.29 dB and a standing wave ratio (SWR) of level 1.049. Subsequently, the characterization of the two media was carried out, taking as a reference the electrical properties of the soil in a region of the country affected by the presence of MAP, their circuit models were built in distributed parameters, and thus simulating the physical phenomenon. In the last stage, the results obtained were analyzed and it is evident that the designed antenna manages to generate a signal that, when reflected in the plastic mine, has enough power to be captured by a radar system, in this way it can be inferred that the Fractal antenna can be used in the detection of mines, however it is identified that the properties of the soil play a fundamental role in the process and the variation of these properties can affect the result obtained. It is proposed for future work to carry out studies with different types of soil using antennas with different bandwidth and in this way to identify the conditions that can increase the detection possibilities according to the type of soil.

Keywords: *fractal antenna, mine detection, antipersonnel mines, ground penetrating radar.*

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	3
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	8
INTRODUCCIÓN.....	9
CAPÍTULO 1. FORMULACIÓN DEL PROYECTO	11
1.1 Descripción del problema	11
1.2 Pregunta de investigación.....	12
1.3 Antecedentes de la aplicación de antenas en la detección de minas.....	12
1.3.1 Contexto Internacional.....	13
1.3.2 Contexto Nacional	14
1.4 Objetivos	15
1.4.1 Objetivo General.....	15
1.4.2 Objetivos Específicos	15
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 Minas Antipersonal	16
2.1.1 Tipos de minas antipersonal usadas en Colombia.....	16
2.1.2 Características de las minas en envase plástico.....	19
2.1.3 Detección de minas antipersonal no convencionales.....	20
2.2 Radar de penetración terrestre	21
2.2.1 Componentes de un sistema de GPR.....	22
2.2.2 Ecuaciones de un sistema de GPR	23
2.2.3 Procesamiento de datos en un sistema de GPR.....	24
2.3 Fractales.....	25
2.3.1 Antenas Fractales.....	27
2.3.2 Modelos fractales convencionales utilizados en antenas	28
2.3.3 Modelos fractales no convencionales para antenas.....	30
2.3.4 Relación de los fractales no convencionales y la teoría del caos	32
2.4 Caracterización de los medios	33
2.4.1 Propagación en el espacio libre	34
2.4.2 Propagación a través del suelo.....	37
2.5 Ecuaciones de los parámetros de la antena	39
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	42
3.1 Primera Etapa: Investigación del estado del arte	42
3.2 Segunda Etapa: Diseño de la antena Fractal.....	43
3.2.1 Selección del modelo fractal.....	44

3.2.2	Diseño de la antena fractal	45
3.2.3	Simulación y análisis de la antena propuesta	47
3.3	Tercera Etapa: Caracterización y modelamiento del fenómeno físico	49
3.3.1	Caracterización y modelamiento de la fuente	51
3.3.2	Caracterización del medio (aire)	51
3.3.3	Caracterización del medio (Suelo)	54
3.3.4	Caracterización de la mina de envase plástico (carga)	60
3.3.5	Modelamiento y Simulación del circuito Equivalente	61
3.3.6	Análisis del fenómeno de reflexión	64
3.4	Cuarta Etapa: Documentación de resultados	72
3.4.1	Documentos Entregables	73
CAPÍTULO 4. RESULTADOS		74
4.1	Resultados obtenidos para la primera hipótesis	74
4.4.1	Análisis de resultados para la hipótesis 1	76
4.2	Resultados obtenidos para la segunda Hipótesis	76
4.2.1	Análisis de resultados para la hipótesis 2	76
4.3	Resultados obtenidos para la tercera hipótesis	77
4.3.1	Análisis de resultados para la hipótesis 3	78
Conclusiones		79
Recomendaciones y trabajos futuros		80
REFERENCIAS		81
ANEXO 1: HERRAMIENTAS Y SOFTWARE UTILIZADOS PARA EL DISEÑO, CALCULO Y SIMULACIÓN DE LA ANTENA FRACTAL		84
ANEXO 2: PROTOCOLO DE SIMULACIONES PARA EL ANÁLISIS DEL FENÓMENO FÍSICO		87
ANEXO 3: CONSTANCIA DEL INICIO DEL PROCESO PARA LA PUBLICACIÓN DEL ARTICULO		91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Minas de fabricación artesanal encontradas en Colombia	17
Figura 2: Ilustración de una mina en envase plástico.....	19
Figura 3: Equipo de georradar	22
Figura 4: Ejemplos de geometrías fractales: a) la curva de Koch, b) el triángulo de Sierpinski.....	26
Figura 5: Antena Fractal de rueda triangular.....	31
Figura 6: Antena Logarítmica Periódica Fractal	32
Figura 7: Antena SWB con elementos semicirculares.....	32
Figura 8: Medios de transmisión	33
Figura 9: Ley de Snell	35
Figura 10: Impedancia en una antena Microstrip	40
Figura 11: Metodología utilizada	42
Figura 12: Dimensiones de la antena propuesta.....	46
Figura 13: Antena construida para simulación	47
Figura 14: Parámetro s_{11}	48
Figura 15: Relación Onda estacionaria VSWR.....	48
Figura 16: Diagrama de radiación de la Antena fractal.....	49
Figura 17: Escenario para la simulación	50
Figura 18: Circuito equivalente primer medio.....	53
Figura 19: Circuitos equivalentes para el segundo medio	59
Figura 20: Reflexión al pasar al segundo medio	59
Figura 21: Reflexión en la carga	60
Figura 22: Circuito equivalente para simulación.....	61
Figura 23: Potencia medida en la carga del circuito 1	62
Figura 24: Potencia medida en la carga del circuito 2.....	62
Figura 25: Circuito de retorno	63
Figura 26: Potencia medida en la carga del circuito de retorno 1	63
Figura 27: Potencia medida en la carga del circuito de retorno 2.....	64
Figura 28: Reflexiones que ocurren con la señal transmitida	65
Figura 29: Onda incidente y reflejada en el segundo medio.....	68
Figura 30: Onda incidente y reflejada en la mina	69
Figura 31: Onda incidente y reflejada en el retorno al primer medio	69
Figura 32: Señal que recibe la antena, simulación 1	70
Figura 33: Onda incidente y reflejada en el segundo medio, simulación 2	70
Figura 34: Onda incidente y reflejada en la mina, simulación 2.....	71
Figura 35: Onda incidente y reflejada en el retorno, simulación 2	71
Figura 36: Señal que recibe la antena, simulación 2.....	72
Figura 37: Potencia recibida en la mina, circuito 1	75
Figura 38: Potencia recibida en la mina, circuito 2	75
Figura 39: Señal recibida en la antena para ambas simulaciones.....	77
Figura 40: Ejemplos de antenas en CST.....	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades plástico PET	20
Tabla 2: Frecuencias de resonancia.....	46
Tabla 3: Valores de la fuente.....	51
Tabla 4: Propiedades eléctricas del Aire	51
Tabla 5: Valores para el circuito 1	53
Tabla 6: Propiedades del suelo para la zona propuesta	54
Tabla 7: Valores propiedades eléctricas.....	56
Tabla 8: Valores para el circuito 2	58
Tabla 9: Resultados simulación circuito 1.....	74
Tabla 10: Resultados simulación circuito 2.....	75

INTRODUCCIÓN

Las Fuerzas Militares de Colombia han identificado que más del noventa por ciento de minas antipersonal se hacen utilizando materiales de uso común y explosivos caseros [1]. Los métodos convencionales de detección como el detector de metales resultan ineficaces para este tipo de minas, por este motivo se hace necesario seguir investigando nuevos métodos y tecnologías para la detección de minas y artefactos explosivos de fabricación artesanal. En este proyecto se propone el uso de una antena fractal la cual por medio del análisis del fenómeno físico de la reflexión utilizado en la tecnología de GPR, servirá como alternativa para utilizar en la detección de minas artesanales de envase plástico.

Un fractal se puede definir como un objeto semigeométrico caracterizado por una estructura que se repite a diferentes escalas [2]. La ciencia que estudia dichos elementos complejos e irregulares a través de algoritmos geométricos y matemáticos es la Geometría Fractal [3]. Esta geometría ha tenido impacto en diferentes áreas de la ciencia incluida la medicina, la física, y las telecomunicaciones [4], como es el caso del diseño de antenas que es de particular interés en este proyecto.

Algunos de los modelos fractales usados actualmente son: las curvas de Koch, los triángulos de Sierpinski, árboles fractales, entre otras, que aprovechan su capacidad natural multibanda, para minimizar el área de la antena [4]. Figueroa en su investigación [5] propone una antena fractal basada en el triángulo de Sierpinski, para obtener una antena de banda super ancha, que opere en el intervalo de frecuencias de 1.7 GHz a 26 GHz. Castro [2] presenta el diseño de antenas basadas en la curva de Koch, operando en el rango de 470 MHz a 700 MHz, para ser utilizadas en el servicio de televisión digital. Oltra en su tesis [6] realiza el diseño y construcción de una antena fractal multibanda basado en la curva de Hilbert, para ser utilizada en los servicios de telefonía móvil celular.

Algunas aplicaciones de antenas en sistemas de detección de minas antipersonal en el contexto internacional, es en sistemas de GPR operando en el rango de las microondas. En la investigación realizada por [7], se utilizaron dos antenas tipo Bowtie de 1.2 GHz y 1.5 GHz respectivamente, las antenas son utilizadas como los transductores de un sistema GPR y están basadas en las características geométricas de las antenas GPR comerciales. En el proyecto de [8] se investiga la capacidad de detección de las dos antenas de Microstrip paralelas con tierra corrugada entre los elementos y se estudia el efecto de las propiedades eléctricas del suelo en la capacidad de detección. En el artículo de [9], se propone un enfoque para filtrar la reflexión de la superficie del suelo y los principales efectos de la antena como son: las reflexiones internas de la antena

y las múltiples reflexiones entre la antena y el suelo. Esto con el propósito de mejorar la detección de minas antipersonal utilizando un sistema de radar.

En el contexto nacional se encuentra el proyecto realizado por Mendoza y Serrano [10], donde se desarrolla en una plataforma de SDR (software defined radio), un prototipo de sistema con funcionalidad de GPR para la detección de minas antipersona. Para realizar las pruebas del sistema utilizaron dos antenas dipolo VERT 900 y dos antenas Vivaldi antipodal (antenas directivas). La investigación realizada por Baer et al. [11], es una contribución al desminado humanitario en Colombia, en el cual realizan mediciones de laboratorio con un dispositivo de GPR, para el cual se construyó una antena Vivaldi de doble polarización, con una ganancia máxima de 9 dBi, que opera en un rango de frecuencia de 0.8 a 5 GHz.

La investigación del estado del arte, permitió evidenciar una amplia variedad de investigaciones de antenas aplicadas a la detección de MAP, utilizando diferentes tipos de antenas y métodos, esto refleja la importancia que tiene este tipo de investigaciones para la sociedad. Sin embargo, no se identificó el uso de las antenas fractales para este propósito, lo cual representa una oportunidad de investigación con este tipo de antenas que se caracterizan por tener un factor de calidad Q pequeños y anchos de banda grandes [12]. De igual manera se pretende aprovechar el comportamiento multibanda de este tipo de antena, lo que permitirá realizar pruebas con múltiples frecuencias y de esta manera aumentar las posibilidades de lograr una detección. Por estos motivos se propone el uso de la antena fractal para el proyecto y se espera lograr una contribución a los procesos de desminado humanitario desde el área de la Ingeniería electrónica y las Telecomunicaciones.

El documento de este proyecto de grado se divide en cuatro capítulos, en el Capítulo 1 se presenta el planteamiento del problema, las preguntas de investigación, los antecedentes y la formulación de los objetivos. En el Capítulo 2 se presenta un marco teórico con la investigación realizada para minas antipersonal, métodos de detección, fractales y la propagación de una onda en diferentes medios. En el Capítulo 3 se presenta la metodología por etapas aplicada en el desarrollo del proyecto, que incluye el diseño de la antena y la caracterización de los medios. En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos y el análisis de las simulaciones realizadas. Finalmente, se tienen las conclusiones del Trabajo de grado y recomendaciones referentes a estudios posteriores.

CAPÍTULO 1. FORMULACIÓN DEL PROYECTO

1.1 Descripción del problema

En la actualidad la contaminación por Minas Antipersona (MAP) y las Municiones Abandonadas sin Explotar (MUSE), todavía afecta a 56 países y cuatro unidades políticas (territorios que no son reconocidos internacionalmente como independientes), y otros diez países adicionales tienen sospecha de contaminación [13]. Desde hace varios años organismos internacionales y Organizaciones no gubernamentales (ONG) han estado trabajando para prevenir el aumento de las víctimas, tratando de detener el uso de estas armas y también atender las necesidades de los afectados.

En Colombia, la fabricación y utilización MAP, MUSE y los Artefactos Explosivos Improvisados (AEI), son parte de la estrategia de los grupos al margen de la ley para contener la ofensiva militar. Luego de décadas de conflicto armado, se estima que aún hay alrededor 46 kilómetros cuadrados de contaminación por minas antipersonal a lo largo del territorio nacional y es en gran medida minas de fabricación artesanal [13]. El uso indiscriminado de esta estrategia de guerra, ha dejado en nuestro país 11.935 víctimas por MAP y MUSE, que incluyen no sólo de los actores del conflicto, sino también civiles inocentes tanto adultos como niños, según las estadísticas presentadas por el gobierno nacional en [14].

En los últimos años, se han implementado varios métodos para la detección de minas antipersonal, incluyendo la implementación de tecnologías como son: sensores electromagnéticos, los rayos X, cámaras infrarrojas, señales acústicas, etc... Actualmente en nuestro país se emplea técnicas de desminado manual como la detección de metales y medios mecánicos con equipos barreminas (tripulados o a control remoto) y el olfato de perros adiestrados para localizar las minas [14]. Sin embargo, la detección no es una tarea fácil, especialmente porque el desarrollo de minas artesanales que involucra distintos tipos de materiales, puede hacer que un método determinado no funcione, como es el caso de Colombia donde las minas antipersonal y los artefactos explosivos son elaboradas con materiales no convencionales y fácil adquisición, como son las botellas de plástico, envases de vidrio y tubos de cloruro de polivinilo (PVC).

Para ayudar a encontrar una solución a este reto, una de las soluciones propuestas por la literatura [14, 15], es el uso de la detección a través del GPR (Ground Penetrating Radar), un método con el que es posible identificar objetos no metálicos bajo tierra, aumentando así las probabilidades de detección de minas. El principio físico detrás de esta técnica es la extracción de información a

través de la comparación de las ondas de radio que penetran en la tierra y las reflejada por la mina [15].

1.2 Pregunta de investigación

El presente proyecto se enfoca en el diseño y simulación de una antena basada en un modelo fractal para ser utilizada en un GPR, con el fin de aportar a la solución del problema de detección de las minas antipersonal no convencionales que son fabricadas con envase de material plástico. La pregunta de investigación que aborda este proyecto es:

- ¿Es posible utilizar una antena con un modelo fractal para realizar la detección de minas antipersonal de envase plástico, teniendo en cuenta los parámetros de la profundidad, los medios de propagación y el tipo de material de la mina?

Para dar respuesta al problema se plantean las siguientes hipótesis:

- La característica multibanda de las antenas fractales aumentara la posibilidad de detectar la mina de envase plástico.
- La frecuencia de operación más adecuada para utilizar la antena fractal en la detección de minas antipersonal es el rango de las microondas.
- Variar el ángulo de la antena fractal permitirá obtener un mayor o menor porcentaje de la señal reflejada por la mina.

1.3 Antecedentes de la aplicación de antenas en la detección de minas

En esta sección se identifican algunos de los principales escenarios donde se han utilizado antenas como parte de un sistema para realizar la detección de minas antipersonal, presentando sus casos de aplicación en Colombia y en el contexto internacional.

1.3.1 Contexto Internacional

En general se puede identificar para el contexto internacional varias aplicaciones de antenas en sistemas de detección de minas antipersonal, siendo su aplicación más común como sistemas radiantes de GPR. A continuación, se presentan algunos ejemplos de la aplicación en distintos proyectos relacionados a la detección de minas, destacando su metodología, el tipo de antena y resultados:

- En el proyecto de investigación [7], los autores proponen un modelamiento numérico realista para identificar como las características del suelo pueden influir en el rendimiento general del GPR, apoyándose con software especializado para la resolución de ecuación y la simulación de la antenas. El tipo de antena propuesto para la investigación es la antena tipo Bowtie, utilizan dos de estas antenas como los transductores de un sistema GPR y operan a las frecuencias de 1.2 GHz y 1.5 GHz. El modelo numérico de GPR realizado logro dar resultados consistentes a la experiencia real de usar un GPR en campo.
- Los investigadores del artículo [8] hacen uso de la técnica de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) para simular el efecto de las propiedades del suelo en la detección de minas terrestres. Utilizan dos antenas de Microstrip con una frecuencia de resonancia de 790MHz, uno de los parches funciona como la antena transmisora, mientras que el otro parche se considera como la antena receptora, las antenas son ubicadas a una altura de 2.8cm de la superficie del suelo. Con el método propuesto se lograron simular la detección de la mina en diferentes tipos de suelo y profundidades.
- En la investigación de [9], se aplica y valida un nuevo enfoque de filtrado para mejorar la detección de minas antipersonal utilizando GPR en diferentes condiciones. La metodología propuesta por los autores utiliza un modelo de antena de radar subsuperficial recientemente desarrollado junto con la migración de cambio de fase. Este modelo permite la eliminación precisa de los efectos de la antena, la reflexión de la superficie del suelo, resultando en una mejor SNR sin perder información sobre la amplitud y la forma de la respuesta a las minas terrestres. y el suelo.
- En el prototipo de GPR desarrollado por [17], se utiliza un radar de banda ultra ancha, empleado antenas de hélice con polarización circular. El prototipo está montado a bordo de un vehículo aéreo no tripulado y las medidas realizadas se transmiten inalámbricamente a un equipo de control y procesado. El método propuesto demostró su capacidad para detectar objetos tano metálicos como aquellos de envase plástico.

1.3.2 Contexto Nacional

En Colombia podemos identificar varios proyectos realizados por las distintas universidades en todo el país que, con el apoyo del gobierno nacional, las fuerzas militares y la contribución de instituciones e investigadores extranjeros, han estado contribuyendo en los procesos de desminado humanitario. Algunos de los proyectos que involucran la construcción o la implementación de antenas como parte del sistema de detección son:

- La plataforma de SDR (software defined radio) realizado por Mendoza y Serrano [10], consisten en un sistema prototipo con funcionalidad GPR de bajo costo para la detección de minas antipersonas enterradas una profundidad no mayor a 15 cm. El sistema utiliza dos pares de antenas vivaldi para realizar la detección de minas en los diferentes escenarios de pruebas propuestos por los autores, aunque el sistema logro realizar la detección, este presento dificultades con las minas que tienen poco contenido metálico.
- Una investigación para la detección de artefactos explosivos improvisados en Colombia es realizada en el proyecto de Baer et al. [11], las mediciones de prueba utilizaron un radar de secuencia M, una antena Vivald adular polarizada, así como un nuevo enfoque de imágenes de radar de apertura sintética penetrante en el suelo (GPSAR). La antena opera en un rango de frecuencia de 0.8 a 5 GHz y se ubicó a 23 cm por encima de la superficie del suelo.
- En el documento de [15], se realiza un análisis de los distintos métodos de detección para minas y artefactos explosivos, el autor argumenta sobre los métodos más adecuados para implementar en el departamento de Antioquia. Uno de los métodos propuestos es el sistema de radar de penetración terrestre, donde por medio una o más antenas trabajando en la banda de las microondas, se puede realizar la detección.

El presente proyecto se va a enfocar en la detección de las minas no convencionales de envase plástico y será una contribución en la solución a un problema que por años ha afectado al pueblo colombiano.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar y simular una antena fractal que se pueda utilizar para detectar minas antipersonales de envase plástico.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Investigar el estado del arte de: las tecnologías utilizadas para la de detección de MAP y AEI, la geometría fractal, los modelos fractales usados en el diseño de antenas, la transmisión y propagación de señales a través de medios materiales, para determinar las especificaciones técnicas que debe tener la antena fractal.
- Diseñar una antena fractal con base a las especificaciones técnicas determinadas en el primer objetivo.
- Caracterizar y modelar los dos medios de transmisión (espacio libre y suelo) para analizar la propagación de las ondas electromagnéticas.
- Simular por medio de software especializado, el fenómeno físico y evaluar los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este marco teórico se incluye la información acerca de los principales tipos de minas antipersonal, se describen los métodos y las tecnologías que se utilizan actualmente en el proceso de detección. También se incluye la información sobre los fractales, sus propiedades, las antenas desarrolladas a partir del uso de los mismos y sus aplicaciones; además se incluye la información acerca de la caracterización de los medios de transmisión, así como las herramientas y software que se van a utilizar durante el desarrollo del proyecto.

2.1 Minas Antipersonal

“Las minas antipersonales son artefactos explosivos diseñados para herir, mutilar o matar personas” [1]. Normalmente se ubican debajo de la tierra, y se activan con la proximidad o contacto de una persona o animal. Una mina se constituye básicamente de un sistema de iniciación, un cuerpo y de un explosivo o carga [18]. Las MAP se pueden clasificar en dos categorías según su efecto:

- Minas explosivas: normalmente se ubican a poca profundidad y su mecanismo de activación es por presión, su propósito herir o matar a la persona que la active [16].
- Minas de fragmentación: pueden ubicarse a ras del suelo o también enterradas y su mecanismo de activación es con trampa eléctrica o por tracción. Se caracterizan por proyectan múltiples fragmentos de metal (metralla) sobre un área de varios metros al ser activadas, tienen como objetivo herir a varias personas de forma simultánea [16].

Independientemente de su categoría, las minas antipersonal suelen ser enterradas en profundidades entre 0 y 25 centímetros, pero pueden tener profundidades mayores a los 25 cm en suelo arenoso [19].

2.1.1 Tipos de minas antipersonal usadas en Colombia

Existen varios tipos de minas antipersonal, “desde el artefacto más rudimentario, a veces de fabricación artesanal, hasta el modelo más complejo con dispositivos electrónicos de temporización, de montaje y de encendido” [18], como se puede evidenciar en la figura 1.



Figura 1: Minas de fabricación artesanal encontradas en Colombia

Los tipos de MAP y AEI utilizados en nuestro país pueden su mecanismo de activación, la profundidad a la cual son enterrados y la composición del explosivo, de acuerdo con la región donde son colocadas [14]. Los tipos de minas que se han encontrado en nuestro país son:

- Mina ‘quiebrapatras’

Este tipo de mina se activa al ser pisada, la explosión generada puede causar lesiones van desde quemaduras, la amputación de miembros o incluso causar la muerte, es la mina más usada en Colombia. Las ‘quiebrapatras’ son de fabricación casera, su explosivo se compone generalmente por dinamita combinada con nitrato de amonio. El mecanismo de activación utiliza normalmente una pila o batería de 1.5 voltios y un detonador eléctrico [1].

- Mina tipo sombrero chino

Esta mina recibe su nombre debido a la forma particular que tiene, muy similar a un sombrero chino, es fabricada con trozos de metal lo cual facilita su ubicación por medios convencionales como el detector de metales. La explosión de esta mina tiene un alcance efectivo de 25m por lo cual es utilizada para preparar emboscadas a las tropas militares. El explosivo utilizado en la carga es dinamita o explosivo en estado seco R-1 [1].

- Mina tipo cajón

Está elaborada con una caja de madera, en cuyo interior ubican una lámina metálica en ángulo que permite la acumulación de gases. Las láminas de metal son pegadas con brea a la plancha superior. Generalmente la carga principal, que se acciona por medio de sistema eléctrico, está compuesta por dinamita o explosivo casero R-1. Este tipo de mina terrestre es sembrado en los taludes de las carreteras y se utiliza contra los vehículos que transportan a las tropas Regulares [1].

- Mina tipo abanico

A diferencia de otras minas el tipo abanico no se entierra en el suelo, por el contrario, se ubica varios centímetros por encima del suelo en los barrancos de trochas y caminos que pueden ser transitados por las persona u objetivos a los cuales se busca afectar. Se caracteriza por su forma cónica, la cual le permite dirigir la acumulación de gases y trozos de metal hacia el sitio donde se espera este el objetivo. “Los materiales para su fabricación son lámina galvanizada, explosivo casero, ácido muriático, parafina, soldadura de estaño, brea y fragmentos de metal” [1].

- Mina cumbo

Elaborada en recipientes metálicos medianos y con tubos y tapones de PVC. Contiene fragmentos de metal, que son adheridos con brea y parafina a la carga principal de explosivo R-1. Usualmente se ubica en las ramas de árboles, esta provista con un cordón detonante y su sistema de activación es por presión o tensión [18].

- Mina tipo Claymore (artesanal)

Es una mina antipersonal de fragmentación omnidireccional, una imitación de la mina usada por las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos Claymore. Esta mina no es enterrada, sino que se ubica sobre el suelo. Utiliza explosivo R2 para la carga y al explotar proyecta un conjunto denso de fragmentos en una dirección determinada, que puede incluir clavos, tornillos, vidrio, etc. [1].

- Mina tipo costal

Consiste en una bola de brea con pedazos de metal que se envuelve en un costal. Este tipo de minas es de forma redonda y sus características físicas permiten que sea confundida con piedras; por tanto, es fácilmente camuflada; puede ser utilizado como misil, lanzado desde partes altas, mina anti-vehículo o mina antipersonal. Se activa con un sistema eléctrico [18].

En general para las minas antipersonal usadas en Colombia se identifica que el tipo de explosivo usado para la carga puede variar en su composición, siendo los elementos más comunes: aserrín, aluminio en polvo y nitrato de amonio [1]. Pero también se pueden mezclar con compuestos químicos más comúnmente usados en otros explosivos como: El clorato de Potasio, TNT, Amatol, Pentolita, entre otros [18].

2.1.2 Características de las minas en envase plástico

Uno de los materiales que es utilizado en la fabricación de minas antipersonales artesanales son los envases de plástico comúnmente usados en bebidas gaseosas, como se muestra en la figura 2. Las minas fabricadas con estos envases se pueden clasificar según su mecanismo de activación como:

- La mina de tipo químico por presión, que se activa al pisar la jeringa en la parte superior del artefacto, la cual libera un ácido que produce la reacción química con el explosivo en el detonador [14].
- La mina de tipo eléctrico por movimiento, que se activa con un leve movimiento en el artefacto o al ejercer presión sobre el mismo, funciona mediante un circuito eléctrico alimentado por una batería de 9V [14].



Figura 2: Ilustración de una mina en envase plástico

Fuente: <http://minas.semana.com/abc.php>

El material plástico en el cual se fabrican estos envases es el polietileno tereftalato (PET, PETE). “Es un polímero plástico, lineal, con alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento, es extremadamente duro, resistente al desgaste, resistente a los químicos y tiene buenas propiedades dieléctricas” [20]. Las principales características del material PET, se pueden evidenciar en la tabla 1.

Tabla 1: Propiedades plástico PET

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm ³	1.34 – 1.39
Resistencia a la tensión	MPa	59 – 72
Resistencia a la compresión	MPa	76 – 128
Resistencia al impacto, Izod	J/mm	0.01 – 0.04
Resistencia al calor	°C	80 – 120
Constante dieléctrica (60 Hz)	--	3.65
Absorción de agua (24 h)	%	0.02
Temperatura de fusión	°C	244 - 254
Indicé de refracción	--	1.58

2.1.3 Detección de minas antipersonal no convencionales

- Radar de penetración terrestre (GPR)

Es una de las técnicas más utilizadas hoy en día para la detección de minas, también conocido como georadar esta técnica utiliza la radiación electromagnética de muy corta duración en la banda de frecuencia de las microondas, para emitir ondas de radio que penetran en la tierra [15]. El método aprovecha el principio de reflexión de las ondas electromagnéticas que se propagan en el medio, donde se generan ondas reflejadas debido a cambios en los parámetros electromagnéticos del terreno: conductividad, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética.

El resultado de esta técnica consiste en la generación de una imagen del subsuelo, con una alta resolución para localizar y detectar elementos enterrados u objetos extraños en el subsuelo, puede identificar objetos no metálicos bajo tierra, aumentando así las probabilidades de detección de minas [16].

- Métodos Infrarrojos

Esta técnica cuenta con sensores que responden a las radiaciones electromagnéticas del rango de longitud de onda del espectro infrarrojo y proporciona una distribución térmica. Las minas antipersonal enterradas tienden a generar radiación térmica con una densidad diferente a la expulsada por el suelo que las rodea, este tipo de detección espectral examina la diferencia evidente de la temperatura o el material de la cubierta con respecto a la tierra [18].

La medición por medio de radiación infrarroja se puede aplicar a distancia y abarcar grandes áreas; sin embargo, este método ha presentado un bajo rendimiento en la detección de minas antipersona debido a las numerosas condiciones ambientales que se deben cumplir para llevar a cabo una detección eficaz [15].

- Animales entrenados para la detección

Este método consiste en el uso de animales entrenados como los perros, ratas e incluso insectos como las abejas, para detectar los vapores que son desprendidos por los explosivos de las minas.

Por ejemplo, los perros cuentan con un sentido del olfato tan sumamente desarrollado que puede llegar a detectar una gran variedad de sustancias con un debido adiestramiento, motivo por el cual se entrenan para olfatear los vapores de determinados explosivos [16]. También se ha determinado que las ratas son aptas para captar los olores que desprenden las minas. Además las ratas poseen algunas ventajas con respecto a los perros como: tienen un menor peso lo que representa menor probabilidad de activar una mina, son animales más pequeñas lo que facilita su transporte a la zona minada [15].

- Otros métodos para la detección

Existen otros métodos que se pueden aplicar para la detección de minas antipersonal como es el uso de sistemas acústico-sísmicos que trabajan con ondas sonoras a baja frecuencia, más información de este método puede ser consultada en [15]. Otra alternativa es la detección biológica por medio del uso de plantas y bacterias modificadas genéticamente, para profundizar en estos métodos se recomienda consultar [21].

2.2 Radar de penetración terrestre

Un GPR o georradar es un sistema de detección diseñado para que el medio por el que se propaga la energía sea el subsuelo o cualquier otro medio material. La prospección con un georradar consiste en la emisión y propagación de las ondas electromagnéticas a través de un medio dado y la posterior recepción de las señales reflejadas por las discontinuidades del medio [22]. El método es similar a la sísmica de reflexión de pequeño ángulo, diferenciándose en el rango de frecuencias utilizadas. Las ondas de un georradar normalmente se encuentran entre los 10 MHz y 1 GHz [22]. Sin embargo, aunque el uso de frecuencias bajas permite alcanzar una mayor profundidad, también se obtiene menor resolución por parte del GPR, mientras que con las frecuencias más altas se logra menor profundidad pero mejor resolución [23]. Es por este motivo que algunos

investigadores deciden trabajar en rangos de frecuencia más altos, por ejemplo [24] utiliza antenas que operan entre 500 MHz y 3 GHz, mientras que [23] utiliza un GPR que opera entre 800 MHz y 4 GHz.

La aplicación de GPR en sedimentos se está expandiendo rápidamente porque GPR proporciona imágenes de alta resolución del subsuelo poco profundo que no se pueden obtener por ningún otro método no destructivo. Esto permite que el GPR sea utilizado en diversas aplicaciones ambientales y de campo de ingeniería como, por ejemplo: la detección de tuberías, estudios geotécnicos, investigación de glaciares, detección de contaminación por hidrocarburos y detección de minas antipersonal [25].

2.2.1 Componentes de un sistema de GPR

Un equipo básico de georradar se compone de una unidad central, una serie de antenas conectadas a la unidad central y un sistema de grabación o de impresión de datos, como se muestra en la figura 3. La unidad de control suele ir conectada a un monitor para visualizar la señal adquirida, en algunos equipos más modernos es posible realizar el tratamiento de las señales durante la adquisición de datos para mejorar la calidad de la imagen. [22]



Figura 3: Equipo de georradar

Fuente: www.sensoft.ca

Las antenas son parte fundamental del equipo de georradar, normalmente se conectan a la unidad de control mediante cableado metálico u óptico. Se encargan de transformar los impulsos eléctricos que se reciben de la unidad central, en una serie de pulsos u ondas electromagnéticas que se transmite al medio, además de recibir la energía que regresa a la superficie tras ocurrir una reflexión. Para los estudios de georradar las antenas se pueden clasificar

en monoestaticas y biestaticas: la primera es cuando la antena es emisora y receptora a la vez, la segunda cuando se utiliza por separado una antena emisora y otra receptora.

2.2.2 Ecuaciones de un sistema de GPR

En todo sistema de georradar existen se consideran dos ecuaciones que analizan el balance energético del sistema:

La ecuación de transmisión relaciona la potencia radiada por la antena emisora y la recibida por la antena receptora. Es una relación que determina en gran medida la señal mínima detectable que se tiene en la antena receptora. [22]

$$\frac{P_r}{P_t} = D_t D_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (2.1)$$

Donde:

P_r es la potencia recibida por la antena receptora

P_t es la potencia emitida

D_t es la directividad de la antena transmisora

D_r es la directividad de la antena receptora

La ecuación del radar relaciona las características de la antena con las propiedades electromagnéticas del medio. Mediante ella es posible obtener los límites máximos de penetración del radar analizando las condiciones de emisión, transmisión, reflexión y recepción de la señal. La potencia recibida por la antena del radar se puede calcular con las ecuaciones 2.2 y 2.3, siendo la primera para una antena monoestatica y la segunda para antenas biestáticas.

$$P_r = \frac{P_t G_t A_{ef} \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (2.2)$$

$$P_r = \frac{P_t G_t A_{ef} \sigma}{(4\pi)^2 R_1^2 R_2^2} \quad (2.3)$$

Donde:

P_r es la potencia recibida por la antena receptora

P_t es la potencia transmitida

G_t es la Ganancia de la antena transmisora

A_{ef} es el área efectiva

σ es la sección transversal del radar

R es la distancia entre la antena y el objetivo (antena monoestatica)

R_1 es la distancia de la antena transmisora al objetivo

R_2 es la distancia del objetivo a la antena receptora

El principal factor que limita la sensibilidad es el ruido electrónico en el receptor (ruido termal), el cual es medido en vatios:

$$P_{term} = 1.6 \times 10^{-20} \Delta f \quad (2.4)$$

Donde:

P_{term} es la potencia del ruido termal

Δf es la anchura de banda del receptor

2.2.3 Procesamiento de datos en un sistema de GPR

Antes de iniciar el procesamiento de datos es necesario realizar estudios previos del terreno que permitan identificar las condiciones del terreno que pueden influir en los registros e introducir ruido en el radargrama. [22]

El Radargrama es el registro que proporciona un GPR, está formado por un número elevado de trazas de amplitud. La energía de las ondas electromagnéticas reflejadas se mide sobre la superficie mediante la antena receptora y la captura de estas señales en tiempos determinados es lo que

se denomina traza. [26] En un radargrama “en el eje horizontal se presentan la distancia sobre la superficie del medio sobre el que se encuentra la antena y en el eje vertical se representan los tiempos dobles de propagación de las ondas reflejadas por las anomalías en el medio” [22].

Los incrementos de amplitud de las trazas son generados debido a la energía proveniente de las reflexiones ocasionadas al propagarse la onda en el medio. En estas ondas se pueden evaluar dos características de importancia: el tiempo que toma a la onda en viajar desde la superficie del suelo hasta que se detecta por los dispositivos receptores, con lo cual se obtiene una medida de la profundidad del reflector y la comparación de la amplitud entre la onda generada y la recibida, que proporciona información de la composición del medio [26].

Una vez que se obtienen los datos de campo es necesario aplicar una técnica de tratamiento de datos con el propósito de reducir el ruido que se presenta en los registros y facilitar la interpretación de los datos. El tratamiento de datos puede incluir la aplicación de filtros frecuenciales, deconvolucion para mejorar la resolución vertical de los radargramas, transformadas de Fourier y de Hilbert, superposición de trazas, entre otras [22].

Para la interpretación de datos se identifican los eventos de interés (discontinuidades) en los radargramas y se consideran los tiempos dobles de propagación de cada radargrama. Luego se convierten estos tiempos en profundidades para lo cual se requiere conocer previamente la velocidad de propagación de la onda en el medio o conocer la permitividad dieléctrica efectiva para poder calcular la velocidad de propagación. La determinación del material u objeto que produce las anomalías (la reflexión) no es un proceso evidente y requiere "además de las velocidades y las permitividades resultantes, el conocimiento previo del problema a estudiar, los datos geológicos, geotécnicos del terreno estudiado" [22].

2.3 Fractales

Un fractal es un objeto semigeométrico cuya estructura básica, fragmentada o irregular, se repite a diferentes escalas (Mandelbrot, 1983). El término fue propuesto por el matemático Benoît Mandelbrot en 1975 y deriva del Latín fractus, que significa quebrado o fracturado.[2]

Un objeto fractal es aquél que posee como características fundamentales las propiedades de:

- Son Generados por Procesos de Iteración: Los fractales son generados en una manera iterativa, conduciendo de este modo a la creación de estructuras autosimilares. La iteración puede describirse como un mecanismo de retroalimentación, que se repite un número n de veces.[3]
- Poseen Autosimilaridad o Autosemejanza: La Autosimilaridad expresa que el objeto estudiado tiene copias reducidas de sí mismo a diferentes escalas, por lo tanto, cada parte del conjunto u objeto contiene la misma información que todo el conjunto.
- Su Dimensión es Fraccionaria o Fractal: en vez de ser unidimensional, bidimensional o tridimensional, la dimensión en la mayoría de los fractales no se ajusta a estos conceptos tradicionales. Su valor raramente puede ser expresado con un número entero.[3]
- Detalle infinito: Los fractales poseen detalle a cualquier escala de visualización, esto es, a medida que aumentamos el orden de iteración tanto más detalle revela este, sin que se tenga un límite en el que se pierda su estructura básica.[2]

La Geometría Fractal, llamada también "Geometría de la Naturaleza", es un conjunto de estructuras irregulares y complejas descritas a través de algoritmos geométricos y matemáticos; los cuales reemplazan a los puntos, rectas, circunferencias y demás figuras provenientes de la matemática tradicional o Euclidiana. Algunos ejemplos de esa geometría fractal se pueden evidenciar en la figura 4.

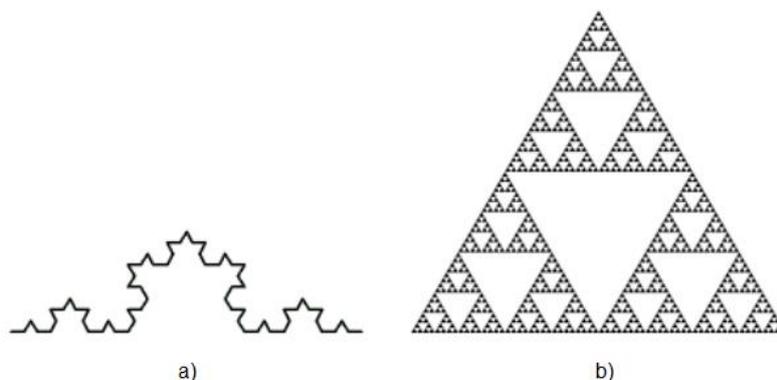


Figura 4: Ejemplos de geometrías fractales: a) la curva de Koch, b) el triángulo de Sierpinski

La Geometría Fractal busca una regularidad en la relación de un objeto y sus partes a diferentes escalas, es decir, estudia aspectos geométricos que son invariantes con el cambio de escala. La Geometría Fractal es la parte de la matemática que estudia la generación, dimensionalidad y aplicación práctica de los objetos o estructuras fractales. La Geometría Fractal revolucionó varias áreas de la ciencia, tales como física, procesamiento digital de señales, compresión de imágenes y teoría de antenas [3].

2.3.1 Antenas Fractales

Dentro de la teoría de antenas, se sabe que para un tamaño fijo de antena se tienen parámetros como impedancia de entrada, patrón de radiación, ganancia que varían significativamente con la frecuencia. El tamaño de la antena va relacionado con la longitud de onda de la banda de trabajo de la antena, es por ello que la mayoría de las antenas solo trabajan en una sola banda [2].

La propiedad de autosimilitud antes mencionada permite crear antenas multibanda, ya que mantienen un mismo comportamiento a diferentes frecuencias. Las antenas multibanda recurren al principio de escalabilidad el cual afirma que, si se tiene una antena que funciona a una cierta frecuencia f y se multiplica sus dimensiones por un factor k , la antena resultante se comportará igual que la original, pero a una frecuencia f/k . Siendo esta la cualidad que motiva a investigar este tipo de antena para su aplicación en detección de minas.

Las primeras antenas fractales diseñadas, fueron arreglos planos y lineales tipo fractales delgados, organizando los elementos en un patrón fractal para reducir el número de elementos en el arreglo y obtener antenas de banda ancha o desempeño en múltiples bandas. Actualmente se está trabajando con curvas y objetos fractales como los triángulos de Sierpinski, árboles fractales, curvas e islas de Koch, entre otras, que minimicen el área de la antena, aprovechando su capacidad natural multibanda.

Las antenas fractales ofrecen varias características especiales, todas ellas basadas principalmente en las propiedades intrínsecas de las estructuras fractales que las conforman.[3] Las principales características de las antenas fractales son:

- Un gran ancho de banda y comportamiento multibanda.
- Mayor Miniaturización de la antena.
- En la mayoría de los casos tienen una ganancia considerable.
- Impedancia de Entrada baja.

En general, se clasifica como antena fractal a cualquier antena individual cuya geometría esté basada en un fractal. Cabe resaltar que es imposible construir un verdadero fractal y en un sentido riguroso se debe hablar de antenas prefrales de “ n ” iteraciones.[27] Debido a que la geometría fractal se deriva de la geometría clásica, esta proporciona a los ingenieros la posibilidad de estudiar configuraciones para el diseño que la geometría euclidiana no permitía.[28]

El diseño de las antenas fractales está orientado principalmente a estudiar y aprovechar dos características importantes de la geometría fractal, la autosimilaridad de sus estructuras y la propiedad de llenar el espacio.[3] Los Fractales permiten diseñar antenas multibanda, ya que con la geometría fractal se obtienen antenas que contienen en un solo objeto, copias de él mismo en diferentes tamaños, lo que permite el mismo comportamiento a diferentes frecuencias. [29]

2.3.2 Modelos fractales convencionales utilizados en antenas

En esta sección se presentan algunas de las estructuras fractales más utilizadas en antenas, las cuales se basan en modelos los fractales clásicos y se mencionan algunas de las principales características que las distinguen.

- **Monopolo y Dipolo de Koch**

La curva fractal de Koch es una de las formas más comunes de fractales que se suele encontrar en el diseño de antenas. es un ejemplo muy efectivo, para ilustrar que los fractales pueden mejorar algunas características de antenas euclidianas comunes. Siendo idealmente una curva con complejidad infinita, su longitud crece $(4/3)^n$ en cada iteración. La curva de Koch es no diferenciable en cualquier punto, lo cual significa que su forma es altamente rugosa y desigual. [3]

El diseño de la curva de Koch se genera partiendo de una línea recta, a la cual se le llama iniciador ($n=0$). La línea recta se divide en tres segmentos con la misma longitud, enseguida el segmento central se reemplaza por dos segmentos que forman un ángulo de apertura, obteniéndose la primera iteración del fractal de Koch ($n=1$), las siguientes iteraciones se logran aplicando el mismo proceso a cada una de las líneas rectas. [5]

La longitud L_n del fractal de Koch para cada iteración n incrementa exponencialmente con respecto a la longitud de la iteración $n=0$, L_0 , esta relación está dada por:

$$L = h \times \left(\frac{4}{3}\right)^n \quad (2.5)$$

Algunas de sus principales características son:

- La impedancia de entrada incrementa su valor con el aumento del número de iteración.
- Con cada iteración adicional, la eficiencia del monopolo fractal disminuye ligeramente.
- La propiedad de autosimilaridad de ciertas estructuras fractales resulta en una conducta multibanda de la antena.
- Es una antena muy efectiva para las técnicas de miniaturización.

El desarrollo de nuevas técnicas de miniaturización de antenas ha permitido el desarrollo de nuevos tipos de antenas como el dipolo de Koch. Consiste en el uso de la curva de Koch para reemplazar los brazos de un dipolo clásico, logrando una reducción en el tamaño de la antena dipolo tradicional. [28]

- **Monopolo y Dipolo de Sierpinski**

El conjunto de Sierpinski, toma su nombre en honor al matemático polaco Waclaw Sierpinski. La estructura original se construye, sustrayendo un triángulo central invertido de una forma triangular principal. Después de la sustracción, tres triángulos semejantes permanecen en la estructura, siendo cada uno la mitad del tamaño del triángulo original. Es decir, son exactamente iguales al triángulo inicial, pero escalados por un factor de dos.[3] Algunas de sus principales características, identificadas son:

- Presenta un comportamiento log-periódico, debido a la geometría de la antena se replica dentro de ella misma escalada por un factor de 2.
 - El patrón de radiación es invariante ante el cambio de la frecuencia de resonancia.
 - El número de frecuencia a las cuales es resonante depende del número de iteraciones.
- **Monopolo y Dipolo de árbol**

Otro tipo de fractal que puede ser utilizado como brazo en una antena dipolo es el árbol, los estudios de este tipo de antena arrojan resultados similares a los del dipolo de Koch.[28] Para la generación de este fractal se aplica una secuencia iterativa a la estructura inicial, comenzando con un monopolo simple. Se toma un extremo y se divide en dos formando un ángulo de 60° y se generan las dos primeras ramas, se repite el proceso iterativo con los extremos de cada rama. [30]

Una variación interesante es el denominado Árbol en 3D, el cual funciona activando interruptores RF con el cual se puede tener un comportamiento multibanda reconfigurable, activando o desactivando ciertas porciones del fractal. [28]

Algunas de sus principales características son:

- La frecuencia de resonancia disminuya a medida que aumenta el número de iteraciones.
- Presenta un comportamiento multibanda reconfigurable.

2.3.3 Modelos fractales no convencionales para antenas

Se han realizado investigaciones con modelos fractales diferentes a los convencionales que permitan aprovechar las características de los fractales para obtener una mayor eficiencia en los procesos de comunicaciones, algunos de los modelos fractales no convencionales, que los investigadores han estudiado en los últimos años son descritos a continuación:

- **Antena Fractal con forma de rueda triangular**

Esta antena fue desarrollada por [31], ha sido diseñada sobre sustrato dieléctrico $\epsilon_r = 4.3$ y espesor $h = 1.53$ mm con un radio $a = 40$ mm. La antena muestra un excelente ancho de banda ultra ancho de 0,86 a 11,49 GHz. El patrón de radiación experimental de la antena se ha observado casi omnidireccional. Este tipo de antena puede ser útil para el sistema UWB, aplicaciones móviles y de radar. En la figura 5 se puede observar una foto de la antena construida.

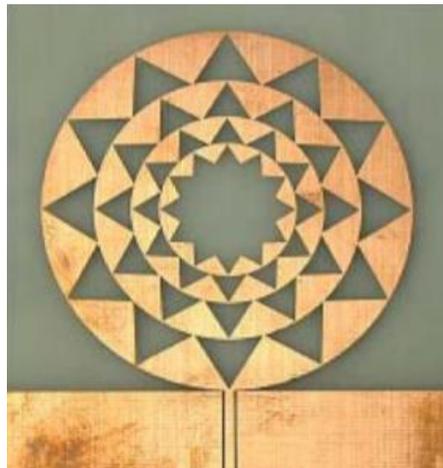


Figura 5: Antena Fractal de rueda triangular [31]

- **Antena Logarítmica Periódica con elementos fractales**

Otra propuesta no convencional es desarrollada por [32], se presenta la geometría fractal cuadrada log periódica para el diseño de una antena de parche miniaturizada para los servicios de banda ultra ancha (UWB) (3.1-10.6 GHz). Se logra un factor de miniaturización del 23% con una ganancia constante y estable en la banda deseada. El patrón de radiación es lateral, que encuentra aplicaciones adecuadas en los radares UWB y las imágenes médicas. En la cara superior del sustrato se encuentran los elementos con geometría cuadrada, en la parte central se encuentra la línea de alimentación, y en la parte posterior el plano de tierra. La alimentación se realiza por medio de un acoplamiento electromagnético o del tipo proximidad. En la figura 6 se puede evidenciar una foto de la antena construida.

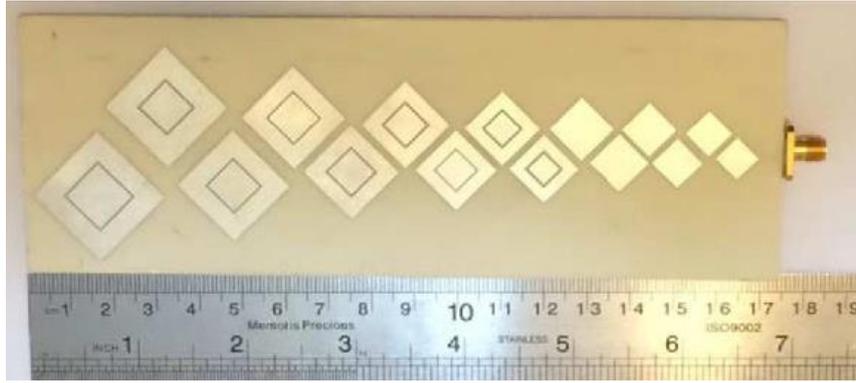


Figura 6: Antena Logarítmica Periódica Fractal [32]

- **Antena SWB con elementos semicirculares**

En su investigación [5] propone una estructura original de antena fractal basada en el triángulo de Sierpinski, para mejorar el acoplamiento de impedancia de la antena, se propone agregar dos elementos semicirculares a los lados de la tercera iteración complementaria. La antena se construyó en un sustrato de bajo costo FR-4 y mostró un comportamiento de súper ancho de banda, con relación de ancho de banda de 15.5:1, en el intervalo de frecuencias de 1.68 GHz a 26 GHz. En la figura 7 se puede observar la antena construida.



Figura 7: Antena SWB con elementos semicirculares [5]

2.3.4 Relación de los fractales no convencionales y la teoría del caos

La Teoría del Caos es el nombre que se le da a la rama de las matemáticas, la física y otras ciencias que estudian ciertos tipos de sistemas dinámicos que son sensibles a las variaciones en las condiciones iniciales.[33] Esta teoría tuvo un punto de quiebre con los descubrimientos de Edward Lorenz, quien al intentar modelar el comportamiento atmosférico por medio de un sistema de ecuaciones, se dio cuenta de que las pequeñas diferencias en el sistema

dinámico, podrían desatar enormes e inesperados resultados. Sin embargo, al analizar el sistema partiendo de múltiples estados iniciales reconoce su naturaleza globalmente estable, es decir, los valores finales de iteración siempre se encuentran en una región del espacio de fases, como si fuera un imán que recogiera todas las trayectorias a una sola región; motivo por el cual denominó atractor. [34]

Un atractor es un conjunto en el que todas sus trayectorias vecinas convergen y un atractor extraño es un atractor que exhibe sensibilidad a la dependencia de las condiciones iniciales. Al hablar de la teoría del caos, los fractales se pueden definir como las figuras que resultan de la evolución de un sistema dinámico caótico y por lo general las curvas solución de los sistemas caóticos que se consideran atractores extraños, muestran una estructura fractal. [33]

2.4 Caracterización de los medios

La caracterización de los medios de transmisión tiene como fin identificar como las características de los dieléctricos pueden afectar la propagación de las señales que van a ser transmitidas y recibidas por un canal de comunicaciones. Para el presente proyecto se van a caracterizar dos medios, el espacio libre y la tierra (ver la figura 8).

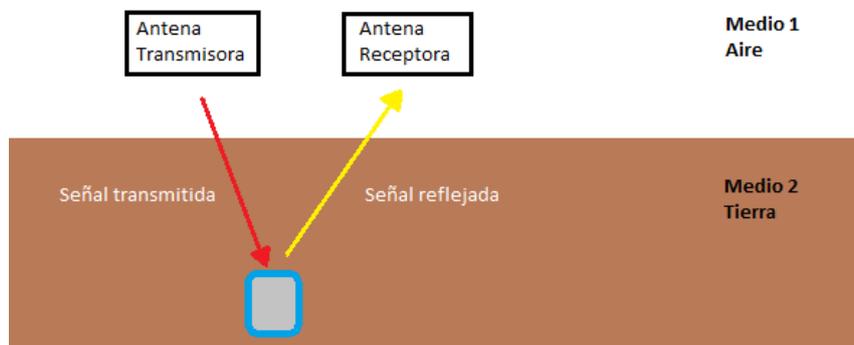


Figura 8: Medios de transmisión

Fuente: *Elaboración propia*

Las principales propiedades eléctricas que afectan la transmisión de una onda a través de un medio son:

- Permeabilidad magnética: Se define como la capacidad que tiene un medio o una sustancia para atraer y hacer pasar a través del mismo los campos magnéticos. [35]

- Conductividad eléctrica: la capacidad la capacidad que posee un cuerpo para permitir o no el paso de la corriente eléctrica a través de él. Su unidad está dada por siemens por metro (S/m). [35]
- Permitividad dieléctrica: La permitividad es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por la presencia de un medio. [35]

Para realizar la caracterización de los medios de transmisión, hay que considerarlos como una línea de transmisión cuyas características están determinadas por sus propiedades eléctricas, y sus propiedades físicas. Estas propiedades, a su vez, determinan las constantes eléctricas primarias: resistencia (R), inductancia (L), capacitancia (C) y conductancia (G). [36]

2.4.1 Propagación en el espacio libre

Las ondas electromagnéticas se propagan mediante una oscilación de campos eléctricos y magnéticos, la propagación de estas ondas por el espacio libre se denomina propagación de radiofrecuencia, la cual generalmente consiste en el movimiento de las ondas desde una antena transmisora a una antena receptora.[37] Las ondas electromagnéticas en el espacio libre pueden viajar a la velocidad de la luz.[38]

Cuando se consideran ondas electromagnéticas en el espacio libre se observa que el medio carece de fuente. En estas condiciones, las ecuaciones de Maxwell se pueden escribir en términos de del campo eléctrico E y el campo magnético H, [39] en la siguiente forma:

$$\nabla \cdot E = 0 \quad \nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad \nabla \times H = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.7)$$

Las ondas de radio se propagan por la atmósfera terrestre con energía transmitida por la fuente y posteriormente se recibe del lado de la antena receptora [38]. El mecanismo de propagación depende directamente de parámetros como: la frecuencia utilizada, la ganancia de las antenas, proximidad de las antenas a tierra y las características eléctricas del medio donde se propaga [37].

Las ondas electromagnéticas se les puede relacionar con propiedades ópticas, por lo tanto están sometidas a una serie de efectos como: refracción, reflexión, difracción e interferencia [38]. A continuación, se describe en qué consisten estos fenómenos:

- Refracción: La velocidad a la que se propaga una onda electromagnética es inversamente proporcional a la densidad del medio en que se propaga. La refracción electromagnética es el cambio de dirección de un rayo conforme pasa oblicuamente de un medio a otro de diferente densidad, con diferentes velocidades de propagación. [37]
- Reflexión: Ocurre cuando una onda incidente choca con una barrera de dos medios y una parte (o incluso toda) la energía incidente no entra al segundo material.[37]
- Difracción: Se define como la modulación o redistribución de energía, este fenómeno ayuda a la propagación de ondas, un frente de onda en un punto conocido se puede considerar como una fuente donde se irradian otras ondas secundarias.[37]
- Interferencia: Ocurre cuando dos o más ondas electromagnéticas se combinan, lo que degrada el funcionamiento del sistema. La interferencia está sujeta al principio de la superposición lineal de las ondas electromagnéticas, que se presenta cuando dos o más ondas ocupan el mismo punto del espacio en forma simultánea [38].

Es importante considerar las pérdidas que va a tener la señal debido a estos fenómenos. La Ley de Snell de la refracción, expresa que cuando una onda incide en la interfase entre dos medios caracterizados por sus índices de refracción η_1 y η_2 (ver figura 9), se puede expresar como $\eta_1 \sin \theta_1 = \eta_2 \sin \theta_2$.[40]

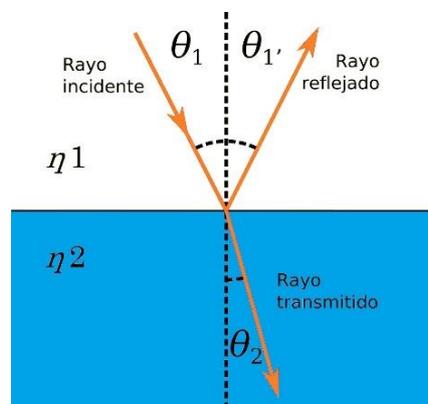


Figura 9: Ley de Snell

El índice de refracción es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio, $n_1 = \sqrt{\epsilon_r}$. Para el caso del primer medio (Aire), tanto su índice de refracción como su permitividad es 1, mientras que en el caso del suelo su índice de refracción y permitividad puede variar según sus propiedades.

Los valores de permitividad para los dos medios permitirán calcular la pérdida en la señal transmitida por medio del coeficiente de reflexión. En las señales de radar el coeficiente de reflexión Γ en la interfaz entre dos materiales no conductores y no magnéticos puede aproximarse con la ecuación propuesta en [41] la cual vamos a denominar ecuación 2.4.

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (2.8)$$

Donde ϵ_1 y ϵ_2 son la permitividad del primer y segundo medio material respectivamente.

La propagación de ondas en el espacio libre implica al vacío [36] y en general para este medio de transmisión podemos modelar como el espacio vacío al considerar que la constante dieléctrica del vacío es 1 y la del aire 1.00006, valores bastante cercanos. Las intensidades del campo eléctrico y magnético de una onda electromagnética en el espacio libre se relacionan a través de la impedancia característica (resistencia) del espacio vacío.

$$Z_s = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (2.9)$$

Z_s = impedancia característica del espacio libre (ohms)

μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío: $4\pi \times 10^{-7} (H/m) = 1.26 \times 10^{-6} (H/m)$

ϵ_0 = Permitividad eléctrica del vacío: $8.85 \times 10^{-12} (F/m) \cong \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} (F/m)$

Reemplazando en la ecuación 2.9 tenemos que la impedancia es:

$$Z_s = \sqrt{\frac{1.26 \times 10^{-6}}{8.85 \times 10^{-12}}} = 120\pi = 377 (\Omega)$$

La pérdida sufrida por una onda electromagnética al propagarse en línea recta por un vacío se suele definir como pérdida en trayectoria por el espacio libre [36]. La ecuación 2.10 define a la pérdida en trayectoria por el espacio libre, sin embargo, para el problema de interés se espera que las pérdidas en la propagación sean bastante pequeñas debido a la poca distancia que hay de la antena al suelo, así mismo podemos desprestigiar las pérdidas causadas por las condiciones ambientales.

$$L_p = 20 \log \left(\frac{4\pi Df}{c} \right) \quad (2.10)$$

L_p = Pérdida en trayectoria por el espacio libre

D = Distancia en Kilómetros

f = Frecuencia en Hertz

c = Velocidad de la luz

2.4.2 Propagación a través del suelo

Las condiciones dieléctricas del terreno pueden afectar considerablemente el rendimiento del proceso de detección. Por condiciones dieléctricas no solo se hace referencia a la conductividad, permitividad y permeabilidad del mismo, sino también la composición y textura del terreno como la porosidad y la homogeneidad. El suelo puede contener varios materiales como el agua, moléculas de aire, arena y rocas, de ahí que la caracterización de este deba considerar todos estos aspectos [10].

Uno de los métodos utilizados en la caracterización de materiales es el de la espectroscopia dieléctrica, también llamada espectroscopia de impedancia. Este método mide las propiedades dieléctricas de un medio como función de la frecuencia, por ejemplo, permitiría determinar la permitividad y la conductividad de un material para un rango de frecuencias. Con esta técnica la impedancia característica de un material se puede modelar como un circuito RC en paralelo, donde la capacitancia y la resistencia están relacionadas a la permitividad y conductividad. [21]

También existen diferentes modelos teóricos, empíricos y semiempíricos que pueden ser aplicados para estimar las propiedades eléctricas de un material. Uno de los modelos más usados en la literatura consultada permite el cálculo de la permitividad dieléctrica del suelo, al considerar variables como la

densidad del suelo, la fracción de partículas de arena, la fracción de partículas de arcilla y el contenido volumétrico de agua. [21] [42] Para lo cual se van a emplear las ecuaciones 2.11, 2.12 y 2.13.

$$\beta' = 1,2748 - 0,519S - 0,152C \quad (2.11)$$

Para frecuencias de 1,4 a 18 GHz

$$\varepsilon' = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\varepsilon_s^{0,65} - 1) + \theta^{\beta'} \varepsilon'_{fw}{}^{0,65} - \theta \right]^{\frac{1}{0,65}} \quad (2.12)$$

Ajustado para frecuencias de 0,3 a 1,3 GHz

$$\varepsilon' = 1,15 \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\varepsilon_s^{0,65} - 1) + \theta^{\beta'} \varepsilon'_{fw}{}^{0,65} - \theta \right]^{\frac{1}{0,65}} - 0,68 \quad (2.13)$$

Donde,

- ρ_b = es la densidad aparente en gramos por centímetro cúbico
- ρ_s = es la densidad específica de las partículas sólidas del suelo, con un valor típico de 2,66 g / cm³
- ε'_{fw} = Componente real de la constante dieléctrica del agua
- s = la fracción de partículas de arena
- c = la fracción de partículas de arcilla

De este modelo se deriva el cálculo de la conductividad efectiva del suelo, como se aplica en la ecuación 2.14.

$$\sigma_{eff} = 0,0467 + 0,2204P_b - 0,4111S + 0,6614C \quad (2.14)$$

La velocidad de las ondas electromagnéticas que se propagan en un medio material depende de las características electromagnéticas del medio y de la frecuencia de radiación. La ecuación 2.15 permite calcular la velocidad de propagación:

$$v = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.15)$$

Donde:

ω es la frecuencia angular

β es la constante de fase

2.5 Ecuaciones de los parámetros de la antena

Para realizar el análisis de la antena fractal, se proponen las ecuaciones para el campo eléctrico y los parámetros de la antena tomando como base a la teoría presenta en [12], el análisis de [43] y [44], donde se enfoca en la teoría de las antenas de microstrip y los arreglos de antenas de este tipo.

- Ecuación de campo eléctrico

El campo radiado del plano E para un solo elemento parche puede expresarse como:

$$E_{\theta} = j \frac{k_0 W V_0 e^{-jk_0 r}}{r\pi} \left\{ \frac{\sin\left(\frac{k_0 h}{2} \cos \theta\right)}{\frac{k_0 h}{2} \cos \theta} \right\} \cos\left(\frac{k_0 L_e}{2} \sin \theta\right) \quad (2.16)$$

Donde W es el ancho de la antena de parche, Le es el extendido de longitud, k_0 es la constante de fase, V_0 es el voltaje a través de la ranura radiante del parche, h es la altura del sustrato y r es la distancia de campo lejano desde la antena.

Campo eléctrico total es igual al campo de un único elemento por factor del arreglo FA.

- Factor del arreglo

$$FA = 2 \cos\left(\frac{k_0 L_e}{2}\right) \sin \theta \sin \phi \quad (2.17)$$

- Constante dieléctrica efectiva

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{- + 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2.18)$$

Donde ϵ_r es la contante dieléctrica del material.

- Impedancia de entrada

Cada ranura radiante está representada por una admitancia Y paralela equivalente (con conductancia G y susceptancia B), como se muestra en la figura 10.

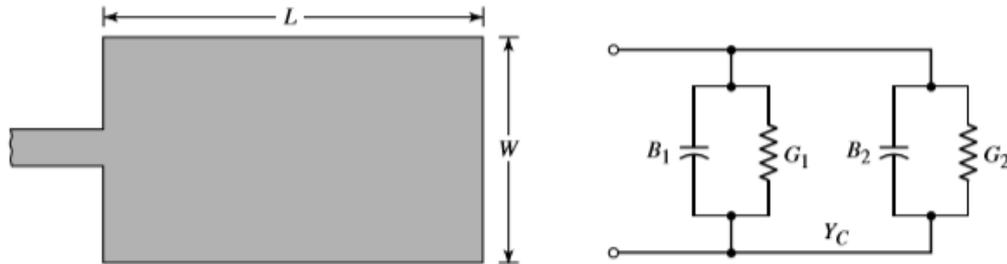


Figura 10: Impedancia en una antena Microstrip

La impedancia de un elemento R_{in} puede ser calculada con:

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})} \quad (2.19)$$

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})} \cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right)$$

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (2.20)$$

$$I_1 = \int \left[\sin\left(\frac{koW}{2} \cos \theta\right) \right]^2 \sin^3 \theta d\theta$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int \left[\sin\left(\frac{koW}{2} \cos \theta\right) \right]^2 J_0(koL \sin \theta) \sin^3 \theta d\theta$$

La impedancia del arreglo es igual a la impedancia de un elemento por impedancia mutua.

- La intensidad de radiación máxima

Para un solo elemento o parche:

$$U_{max} = \frac{|V_0|^2}{2n_0\pi^2} \left(\frac{\pi W}{\lambda_0}\right)^2 \quad (2.21)$$

Para el caso de un arreglo U_{max} es igual a 1.

- La potencia radiada

En un solo elemento o parche:

$$P_{rad} = \frac{|V_0|^2}{2n_0\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta \quad (2.22)$$

Para el arreglo:

$$P_{rad} = \oint U d\Omega_B = \int_{\phi=0}^{2p} \int_{\theta=0}^{\pi} U \sin \theta d\theta d\phi$$

Donde:

$$U(\theta) = [(AF)_n]^2$$

- La directividad máxima

Podemos usar cualquiera de las siguientes fórmulas para el cálculo:

$$D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad D_0 = \left(\frac{2\pi W}{\lambda_0}\right)^2 \frac{1}{I_1} \quad (2.23)$$

Donde I_1 puede ser calculado con la fórmula utilizada en el cálculo de la impedancia.

Para el caso del arreglo se puede aplicar la misma fórmula si se utilizan los valores de intensidad y potencia radiada calculados para el arreglo.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto se decidió realizar una metodología de investigación por etapas que incluye el diseño y simulación de una antena fractal para ser utilizada en la detección de minas antipersonal. Para lograr se caracterizaron y modelaron los medios a través de los cuales se propaga la señal y se simuló el fenómeno físico de reflexión que aplica la tecnología de georradar. En total son cuatro las etapas en las que se divide el proyecto, siendo las primeras dos una investigación de tipo descriptivo y las dos últimas de tipo exploratorio. La figura 11 describe la metodología utilizada para el desarrollo de proyecto.



Figura 11: Metodología utilizada

3.1 Primera Etapa: Investigación del estado del arte

La primera etapa corresponde al primer objetivo específico del proyecto y para su desarrollo se requirió un tiempo total de cuatro meses, en esta etapa se realizó la investigación y el análisis de los siguientes temas: tipos de minas antipersonal y principales métodos de detección, propiedades y aplicaciones de los fractales, geometría y modelos de una antena fractal, transmisión y propagación de señales electromagnéticas en medios con pérdidas.

La investigación realizada corresponde a una de tipo descriptivo dado que todos los temas ya han sido estudiados por otros investigadores y académicos en los últimos años, sin embargo, no hay antecedentes de la aplicación de una antena tipo fractal para la detección de minas de fabricación artesanal. La importancia de esta primera etapa radica en que los resultados de la investigación realizada proporcionan las bases teóricas para las siguientes etapas del proyecto donde la investigación se convierte en una de tipo exploratoria.

Las actividades que fueron realizadas para poder concluir la primera etapa son las siguientes:

- Contextualizar y delimitar el problema de investigación.
- Formular y presentar el anteproyecto.
- Analizar los procesos de detección para minas elaboradas con materiales no convencionales.
- Analizar las propiedades de los fractales e identificar requerimientos para la construcción de una antena fractal.
- Identificar las propiedades que afectan la propagación de una señal en un medio material y las ecuaciones involucradas.

Los resultados correspondientes a esta primera etapa se pueden evidenciar en el capítulo dos del presente documento que corresponde al marco teórico, aquí se encuentra organizada y referenciada toda la información consultada.

También se determinó que el fenómeno de reflexión que se va a analizar en el desarrollo del proyecto corresponderá únicamente a la reflexión presentada en el contenedor de la mina (envase de plástico) esto teniendo en cuenta que el porcentaje de cada elemento utilizado en la fabricación del explosivo no es fijo y por lo tanto el explosivo en la carga variaría sus propiedades eléctricas y su índice de reflexión de una MAP a otra.

3.2 Segunda Etapa: Diseño de la antena Fractal

La segunda etapa corresponde al segundo objetivos específicos del proyecto, para completar las actividades de esta etapa se empleó un tiempo de tres meses.

En general el desarrollo de esta etapa se enfocó en el diseño y la simulación de la antena fractal, los resultados de la simulación permitieron identificar los parámetros de operación de la antena en las diferentes frecuencias resonantes. La lista de actividades realizadas durante esta etapa es:

- Analizar los modelos fractales para seleccionar uno que se pueda implementar en el diseño de la antena.
- Elaborar el diseño de la antena fractal con base al modelo seleccionado.
- Analizar el diseño propuesto por medio de simulaciones con software especializado.

3.2.1 Selección del modelo fractal

La antena que se va a diseñar para la detección de minas artesanales va a ser utilizada para simular el fenómeno físico de reflexión que utiliza la tecnología de GPR, por este motivo se busca una estructura fractal que por sus características pueda ser útil en aplicaciones de radar y que opere en el rango de las microondas, donde las frecuencias son más apropiadas para la profundidad en la cual se puede encontrar la mina.

Al realizar la investigación de los antecedentes se identificó que los investigadores realizan sus pruebas con múltiples anchos de banda, el rango de frecuencias en las cuales realizaron sus pruebas va desde los 790 MHz hasta los 5 GHz, pero no hay un rango fijo establecido para este tipo de pruebas. Se propone para nuestra antena un ancho de banda no superior a los 2GHz ya que implicaría aumentar el tamaño de la antena, pero permite un rango suficientemente amplio para realizar pruebas con varias frecuencias, además este ancho de banda debe operar dentro del rango que se identificó en la literatura, por lo cual se propone el rango tentativo que va de 1 GHz hasta los 3 GHz.

En la literatura consultada para la sección 2.3.3 del documento, se identificó que el diseño propuesto por [32] cumple estas condiciones, por lo tanto se propone utilizar un modelo fractal basado en la antena fractal cuadrada log-periódica con un número de iteraciones ($n \leq 2$) y que cumpla las siguientes especificaciones de diseño:

- Banda de frecuencias de operación: entre 1 GHz y 3 GHz
- Perdidas de retorno: menor a -10dB
- Ganancia: mayor o igual a 2dBi
- Standing Wave Ratio: El SWR debe ser inferior o igual a 2.
- Impedancia de Entrada: La impedancia de la antena debe ser 50 Ohm.

La principal característica de esta antena es su comportamiento Log-periódico, en este tipo de antena el ancho de banda cada elemento es responsable de irradiar en una banda en particular y se utilizan los efectos de resonancia combinados de los múltiples elementos radiantes para cubrir el ancho de banda deseado. La ventaja principal de estas antenas es su independencia de resistencia de radiación y de la distribución de la radiación, respecto a la frecuencia. La estructura física de una antena log-periódica es repetitiva y eso causa un comportamiento repetitivo de sus características eléctricas, por ejemplo, mantiene una ganancia e impedancia constantes [36].

Se propone conservar en el diseño de la antena fractal la característica log-periódica de la antena propuesta por [32] para aprovechar las características de estas antenas y utilizar diferentes elementos radiantes de cubran el ancho de banda propuesto. Habiendo determinado estas características se continua con el diseño de la antena fractal.

3.2.2 Diseño de la antena fractal

Para determinar el número de cuadros fractales que se incluyen en la antena propuesta, se va a hacer uso de la siguientes formula, la cual contempla el número de cuadros requeridos según los parámetros de las frecuencias y el factor de escala entre los cuadros.

$$N = \frac{\log(f_n) - \log(f_i)}{\log(\tau)} \quad (3.1)$$

Donde, f_n es la frecuencia final de la banda, f_i la frecuencia inicial y Tao (τ) el factor de escala entre los cuadros.

Haciendo uso de esta fórmula obtenemos un total de 6 cuadros para cubrir todo el ancho de banda de 1 GHz a 3 GHz con el factor de escala de $\tau = 1,18$ que se propuso. La antena se ubica sobre un sustrato de 28 cm x 20,4 cm con un espesor de 1.52 mm y permitividad de $\epsilon = 2,50$. Debido a sus características geométricas resulta conveniente construir la antena en un plano para identificar todas sus dimensiones y de esta manera es más fácil construirla en software de simulación, en la figura 12 se muestra un plano de vista superior con las dimensiones de la antena.

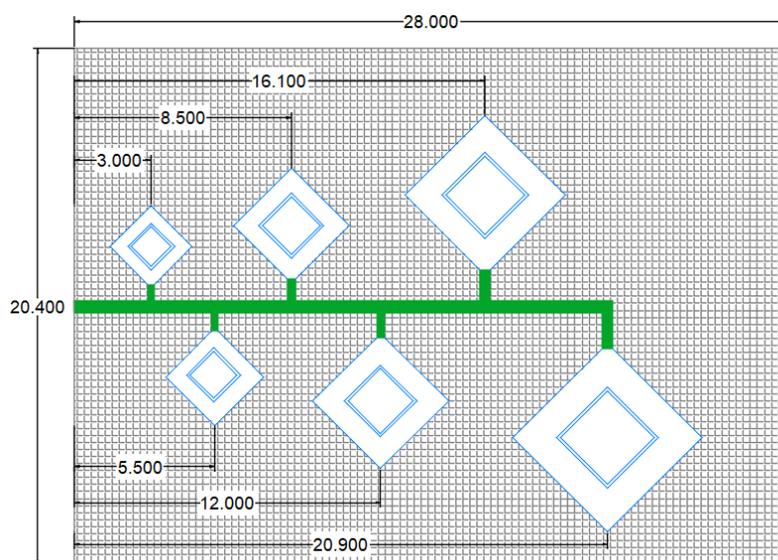


Figura 12: Dimensiones de la antena propuesta

Las frecuencias a las cuales resuena la antena fractal son seis, una para cada uno de los elementos fractales, como se muestra en la tabla 2. Los fractales se enumeran del 1 al 6 según su tamaño, siendo el 1 el más grande y el 6 el más pequeño.

Tabla 2: Frecuencias de resonancia

Fractal No.	1	2	3	4	5	6
Frecuencia (GHz)	1.35	1.65	1.85	2.25	2.7	2.95

Los dos programas utilizados para la construcción del diseño de la antena son: AutoCad 2017® y CST Microwave Studio 2018®, el primero fue incluido debido a que permite construir de forma sencilla y eficiente el plano con las dimensiones de la antena propuesta y el segundo programa nos permite construir la antena fácilmente al incluir las dimensiones que fueron

identificadas en el plano de Autocad 2017 ®. En el anexo 1 podemos encontrar más información sobre las características y funcionalidades de estos programas.

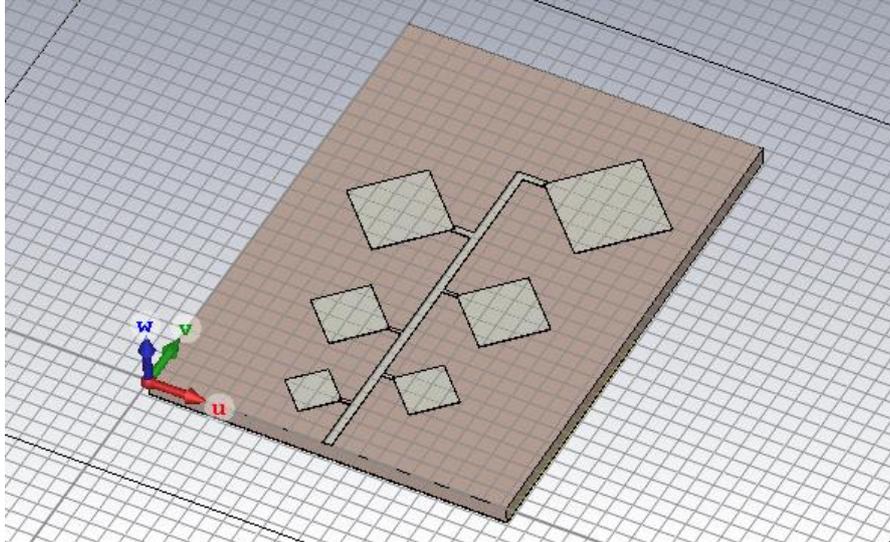


Figura 13: Antena construida para simulación

La antena construida por medio del programa CST Microwave Studio ® se puede evidenciar en la figura 13, este programa también es utilizado para la simulación de la antena, en la siguiente sección se describirá el proceso realizado en este programa.

3.2.3 Simulación y análisis de la antena propuesta

Se realizó una investigación para identificar un software que permitieran diseñar y simular una antena fractal, se logró encontrar que son muy pocos softwares los que permiten trabajar libremente con modelos fractales y para el caso de los fractales no convencionales era más difícil encontrar una herramienta compatible. Por esta razón se determinó realizar el modelo para la antena fractal por medio de CST Microwave Studio ®, debido a que con este software podemos tanto diseñar como simular el modelo fractal en una antena de microstrip o parche, además las herramientas incluidas en este software permiten editar libremente las dimensiones y la forma del parche.

La simulación se realizó para las 6 frecuencias de resonancia de la antena diseñada. Al ejecutar la simulación fue posible verificar diferentes parámetros de la antena como: el parámetro de dispersión s_{11} , la relación de onda

estacionaria SWR, la constante dieléctrica efectiva, la intensidad del campo eléctrico y los diagramas de radiación.

En la figura 14 se identifican el parámetro de dispersión de la antenna, en las 6 frecuencias, se observa que la mejor condición del parámetro S11 es de -32.29 dB y se obtiene a una frecuencia de 2.95 GHz.

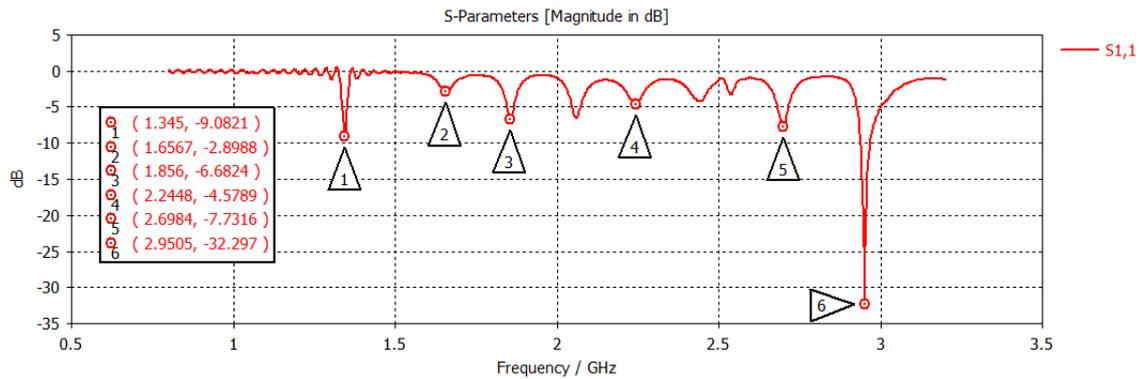


Figura 14: Parámetro s11

La figura 15 muestra valor de VSWR obtenido con las 6 frecuencias, donde el menor valor corresponde a 1.049 en la frecuencia de 2.95 GHz.

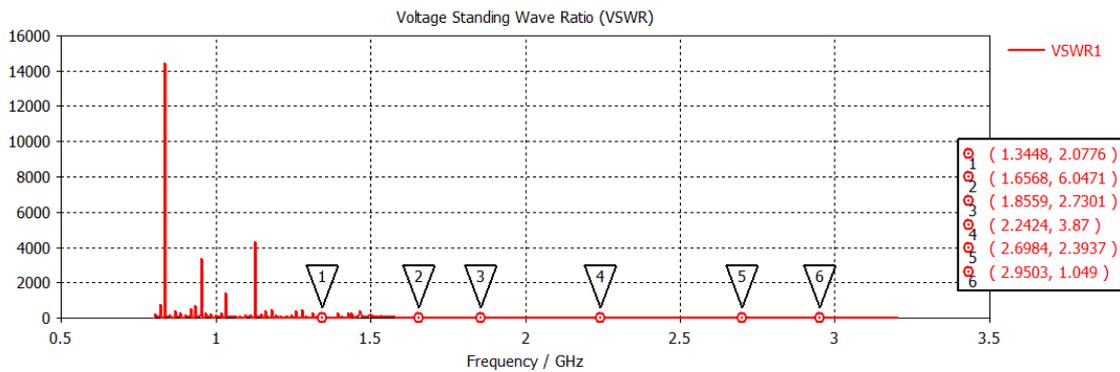


Figura 15: Relación Onda estacionaria VSWR

En general el valor de VSWR solo cumple las condiciones deseadas para las dos frecuencias con mayor valor del parámetro s11 (1.35 GHz y 2.95 GHz), pero para otros valores se mantiene variando.

En la figura 16 se puede apreciar el diagrama de radiación de las dos frecuencias identificadas con los mejores parámetros de radiación, el ancho del haz para la frecuencia de 2.95 GHz es de 63.6° y tiene una directividad

de 7.91 dBi mientras que en la frecuencia de 1.35 GHz el ancho del haz es de 51.2° con una directividad de 6.73 dBi

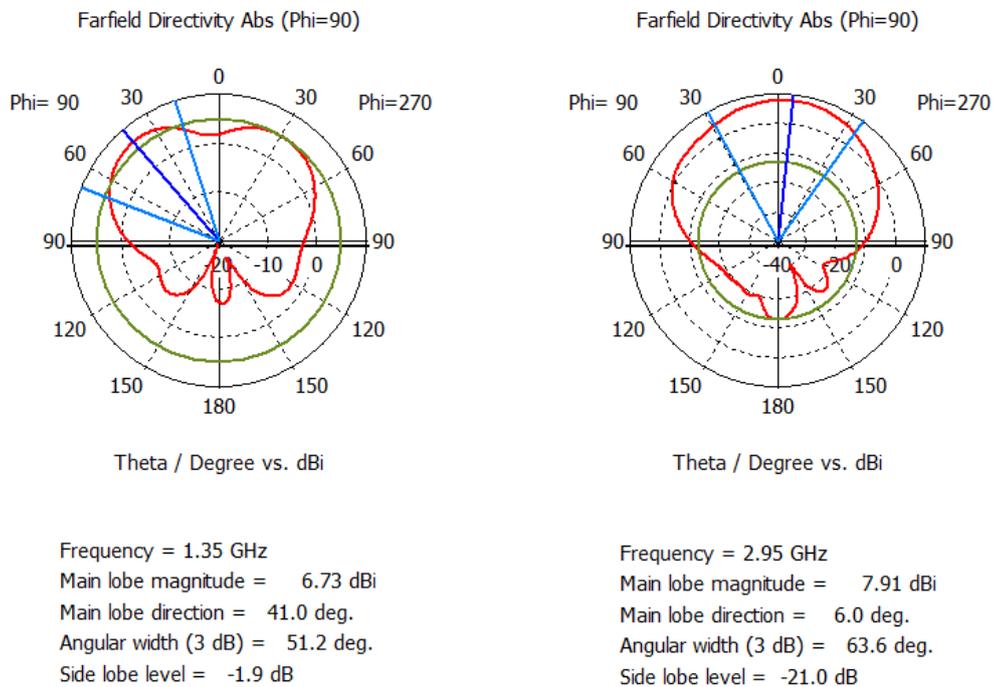


Figura 16: Diagrama de radiación de la Antena fractal

Se espera que la antena diseñada pueda generar resultados positivos para su aplicación en la detección de minas en las dos frecuencias de resonancia (1.35 GHz y 2.95 GHz) que generaron los mejores parámetros y cumplieron con los requerimientos que se propusieron para el diseño.

3.3 Tercera Etapa: Caracterización y modelamiento del fenómeno físico

Para realizar modelamiento del fenómeno físico de detectar minas de envase de plástico mediante la tecnología GPR, es necesario caracterizar los medios por los cuales se propaga la onda transmitida por la antena fractal y la onda que se refleja en la mina que hace el retorno a la antena. La tercera etapa corresponde a los objetivos específicos tres y cuatro del proyecto, para completar las actividades de esta etapa se empleó un tiempo de cuatro meses. Para llevar a cabo esta etapa se investigaron las propiedades de los medios en una región del país altamente afectada por las MAP, tomando como base estos datos reales, se realizaron los cálculos de las constantes eléctricas primarias de cada medio

y se construye el circuito equivalente para su posterior simulación. La lista de actividades realizadas durante esta etapa es:

- Identificar las propiedades de los medios en el territorio seleccionado.
- Realizar la caracterización de los medios en los que se propaga la señal.
- Realizar el modelamiento de cada medio como una línea de transmisión.
- Caracterizar la mina como carga de la línea y la antena como fuente.
- Simular por medio de software especializado el fenómeno físico con los parámetros de la antena, la mina y los medios caracterizados.
- Documentar los resultados obtenidos para su posterior análisis.

Para poder realizar los cálculos y las simulaciones en esta etapa se propuso un escenario como se ilustra en la figura 17, donde la antena fractal formaría parte de un equipo de georradar con antenas biestáticas (dos antenas fractales), las cuales estarían ubicadas a una altura de 5 cm del suelo que es una distancia cercana a la que manejan los equipos de GPR comerciales; para la mina se propuso una profundidad de 10 cm la cual se encuentra dentro del rango en el que comúnmente se encuentran las MAP.

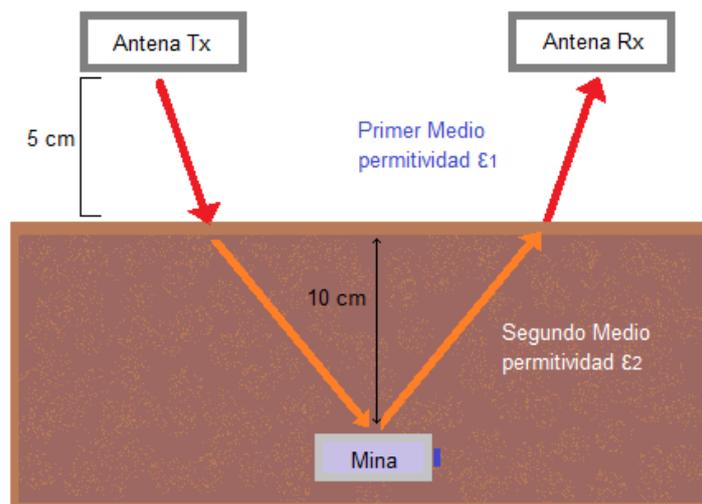


Figura 17: Escenario para la simulación

3.3.1 Caracterización y modelamiento de la fuente

Se realiza la caracterización de la antena como una fuente para una línea de transmisión, las características de la fuente se obtienen de los parámetros de la antena fractal. El valor de la fuente está determinado por el valor de la potencia radiada por la antena, sin embargo, como se evidencio en las simulaciones realizadas para la antena cada elemento fractal de la antena presenta diferentes valores de frecuencia, ganancia y potencia. Por lo tanto, se va a asignar diferentes valores a la fuente según la frecuencia con la cual se vaya a realizar la simulación. En la tabla 3 se presentan los valores que fueron utilizadas para todas las simulaciones posteriores según las frecuencias de resonancia de la antena.

Tabla 3: Valores de la fuente

Frecuencia (GHz)	1.35	1.65	1.85	2.25	2.7	2.95
Voltaje fuente (V)	1.41	2.12	3.24	2.64	3.24	4.18

3.3.2 Caracterización del medio (aire)

La permitividad de un material se da normalmente en relación con la permitividad del vacío, denominándose permitividad relativa o constante dieléctrica. En la tabla 4 se resumen las características eléctricas del aire, su permitividad relativa es aproximadamente 1 que es la permitividad del vacío. Por lo tanto, en el espacio libre la velocidad de propagación será $c = 3 \cdot 10^8$ (m/seg).

Tabla 4: Propiedades eléctricas del Aire

Permeabilidad μ_r	Permitividad relativa ϵ_r	Conductividad σ
1	1.00006	$10^{-15} \approx 0$

Como se evidencia en la tabla 4 las propiedades eléctricas del aire coinciden con las de un dieléctrico perfecto, por este motivo la línea de transmisión cumple que $R = 0 = G$, $\alpha = 0$ y $R_0 = Z_0$ [45] Utilizando las ecuaciones 3.2 y 3.3 se puede calcular el valor de la capacitancia y la inductancia:

$$C = \frac{\beta}{\omega R_0} \quad (3.2)$$

$$L = R_0^2 C \quad (3.3)$$

Donde:

β es la constante de fase = $\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$

ω es la frecuencia angular = $2\pi f$

R_0 es la parte real de Z_0

Con las constantes primarias se obtienen los parámetros secundarios del medio, como son la impedancia característica Z_0 y la constante de propagación γ . Para el caso del primer medio la impedancia característica se puede calcular directamente de las propiedades eléctricas del vacío con la ecuación 2.5.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$

Donde:

μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío: $4\pi \times 10^{-7} (H/m)$

ϵ_0 = Permitividad eléctrica del vacío: $8.85 \times 10^{-12} (F/m)$

Con las propiedades del vacío calculamos también la constante de fase:

$$\omega = 2\pi f \rightarrow \omega = 1.85 \times 10^{10}$$

$$\beta = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} \rightarrow \beta = 61.79 \text{ rad/m}$$

Reemplazando valores en las tres ecuaciones obtenemos:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{1.26 \times 10^{-6}}{8.85 \times 10^{-12}}} = 120\pi = 377 (\Omega/m)$$

$$C = \frac{61.79}{2\pi \times 2.95 \times 10^9 \times 377} = 8.8435 \times 10^{-12} (F/m)$$

$$L = 8.8435 \times 10^{-12} \times (377)^2 = 1.256 \times 10^{-6} \text{ (H/m)}$$

Ahora se puede calcular la constante de propagación γ utilizando la ecuación 3.4, ya que el valor de la constante de atenuación α es igual a cero, el valor de γ dependerá totalmente de β .

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (3.4)$$

$$\gamma = 0 + j\beta = \sqrt{(0 + j\omega L)(0 + j\omega C)}$$

$$\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{LC} = j 61.79$$

Con los valores de las constantes primarias que se expresan en unidad eléctrica por unidad de longitud, se realiza el diseño del circuito equivalente para el primer medio. Es importante recordar que se va a modelar como una línea de transmisión de 5cm le longitud, esto debido a la altura propuesta para la antena con respecto a la superficie, por lo tanto, los parámetros primarios serán aplicados a esa longitud (ver tabla 5). El circuito equivalente para el primer medio se puede apreciar en la figura 18.

Tabla 5: Valores para el circuito 1

Parámetros	R ($\Omega/5 \text{ cm}$)	L (H/5 cm)	C (F/5 cm)	G (S/5 cm)
Valor en el circuito	0	62.884 nH	0.4421 pF	0

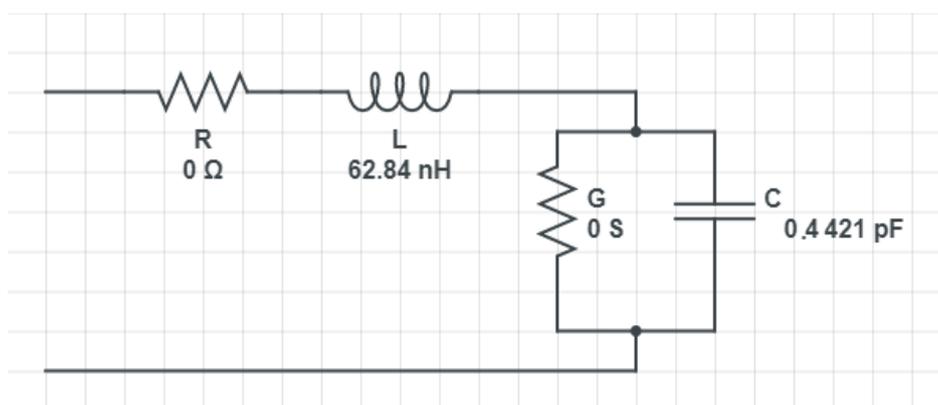


Figura 18: Circuito equivalente primer medio

3.3.3 Caracterización del medio (Suelo)

Las rocas y los suelos se componen de distintos elementos, cada uno con propiedades eléctricas y magnéticas diferentes. Los valores de la permitividad y la conductividad dependen de las propiedades geotécnicas y composición de los materiales que componen el medio. [22]

Al estudiar la propagación de ondas electromagnéticas en un medio material como el suelo, se consideran las principales características de los estudios de detección de minas utilizando georradar: la composición química del medio, la granulometría, la densidad, porosidad y el fluido intersticial existente (contenido de agua y gases). [22]

Los diferentes tipos de suelo se clasifican según la textura de las partículas que lo conforman. Se consideran partículas del suelo a las partículas minerales cuyo tamaño es menor a 2 mm y según su tamaño se clasifican en tres tipos: arena, arcilla y limo. Para este estudio se propuso caracterizar el suelo utilizando las propiedades de diferentes muestras de suelo que corresponde al departamento de Antioquia ya que es el departamento que más incidentes presenta por la presencia de minas antipersonal [14]. Los cálculos realizados se basan en las propiedades del suelo y la granulometría presentadas por [46] para el municipio de Taraza, ya que no fue posible tomar medidas directamente en la zona.

Tabla 6: Propiedades del suelo para la zona propuesta

Propiedad	% Arena	% Arcilla	Densidad (g/cm ³)	% Vol. Agua
Muestra 1	26	46	1.11	15.32
Muestra 2	62	14	1.20	32.22

La tabla 6 resume las principales características del suelo para dos muestras encontradas en [46] para profundidades menores a los 55 cm, con esos valores se procede a aplicar la ecuación 2.12 para el cálculo de la permitividad.

$$\varepsilon' = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\varepsilon_s^{0,65} - 1) + \theta^{\beta'} \varepsilon_{fw}'^{0,65} - \theta \right]^{\frac{1}{0,65}}$$

Donde:

- ρ_b = es la densidad aparente en gramos por centímetro cúbico
- ρ_s = es la densidad específica de las partículas sólidas del suelo, con un valor típico de 2,66 g / cm³
- ε'_{fw} = Componente real de la constante dieléctrica del agua

Al remplazar:

$$\varepsilon'_1 = \left[1 + \frac{1.20}{2.67} (1.7387) + 2.2776 - 0.1532 \right]^{0.65}$$
$$\varepsilon'_1 = (3.8804)^{1.5385} = 7.9476 \rightarrow \text{Para la muestra 1}$$

$$\varepsilon'_2 = \left[1 + \frac{1.11}{2.67} (1.7387) + 5.9008 - 0.3222 \right]^{0.65}$$
$$\varepsilon'_2 = (7.36)^{1.5385} = 21.5606 \rightarrow \text{Para la muestra 2}$$

Aplicando la ecuación 2.14 con las mismas propiedades de la tabla 6, se calcula la conductividad efectiva.

$$\sigma_{eff} = 0,0467 + 0,2204P_b - 0,4111S + 0,6614C$$

Donde:

- s = la fracción de partículas de arena
- c = la fracción de partículas de arcilla

Reemplazando valores para la muestra 1:

$$\sigma_{eff} = 0,0467 + 0.2446 - 0.1069 + 0.3042$$
$$\sigma_{eff} = 0.4887$$

Reemplazando valores para la muestra 2:

$$\sigma_{eff} = 0,0467 + 0.2645 - 0.2549 + 0.0926$$

$$\sigma_{eff} = 0.1489$$

La permeabilidad de la superficie de la Tierra, μ , se puede considerar normalmente como igual a la permeabilidad en el vacío, [UIT-R P.527] por lo cual el valor de permeabilidad relativa para el medio se puede aproximar a 1.

$$\mu_r \approx 1$$

Los valores calculados para las propiedades eléctricas del suelo se contrastan con los valores consultados en la literatura [22] para suelo arcilloso, como se evidencia en la tabla 7. Se observa que los valores calculados se encuentran dentro de los rangos presentados por el tipo de suelo estudiado. Es importante aclarar que el rango de la permeabilidad es bastante amplio debido a que los valores para suelos son afectados por la cantidad de agua presente en la muestra, siendo 3 el valor más bajo en suelos secos, 15 el valor más alto en arcillas húmedas y 30 el valor más alto en arenas húmedas.

Tabla 7: Valores propiedades eléctricas

Propiedad	Permeabilidad μ_r	Permitividad relativa ϵ_r	Conductividad σ
Valor Calculado muestra 1	1	7.9476	0.4887
Rango esperado muestra 1	1	3 - 15	0.1 - 1
Valor Calculado muestra 2	1	21.56	0.1489
Rango esperado muestra 2	1	3 - 30	0.1 - 1

Para realizar la caracterización vamos a considerar el suelo como uniforme manteniendo las propiedades de la tabla 6, se puede considerar de esta manera ya que sus propiedades no cambian significativamente en el terreno cercano al lugar donde fueron medidas sus propiedades si se mantienen la misma profundidad y temperatura.

Este medio puede ser modelado como una línea de transmisión de placas paralelas donde la separación de las placas está dada por la profundidad de la mina (10cm) y utilizando el ancho del haz de la antena que es de 64° se determinar el ancho w de la placa con un valor de 18.6 cm.

Los valores de R , L , C y G se calculan con las ecuaciones 3.5 a 3.8 utilizando los valores $d=0.1\text{m}$ y $w=0.186\text{m}$, como se evidencia a continuación:

$$R = \frac{2}{w} \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} \quad (3.5)$$

$$R = 1659.5 \text{ } (\Omega/\text{m}) = 1.659 \text{ } (\text{K}\Omega/\text{m}) \rightarrow \text{muestra 1}$$

$$R = 3006.5 \text{ } (\Omega/\text{m}) = 3.006 \text{ } (\text{K}\Omega/\text{m}) \rightarrow \text{muestra 2}$$

$$L = \mu \frac{d}{w} \quad (3.6)$$

$$L = 6.7527 \times 10^{-7} \text{ } (\text{H}/\text{m}) = 0.675 \text{ } (\mu\text{H}/\text{m}) \rightarrow \text{muestra 1 y 2}$$

$$G = \sigma \frac{w}{d} \quad (3.7)$$

$$G = 0.9090 \text{ } (\text{S}/\text{m}) \rightarrow \text{muestra 1}$$

$$G = 0.2769 \text{ } (\text{S}/\text{m}) \rightarrow \text{muestra 2}$$

$$C = \epsilon \frac{w}{d} \quad (3.8)$$

$$C = 1.3089 \times 10^{-10} \text{ } (\text{F}/\text{m}) = 0.1308 \text{ } (\text{nF}/\text{m}) \rightarrow \text{muestra 1}$$

$$C = 3.5507 \times 10^{-10} \text{ } (\text{F}/\text{m}) = 0.355 \text{ } (\text{nF}/\text{m}) \rightarrow \text{muestra 2}$$

Con los valores de las propiedades podemos aplicar la ecuacion 3.4 para calcular la constante propagación.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + jwL)(G + jwC)}$$

Para la muestra 1:

$$\gamma = \sqrt{(1.6595 \times 10^3 + j 1.2516 \times 10^4) (0.9090 + j 2.4260)}$$

$$\gamma = 43.896 + j 175.449$$

Para la muestra 2:

$$\gamma = \sqrt{(3.0065 \times 10^3 + j 1.2516 \times 10^4) (0.2769 + j 6.5813)}$$

$$\gamma = 40.315 + j 288.382$$

Luego aplicamos la ecuación 3.9 para calcular la impedancia característica.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (3.9)$$

Para la muestra 1:

$$\sqrt{\frac{(1.6595 \times 10^3 + j 1.2516 \times 10^4)}{(0.9090 + j 2.4260)}}$$

$$Z_0 = 69.3618 + j 7.8952$$

Para la muestra 2:

$$\sqrt{\frac{(1.6595 \times 10^3 + j 1.2516 \times 10^4)}{(0.9090 + j 2.4260)}}$$

$$Z_0 = 43.9983 - j 4.2745$$

Con los valores de las constantes primarias, se realiza el diseño del circuito equivalente para el segundo medio. Es importante recordar que se va a modelar como una línea de transmisión de 10cm de longitud, esto debido a que 10cm es la profundidad propuesta para la mina con respecto a la superficie y por lo tanto los parámetros primarios serán aplicados a esa longitud (ver tabla 8). Los circuitos equivalentes para el segundo medio se pueden apreciar en la figura 19.

Tabla 8: Valores para el circuito 2

Parámetros	R (Ω/10 cm)	L (H/10 cm)	C (F/10 cm)	G (S/10 cm)
Valor en el circuito para la muestra 1	165.9 Ω	67.527 nH	13.089 pF	90.89 mS
Valor en el circuito para la muestra 2	300.6 Ω	67.527 nH	35.507 pF	27.7 mS

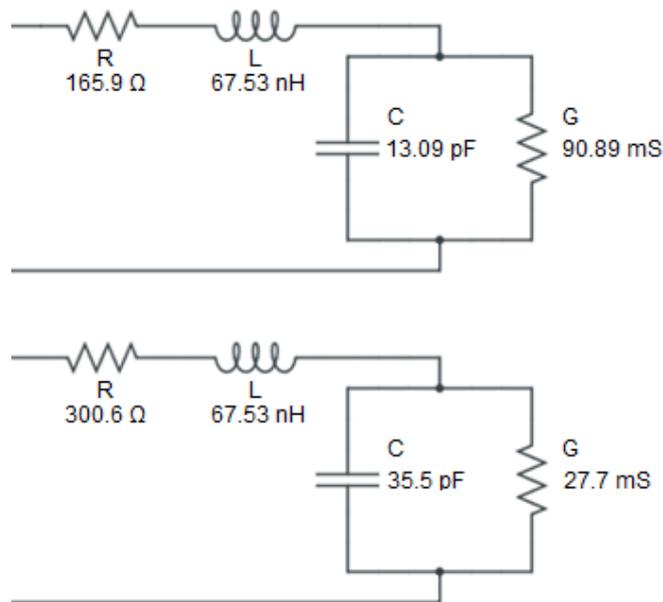


Figura 19: Circuitos equivalentes para el segundo medio

Después de realizar la caracterización del medio, se puede calcular el coeficiente de reflexión, que permite determinar el porcentaje de la señal reflejada al pasar la señal al segundo medio. El valor calculado para la permitividad del suelo ϵ_2 es de 7.94. para la muestra 1 y 21.56 para la muestra 2, con estos valores se aplica la ecuación 2.8 para obtener el coeficiente de reflexión.

Muestra del suelo 1 $\Gamma = \frac{\sqrt{1} - \sqrt{7.94}}{\sqrt{1} + \sqrt{7.94}} = 0.4761 \rightarrow 47.61\%$

Muestra del suelo 2 $\Gamma = \frac{\sqrt{1} - \sqrt{21.56}}{\sqrt{1} + \sqrt{21.56}} = 0.6456 \rightarrow 64.56\%$

Al aplicar la ecuación 2.4 obtenemos un coeficiente de reflexión de 0.4761 con la primera muestra de suelo y 0.6456 con la segunda, esto indica que un gran porcentaje de la señal se está reflejando en la superficie del suelo propuesto como lo representa la figura 20.

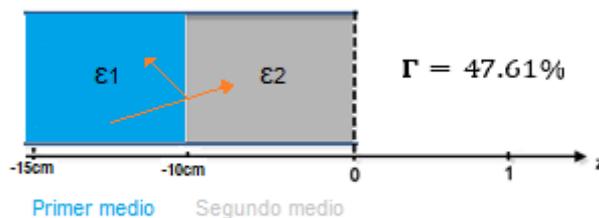


Figura 20: Reflexión al pasar al segundo medio

3.3.4 Caracterización de la mina de envase plástico (carga)

Habiendo caracterizado los dos medios como una línea de transmisión, procedemos a caracterizar la mina de envase plástico como la carga en el circuito.

La impedancia de la carga puede calculada utilizando la ecuación 3.10, sin embargo, es necesario determinar primero el coeficiente de reflexión Γ , que se puede calcular aplicando nuevamente la ecuación 2.8, pero utilizando los valores de permitividad del suelo y del plástico PET.

$$Z_L = Z_0 \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right) \quad (3.10)$$

La permitividad calculada para el suelo en el territorio seleccionado es de 7.94 y la permitividad del material plástico PET es de 3.65 (ver tabla 1). Al remplazar ambos valores en la ecuación 2.4 se obtiene un coeficiente de reflexión de 0.192, lo cual nos indica que un bajo porcentaje de la señal lograra ser reflejada por este tipo de mina.

$$\Gamma = \frac{\sqrt{7.94} - \sqrt{3.65}}{\sqrt{7.94} + \sqrt{3.65}} = 0.192 \rightarrow 19.2\%$$

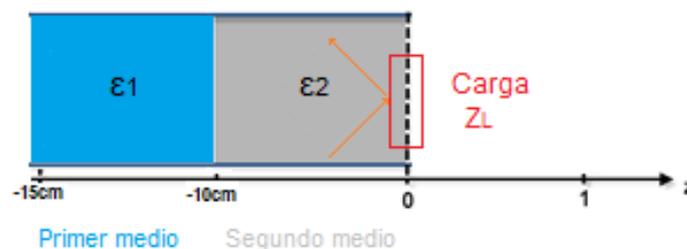


Figura 21: Reflexión en la carga

La figura 21 representa el fenómeno de reflexión entre la señal que atraviesa el segundo medio y la carga Z_L . Aplicamos la ecuación 3.10 remplazando los valores de Z_0 que es la impedancia característica del suelo y coeficiente de reflexión Γ .

$$Z_L = Z_0 \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right)$$

$$Z_L = 102.351 + j 11.650$$

3.3.5 Modelamiento y Simulación del circuito Equivalente

Construimos el circuito que representa la transmisión desde la fuente (antena) hasta la carga (mina), para esto utilizamos los valores de la tabla 3, 5 y 8 que corresponden a los valores de la fuente y del circuito equivalente para los dos medios caracterizados. El circuito con el que se va a representar el fenómeno físico para este estudio se evidencia en la figura 22. También se construye un segundo circuito con los mismos elementos, pero modificando los valores de los elementos que corresponden al segundo medio para la segunda muestra de suelo según los valores de la tabla 8.

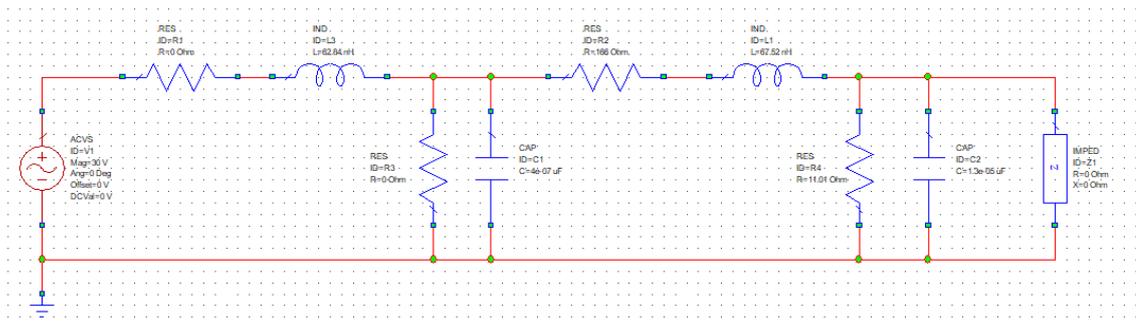


Figura 22: Circuito equivalente para simulación

Para realizar la simulación de los circuitos propuestos se establece un protocolo de pruebas, en el cual se especifica la creación de dos circuitos adicionales para la simulación de la señal que regresa de la carga hacia la antena, el orden para realizar las simulaciones y el registro de datos. Este protocolo se encuentra explicado claramente en el Anexo 2 del documento.

Se realiza la simulación en el software Cadence AWR ® para las seis frecuencias de resonancia de la antena y en cada caso se mide la potencia y el voltaje recibido en la carga.

Para la primera simulación que corresponde al primer circuito, el mayor valor obtenido en la carga corresponde a 29.73 uW en la frecuencia de 1.35 GHZ, como se evidencia en la figura 23.

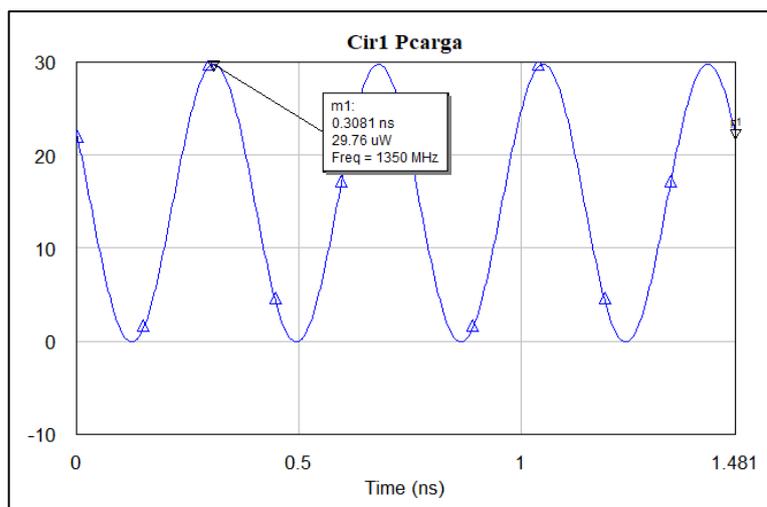


Figura 23: Potencia medida en la carga del circuito 1

Se realiza nuevamente la simulación con el segundo circuito, el mayor valor obtenido en la carga corresponde a 2.36 uW en la frecuencia de 1.35 GHz, como se evidencia en la figura 24.

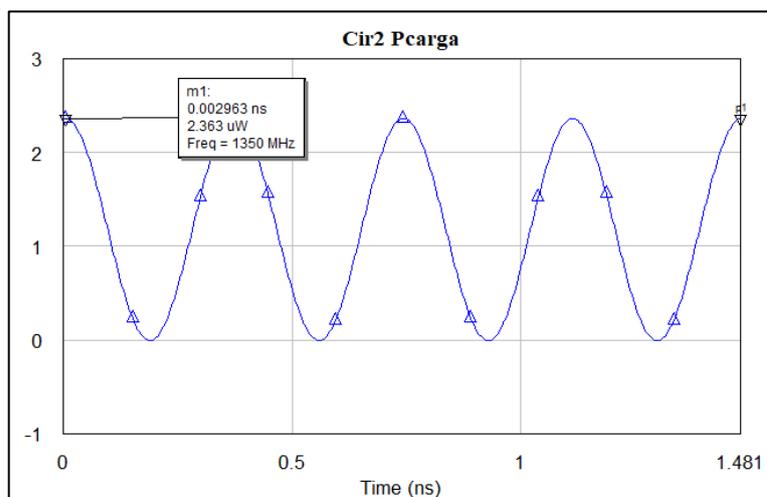


Figura 24: Potencia medida en la carga del circuito 2

Los circuitos de retorno están conformados por los mismos elementos de los circuitos anteriores, pero cambiando el orden de los medios, es decir los elementos que corresponden al segundo medio (suelo) son los que están más cerca de la fuente, como se evidencia en la figura 25. Para la simulación de los circuitos de retorno se utilizó el valor de voltaje medido en la carga de los circuitos 1 y 2 para asignarlos como el valor de la fuente en los circuitos de retorno. El valor del voltaje en la carga del circuito 1 es de 55.3 mV que

será utilizado en la fuente del circuito de retorno 1, el voltaje en la carga del circuito 2 es de 15.6 mV y será utilizado en la fuente del circuito de retorno 2.

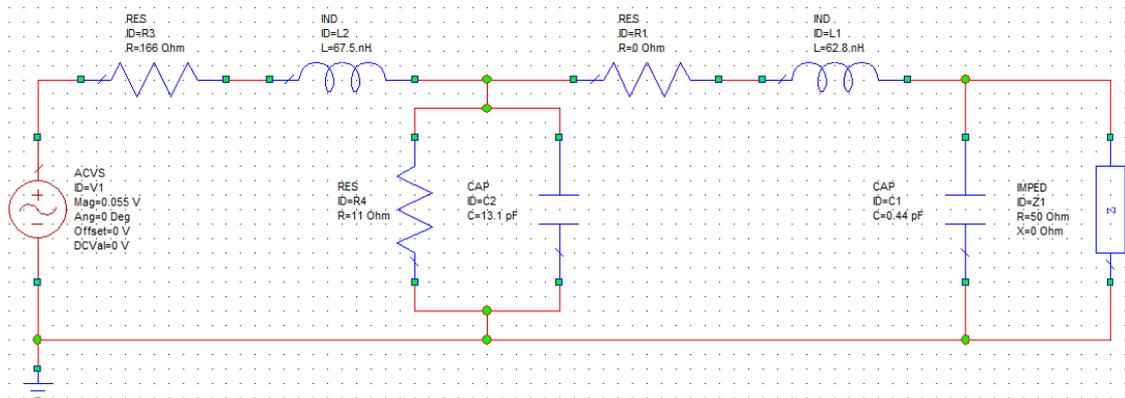


Figura 25: Circuito de retorno

Para la primera simulación que corresponde al primer circuito, el mayor valor obtenido en la carga corresponde a 74.5 pW en la frecuencia de 1.35 GHz, como se evidencia en la figura 26.

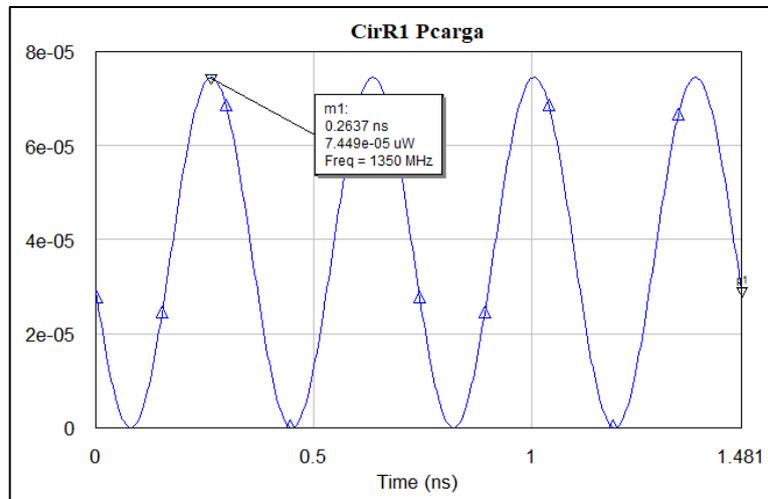


Figura 26: Potencia medida en la carga del circuito de retorno 1

Se realiza nuevamente la simulación que corresponde al primer circuito, el mayor valor obtenido en la carga corresponde a 0.46 pW en la frecuencia de 1.35 GHz, como se evidencia en la figura 27.

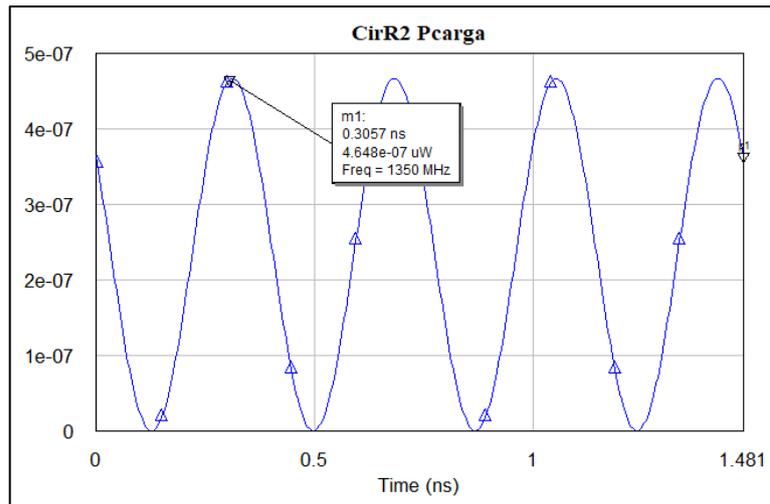


Figura 27: Potencia medida en la carga del circuito de retorno 2

Todos los resultados obtenidos durante las simulaciones del fenómeno físico por medio de los circuitos equivalentes son registrados y serán presentados en el capítulo 4 del documento para su posterior análisis.

Para determinar si la potencia que llega a la antena puede ser detectada por un sistema de radar, el valor de la potencia recibida debe ser superior al valor de potencia térmica, el cual se puede calcular con la ecuación 2.4 para un sistema de GPR en general:

$$P_{term} = 1.6 \times 10^{-20} \Delta f$$

$$P_{term} = 1.6 \times 10^{-20} \times (1.35 \times 10^9)$$

$$P_{term} = 21.6 \text{ pW}$$

Se asigna a Δf el valor de la frecuencia que presento los mejores resultados 1.35 GHz, el valor calculado para la potencia térmica que se debe superar para lograr una detección debe ser superior a 21,6 pW.

3.3.6 Análisis del fenómeno de reflexión

Hay que recordar que el fenómeno de reflexión va a ocurrir cada vez que la señal cambie entre medios con permitividad diferente, por lo tanto, hay que considerar también la reflexión que se presenta en el regreso de la señal desde la mina a la antena como se evidencia en la figura 28.

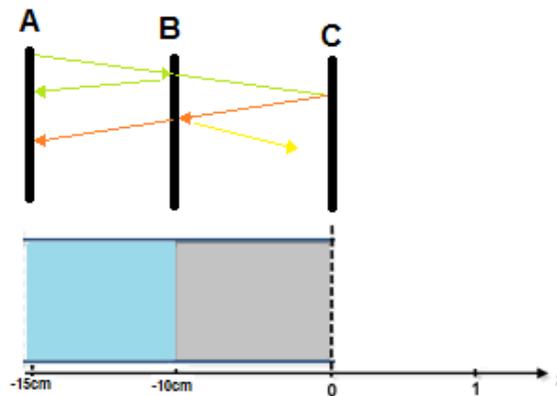


Figura 28: Reflexiones que ocurren con la señal transmitida

La porción de señal que es reflejada y la que es transmitida depende de las propiedades eléctricas de los medios implicados.[40] Por lo tanto, el coeficiente de reflexión al pasar del suelo al aire debe ser el mismo que al pasar del aire al suelo. Aplicando las ecuaciones 3.11 y 3.12 propuestas en [40] se puede calcular el coeficiente de reflexión Γ y el coeficiente de transmisión τ .

$$\Gamma = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}$$

$$\tau = \frac{2n_2}{n_2 + n_1} = 1 + \Gamma$$

Donde:

n_1 es la impedancia intrínseca del primer medio

n_2 es la impedancia intrínseca del segundo medio

Resolviendo las ecuaciones se obtienen los coeficientes en los tres casos donde se presenta la reflexión:

Caso 1: Paso del aire al suelo

$$n_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} = 377\Omega \quad , \quad n_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} = 133\Omega$$

$$\Gamma = \frac{133 - 377}{133 + 377} = -0.4763 \quad , \quad \tau = \frac{2 \times 133}{133 + 377} = 0.5237$$

Caso 2: Paso del suelo a la mina de plástico

$$n_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} = 133\Omega \quad , \quad n_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} = 197\Omega$$

$$\Gamma = \frac{197 - 133}{197 + 133} = 0.193 \quad , \quad \tau = \frac{2 \times 197}{197 + 133} = 1.193$$

Caso 3: Paso del suelo al aire

$$n_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} = 133\Omega \quad , \quad n_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} = 377\Omega$$

$$\Gamma = \frac{377 - 133}{377 + 133} = 0.4763 \quad , \quad \tau = \frac{2 \times 377}{377 + 133} = 1.4763$$

Caso 4: Paso del aire a la antena

$$n_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} = 377\Omega \quad , \quad n_2 = 50\Omega$$

$$\Gamma = \frac{50 - 377}{50 + 377} = 0.7658 \quad , \quad \tau = \frac{2 \times 50}{50 + 377} = 0.2342$$

Para incrementar la posibilidad de detección por medio de las señales de radar, se puede aplicar un principio de la reflexión de ondas conocido como ángulo de Brewster que representa el ángulo de incidencia donde la onda polarizada paralela al plano de incidencia se transmite totalmente [25], lo que da como resultado un coeficiente de reflexión de cero.

Aplicando la ecuación 3.13 se puede calcular el índice de refracción n de cada medio a partir de sus propiedades eléctricas y con la ecuación 3.14 se puede despejar el ángulo de Brewster.

$$n = c \sqrt{\varepsilon \times \mu}$$

Donde:

c es la velocidad de la luz

ε es la permitividad absoluta del medio

μ es la permeabilidad del medio

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

Para el índice de refracción de la mina de plástico, el valor se obtiene directamente de la Tabla1, reemplazando valores se calcula el ángulo de Brewster para cada uno de los casos:

Caso 1: Paso del aire al suelo

$$n_1 = 1 \quad , \quad n_2 = 2.82$$

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{2.82}{1} = 70.47^\circ$$

Caso 2: Paso del suelo a la mina de plástico

$$n_1 = 2.82 \quad , \quad n_2 = 1.58$$

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{1.58}{2.82} = 29.26^\circ$$

Caso 3: Paso del suelo al aire

$$n_1 = 2.82 \quad , \quad n_2 = 1$$

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{1}{2.82} = 19.52^\circ$$

$$\Gamma = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$

El fenómeno de reflexiones puede ser analizado gráficamente, para esto se realiza la simulación en el software Matlab ® aplicando los valores de la permitividad, impedancia, frecuencia y amplitud. Para la simulación se va a utilizar la frecuencia y su respectivo valor en la fuente con el que se obtuvo la mayor potencia en la carga del circuito equivalente que se simuló en la sección 3.3.5, tal como se especifica en el protocolo de simulaciones (ver anexo 2).

El script en Matlab genera dos graficas cada vez que se produce un cambio en el medio por el que se propaga la señal, una es la onda reflejada y la otra la onda incidente, finalmente produce la gráfica que representa la señal recibida en la antena receptora. Se van a realizar dos simulaciones, la primera va ser con la señal que incide normal a la superficie del segundo medio y la segunda simulación aplicando el ángulo de Brewster que se calculó para el caso 1, con el propósito de comparar y analizar el impacto que tiene la variación del ángulo. Para las simulaciones con matlab se va a tener en cuenta la amplitud de voltaje de la señal, la cual se está dando en milivoltios.

- Primera simulación: caso 1 - paso del aire al suelo:

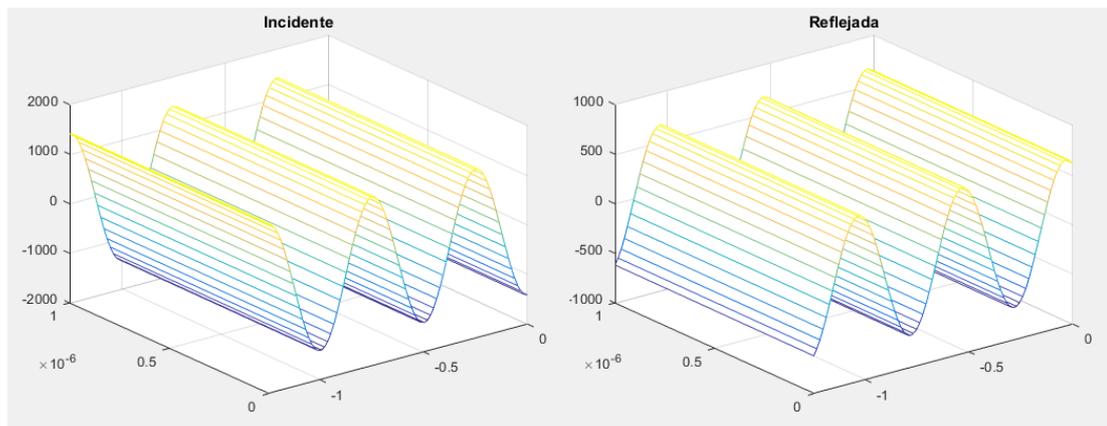


Figura 29: Onda incidente y reflejada en el segundo medio

Como se evidencia en la figura 29, al propagarse por el primer medio no se presentan pérdidas, pero una gran parte de la señal se refleja al pasar del primer al segundo medio, reduciendo la amplitud de la señal casi a la mitad. Esta pérdida coincide con lo que se esperaba ya que el cálculo realizado para el índice de reflexión en caso 1 generó un valor de 0.47.

- Primera simulación: caso 2 - paso del suelo a la carga:

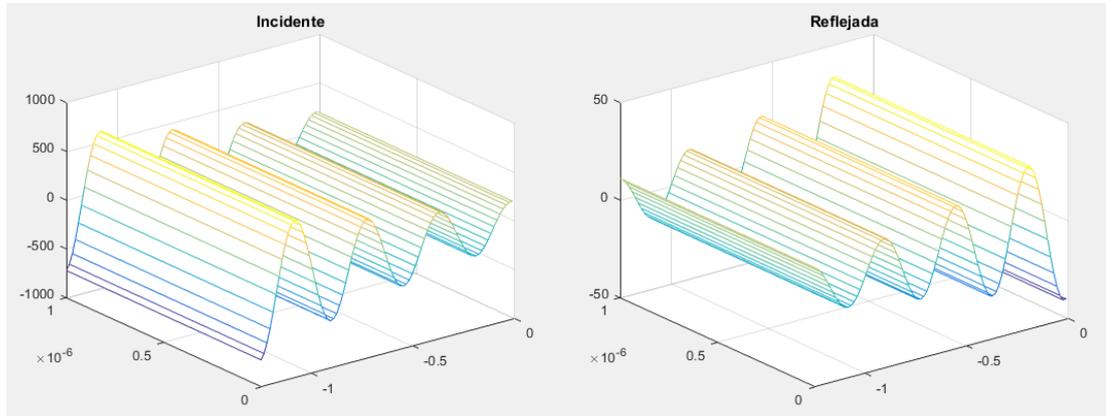


Figura 30: Onda incidente y reflejada en la mina

En la figura 30 se puede apreciar que al propagarse por el segundo medio se generan pérdidas tanto en la señal que llega a la carga como la señal que se refleja de la misma. La señal reflejada tiene una amplitud de aproximadamente un 20% de la onda que incide en la mina lo cual corresponde al índice de reflexión de 0.19 se calculo para el caso 2.

- Primera simulación: caso 3 - paso del suelo al aire:

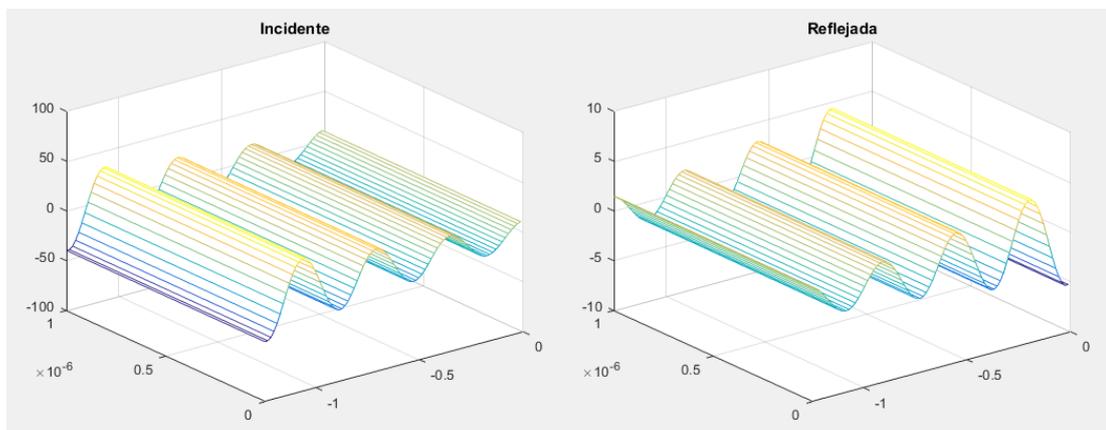


Figura 31: Onda incidente y reflejada en el retorno al primer medio

Como se evidencia en la figura 31, la señal que retorna al primer medio desde la mina sigue presentando pérdidas al propagarse en el suelo, además se presenta nuevamente una reflexión al pasar la señal al primer medio. La señal reflejada corresponde a un valor aproximado de la mitad de la onda incidente, debido a que se presenta el mismo índice de reflexión que para el caso 1.

- Primera simulación: Señal Recibida en la antena:

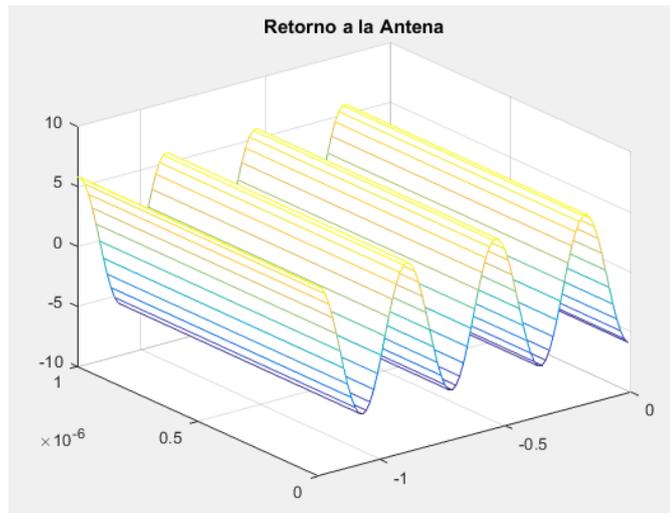


Figura 32: Señal que recibe la antena, simulación 1

La figura 32 muestra la señal que logra regresar a la antena, el valor de amplitud de la señal se redujo considerablemente en comparación con la señal transmitida originalmente. Esta señal llega propagándose por el primer medio y por lo tanto no registra pérdidas.

Se repite la simulación aplicando el ángulo de Brewster que se calculó para el caso 1 que corresponde a 70.47° . Solo se aplica este ángulo en el paso del aire al suelo ya que no hay manera de controlar la dirección y ángulo después de la transmisión de la señal, por lo tanto, no es posible que en todos los casos la señal llegue con un ángulo de Brewster.

- Segunda simulación: caso 1 - paso del aire al suelo:

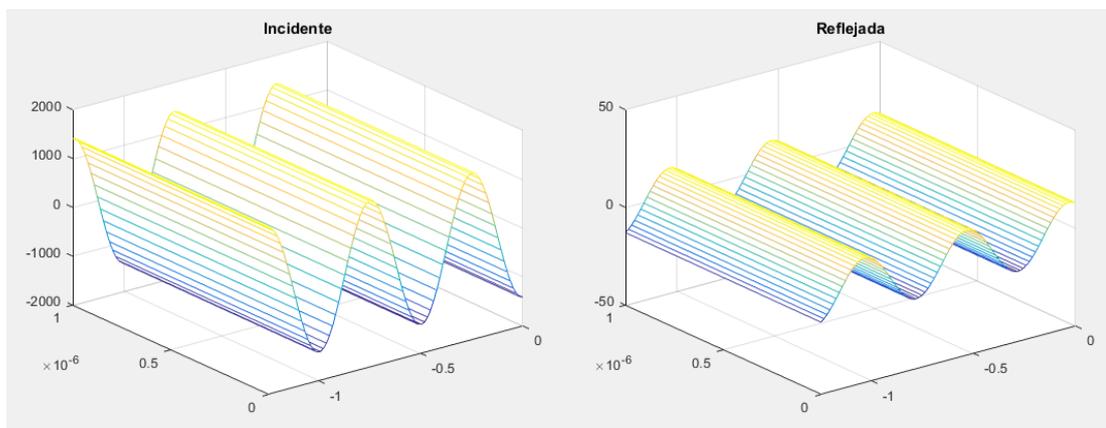


Figura 33: Onda incidente y reflejada en el segundo medio, simulación 2

Como se evidencia en la figura 33, la onda transmitida por la antena no presenta pérdidas en el primer medio y la aplicación del ángulo de Brewster permitió que solo una pequeña parte de la señal fuera reflejada.

- Segunda simulación: caso 2 - paso del suelo a la carga:

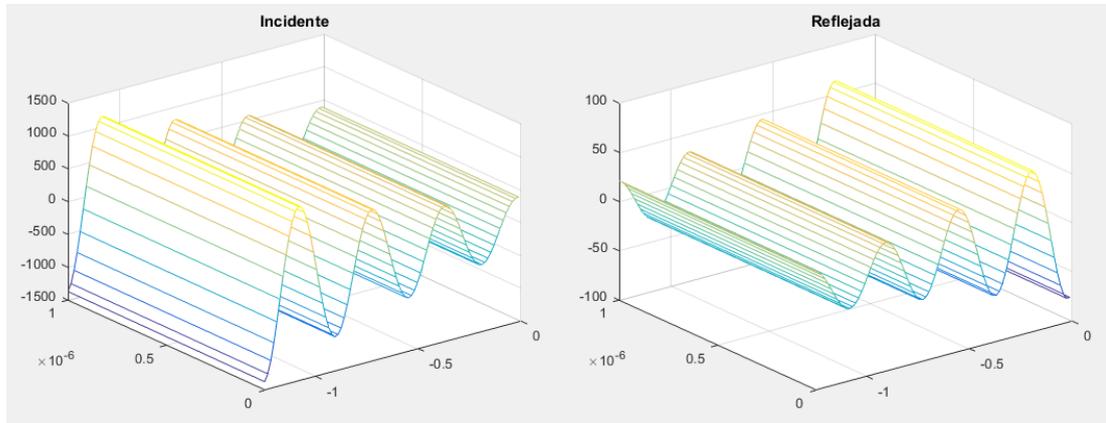


Figura 34: Onda incidente y reflejada en la mina, simulación 2

En la figura 34 se puede apreciar que casi la totalidad de la señal que fue transmitida pasa hacia el suelo, pero al propagarse por el segundo medio se generan pérdidas tanto en la señal que llega a la carga como la señal que se refleja de la misma.

- Segunda simulación: caso 3 - paso del suelo al aire:

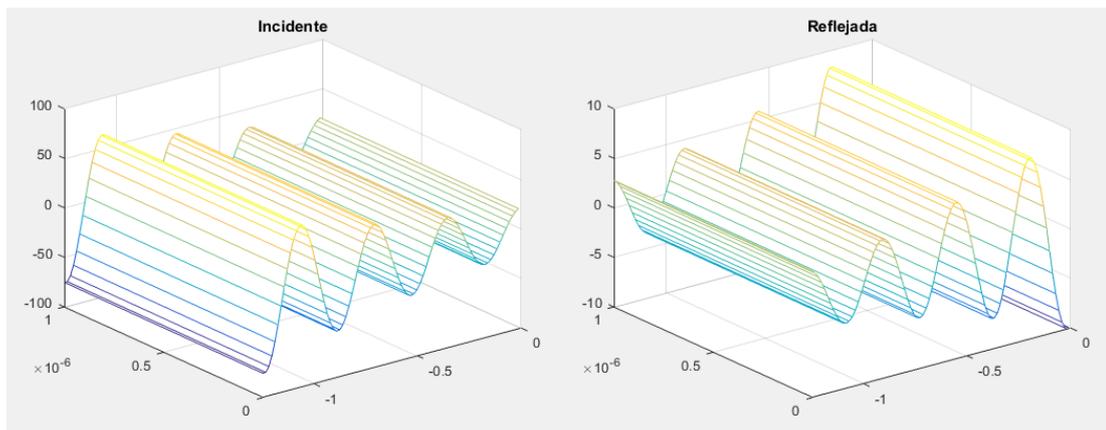


Figura 35: Onda incidente y reflejada en el retorno, simulación 2

En la figura 35, la señal que retorna al primer medio presenta pérdidas al propagarse en el segundo medio, se presenta nuevamente una reflexión al pasar la señal al primer medio. La señal reflejada corresponde a un valor aproximado de la mitad de la onda incidente, debido a que se presenta el mismo índice de reflexión que para el caso 1. se evidencia en la figura 35,

además de las pérdidas en el medio, una gran parte de la señal es reflejada al pasar del suelo al aire.

- Segunda simulación: señal recibida en la antena

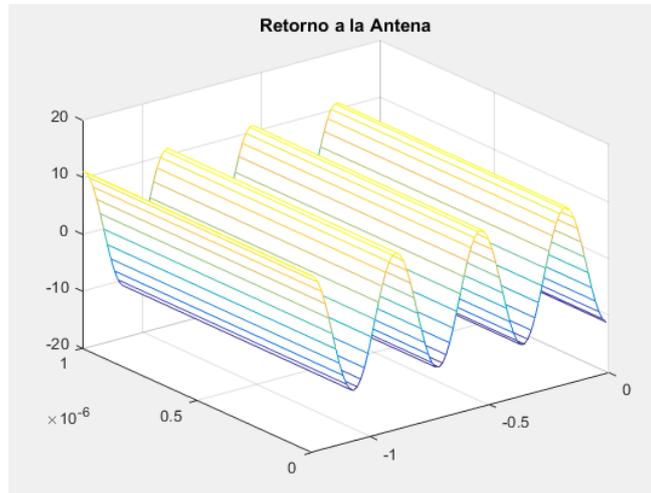


Figura 36: Señal que recibe la antena, simulación 2

La figura 36 muestra la señal que logra regresar a la antena, el valor de amplitud de la señal se redujo considerablemente en comparación con la señal transmitida originalmente, sin embargo, se logró obtener un mejor resultado que en la simulación 1, al haber variado el ángulo con el que se transmitió la señal originalmente.

3.4 Cuarta Etapa: Documentación de resultados

La última etapa corresponde al último objetivo específico del proyecto e incluye la elaboración de los entregables, la presentación y análisis de los resultados. El análisis de resultados será realizado para responder a cada una de las hipótesis planteadas en el capítulo 1 del documento.

Las actividades que fueron realizadas para poder concluir la última etapa son las siguientes:

- Registrar y analizar los resultados de las simulaciones.
- Elaborar las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

- Elaborar un artículo para su publicación.

3.4.1 Documentos Entregables

Los avances y resultados del proyecto podrán ser verificados y evaluados por medio de los siguientes documentos entregables:

- Documento de Diseño de la Antena: Es el documento técnico que incluye los requerimientos, detalles, esquemas e información técnica relacionada al diseño de la antena fractal.
- Documento de simulación y pruebas: este documento contiene el análisis y los resultados de las simulaciones realizadas, además de la información recolectada (tablas, gráficas y análisis) durante el desarrollo de la prueba de campo para la antena construida.
- Documento final del proyecto de trabajo de grado: este documento es el producto final que se presenta a la comunidad académica luego de finalizar todas las actividades requeridas para el desarrollo del proyecto.
- Artículo de publicación: una publicación académica para presentar el desarrollo de la investigación y sus resultados a la comunidad, el cual formara partes de las bases de datos e información que posee la universidad.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto proporcionarán una referencia valiosa para cualquier institución u organización que esté interesado en los estudios de desminado humanitario, y en la mejora de los procesos para detección de minas antipersonal de fabricación artesanal.

La simulación del fenómeno físico realizada en este proyecto es uno de los temas que generalmente se omiten en las investigaciones de detección de minas ya que la mayoría están enfocados a la ejecución de pruebas prácticas de las antenas. Los resultados obtenidos en las simulaciones se presentan en correspondencia con cada una de las hipótesis planteadas al principio del documento.

4.1 Resultados obtenidos para la primera hipótesis

Las simulaciones realizadas en la sección 3.3.5 permitieron validar la potencia recibida en la mina y la potencia que regresa a la antena para las diferentes frecuencias de resonancia de la antena fractal. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 9 para la simulación del primer circuito y su respectivo circuito de retorno.

Tabla 9: Resultados simulación circuito 1

Circuito	Frecuencia (GHz)	Valor máximo de potencia en la mina (uW)	Valor máximo de potencia regresa a la antena (pW)
Circuito 1 transmisión y retorno de la señal	1.35	29.76	74.5
	1.65	2.46	1.93
	1.85	1.42	0.66
	2.25	0.12	0.019
	2.70	0.035	0.00188
	2.95	0.027	0.000787

La figura 37 compara los valores de potencia presentados en la tabla 9 para las diferentes frecuencias a las que irradia la antena en el primer circuito.

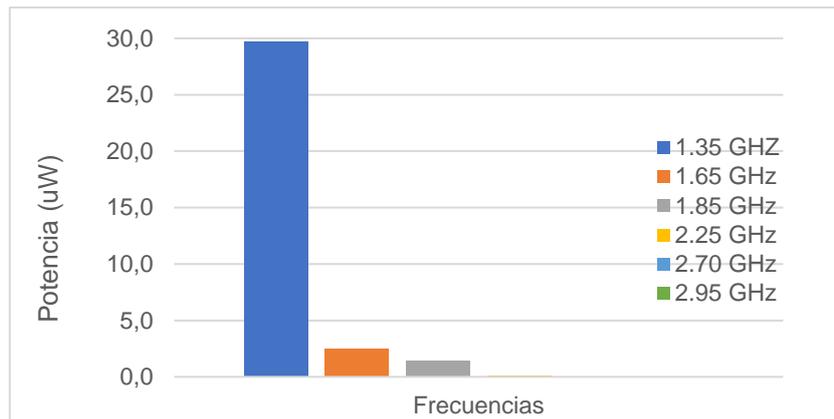


Figura 37: Potencia recibida en la mina, circuito 1

La tabla 10 presenta los valores de potencia obtenidos en la mina y la potencia que regresa a la antena en la simulación para el segundo circuito y su respectivo circuito de retorno.

Tabla 10: Resultados simulación circuito 2

Circuito	Frecuencia (GHz)	Valor máximo de potencia en la carga (uW)	Valor máximo de potencia regresa a la antena (pW)
Circuito 2 transmisión y retorno de la señal	1.35	2.36	0.46
	1.65	0.36	0.053
	1.85	0.22	0.012
	2.25	0.02	0.00046
	2.70	0.005	0.0000385
	2.95	0.004	0.0000164

La figura 38 compara los valores de potencia presentados en la tabla 10 para las diferentes frecuencias a las que irradia la antena en el segundo circuito.

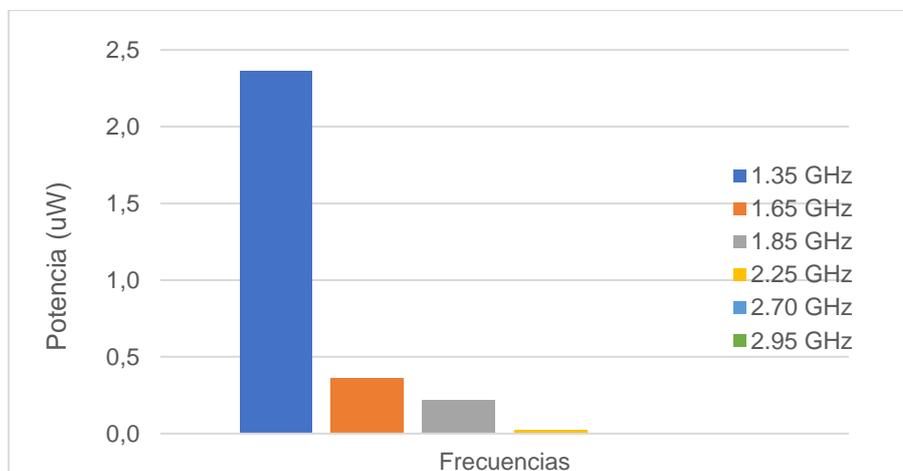


Figura 38: Potencia recibida en la mina, circuito 2

4.4.1 Análisis de resultados para la hipótesis 1

Al comparar los valores obtenidos se confirma que el circuito 1 que corresponde a la primera muestra de suelo es el que obtiene los mayores valores de potencia en la señal tanto en la carga como en la antena con la señal de retorno.

Realizar pruebas con una antena multibanda brinda la oportunidad de obtener diferentes resultados y compararlos para identificar la frecuencia de operación que sea más adecuada. Esta característica de la antena fractal aumenta las posibilidades de realizar una detección, ya que una única frecuencia no podrá dar siempre los mejores resultados. Además, como se puede evidenciar al comparar los resultados de las tablas 9 y 10, un cambio en la variación de las propiedades del suelo puede afectar en gran medida la cantidad de potencia que logra llegar a la carga y reflejarse a la antena, por lo tanto, en un escenario real donde las propiedades del suelo y la profundidad de la mina pueden variar, resulta conveniente hacer uso de una antena multibanda, para tener más posibilidades de una detección.

Para que la señal reflejada que llega a la antena pueda ser utilizada por un sistema de GPR en general, el valor la potencia recibida debe ser superior al valor de potencia térmica que fue calculado al final de la sección 3.3.5 que tiene un valor de 21.6 pW. Por lo tanto, se concluye que si se logra realizar la detección de la mina solo en la frecuencia de 1.35 GHz para el primer circuito, en todas las demás frecuencias la señal que llega es demasiado débil para ser detectada.

4.2 Resultados obtenidos para la segunda Hipótesis

La segunda hipótesis propone el rango de frecuencia de la microondas como la más adecuada para ser utilizada en la detección. Al comparar las pruebas realizadas por diversos investigadores como se presentó en la sección 1.3 del documento, se evidencia que las antenas utilizadas también corresponden al rango de la microondas (300 MHz – 30 GHz).

4.2.1 Análisis de resultados para la hipótesis 2

La principal razón por la cual se utiliza este rango es que las frecuencias más altas permiten una mejor resolución en el GPR, aunque la señal no logre

alcanzar mucha profundidad. Ya que las minas antipersonal no son enterradas a grandes profundidades porque disminuiría la potencia de la explosión, las frecuencias por debajo del rango de la microondas no son adecuadas para la detección de minas.

Sin embargo, hay que considerar que el rango de la microondas es bastante amplio y no todo el rango es adecuado para ser utilizado en la detección minas, como se comprobó en las simulaciones realizadas con las frecuencias mayores a 1.35 GHz no se logra realizar la detección. Por lo tanto, se puede concluir que las frecuencias mas adecuadas para ser utilizadas en la detección de minas si se encuentra dentro del rango de las microondas, pero no todo el rango de las microondas se puede utilizar para este propósito.

Determinar un rango exacto para ser utilizado en la detección de minas no es posible para este estudio, ya que o forma parte de los objetivos propuestos, además en la detección se ven involucrados varios factores como las propiedades del suelo que son muy variables, además de las características de las antenas utilizadas y el material de fabricación de la mina. Por lo tanto, se sugiere profundizar este tema como parte de trabajos futuros en diferentes tipos de suelos y para un mismo tipo de mina.

4.3 Resultados obtenidos para la tercera hipótesis

Para comprobar la tercera hipótesis se van a analizar los resultados obtenidos en la sección 3.3.6 en la cual se simulo la propagación de la señal por medio del software Matlab. La figura 39 muestra las señales recibidas en la antena, en la derecha se aplicó el ángulo de Brewster que corresponde a 70.47° y en la izquierda la antena se encontraba normal a la superficie.

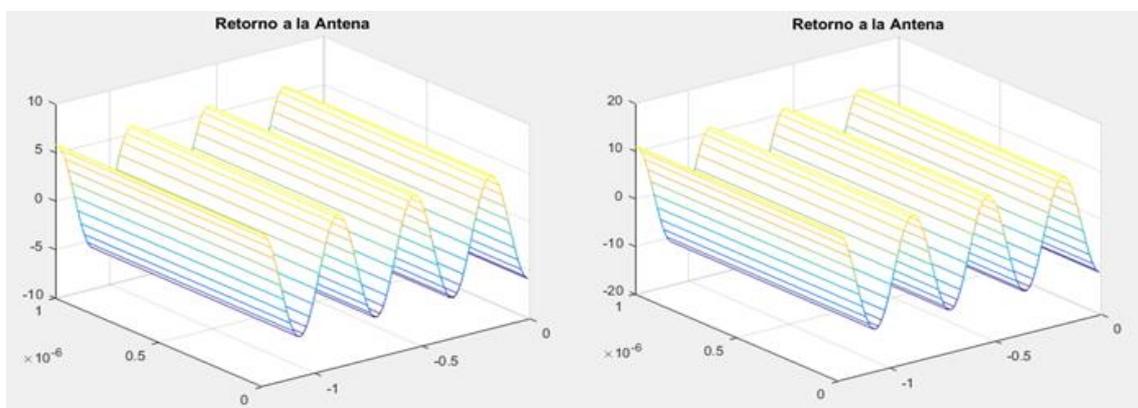


Figura 39: Señal recibida en la antena para ambas simulaciones

4.3.1 Análisis de resultados para la hipótesis 3

Los resultados obtenidos para ambas simulaciones muestran valores de amplitud muy pequeños en comparación con la señal transmitida originalmente por la antena esto se debe principalmente a las pérdidas generadas al propagarse la señal por el segundo medio que afecta tanto la onda que incide en la mina como la que se refleja de esta.

Se pudo evidenciar que la variación del ángulo en la antena por el ángulo de Brewster si logra aumentar la amplitud de la señal que llega a la antena receptora del GPR, siendo casi el doble de la amplitud que se obtuvo al no aplicar el ángulo. No se realizaron simulaciones con otros ángulos ya que la teoría indica que es el ángulo de Brewster el que permite obtener un coeficiente de reflexión cero y por lo tanto es el mas adecuado para ser utilizado.

Todos los resultados Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación del ángulo de Brewster para reducir la reflexión de la señal que se presenta al pasar del aire al suelo si permitió recibir una señal de mayor amplitud en la antena receptora, por lo tanto, podemos afirmar que la tercera hipótesis es correcta.

Conclusiones

- El mayor desafío para lograr una detección de una mina de envase de plástico, radica en las propiedades eléctricas del suelo ya que genera grandes índices de reflexión y refracción al pasar la señal desde el aire al suelo, propagarse, y viceversa, además de las pérdidas por el dieléctrico.
- Las frecuencias más bajas logran obtener una mayor cantidad de potencia en la señal que se refleja y regresa a la antena receptora, del sistema de GPR.
- La característica multibanda de la antena fractal puede aumentar la capacidad de detección de un sistema de radar, al permitir comparar resultados con diferentes frecuencias.
- Cambiar el ángulo de incidencia de la señal por un ángulo de Brewster puede lograr que un mayor porcentaje de la señal sea transmitido al segundo medio.
- La caracterización y el modelamiento de la antena, los medios por los cuales se propaga la señal, y la mina, permitió identificar, entender y analizar el fenómeno físico.
- En la simulación realizada para la antena fractal la señal que se refleja de la mina a la antena cuenta con la potencia suficiente para ser captada por un sistema de GPR para el escenario de prueba propuesto, solo con la frecuencia de 1.35 GHz.
- Los resultados obtenidos con la antena fractal pueden variar en gran medida según las propiedades del suelo utilizado para la simulación.
- La simulación del fenómeno físico realizada en este estudio, representa una nueva forma en la que se pueden obtener y analizar los datos para los estudios de detección de minas antipersonal.

Recomendaciones y trabajos futuros

Basándose en los resultados obtenidos, los trabajos futuros sugeridos para los estudios relacionados con la detección de minas antipersonal son:

- Antes de realizar un proceso de detección con cualquier tipo de antena direccional, es recomendable realizar el cálculo de ángulo de Brewster para lograr que la mayor parte de la señal logre ser transmitida.
- El principio de autosimilaridad facilita la variación del ancho de banda de la antena, aumentando o reduciendo el número de iteraciones, se recomienda para trabajos futuros realizar pruebas con estas variaciones para simular la detección de una mina en diferentes profundidades, utilizando un suelo de propiedades homogéneas.
- Se recomienda para trabajos de investigación futuros, experimentar con distintos tipos de suelos y frecuencias para lograr una aproximación a los límites del rango de frecuencias que se puede utilizar para detección de minas de envase plástico.
- Se propone realizar una investigación detallada de los elementos más utilizados en los explosivos de las MAP, identificar sus propiedades eléctricas para realizar el análisis del fenómeno de reflexión del explosivo y contrastar los resultados con los obtenidos de la reflexión del envase plástico, de tal manera que se pueda aumentar la probabilidad de una detección acertada de una MAP.

REFERENCIAS

- [1] D. C. Gutiérrez Rueda, «La desegregación de las minas antipersonales, una guerra bajo tierra», jul. 2014, Accedido: feb. 24, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/12174>.
- [2] A. Castro Fonseca, «Diseño de antenas fractales para Televisión Digital en Cuba», Thesis, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, 2015.
- [3] M. P. Herrera Holguín y J. C. Inclán Luna, «Estudio y metodología de diseño de antenas utilizando Geometría Fractal (Antenas fractales)», oct. 2004, Accedido: feb. 24, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11124>.
- [4] A. Montoya Lince, «Antenas fractales: un paso en la evolución de las telecomunicaciones». 2012, Accedido: mar. 05, 2019. [En línea]. Disponible en: http://www.radiocomunicaciones.net/pdf/antenas_fractales.pdf.
- [5] C. Á. Figueroa Torres, «Investigación y análisis electromagnético de estructuras de antenas fractales de banda ancha», 2016.
- [6] A. Oltra González, «Diseño y construcción de una antena fractal multibanda para telefonía móvil celular», jul. 2009, Accedido: mar. 10, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/8066>.
- [7] I. Giannakis, A. Giannopoulos, y C. Warren, «A Realistic FDTD Numerical Modeling Framework of Ground Penetrating Radar for Landmine Detection», *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 9, n.º 1, pp. 37-51, ene. 2016, doi: 10.1109/JSTARS.2015.2468597.
- [8] S. H. Zainud-Deen, M. E. S. Badr, E. Hassan, K. H. Awadalla, y H. A. Sharshar, «Effects of Soil Physical Properties on Landmines Detection Using Microstrip Antenna as a Sensor», *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 7, pp. 13-24, 2009, doi: 10.2528/PIERC09012403.
- [9] O. Lopera, E. C. Slob, N. Milisavljevic, y S. Lambot, «Filtering Soil Surface and Antenna Effects From GPR Data to Enhance Landmine Detection», *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, n.º 3, pp. 707-717, mar. 2007, doi: 10.1109/TGRS.2006.888136.
- [10] E. D. J. Mendoza Patiño y L. E. Serrano Bernal, «Programación de una plataforma sdr (software defined radio) para la detección de minas antipersonas», 2014, Accedido: mar. 04, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/16514>.
- [11] C. Baer *et al.*, «Humanitarian Microwave Detection of Improvised Explosive Devices in Colombia», en *2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, sep. 2018, pp. 372-375, doi: 10.1109/ICEAA.2018.8520508.
- [12] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons., 2016.
- [13] Monitoring and Research Committee, ICBL, y CMC, «Landmine Monitor 2018». http://the-monitor.org/media/2918780/Landmine-Monitor-2018_final.pdf (accedido feb. 24, 2019).
- [14] Dirección para la Acción Integral contra Minas Antipersonal - Descontamina Colombia, «Desminado Humanitario». <http://www.accioncontraminas.gov.co/Paginas/AICMA.aspx> (accedido feb. 24, 2019).
- [15] Y. A. Pino Jaramillo, «Determinación de técnicas de detección de explosivos óptimas para el departamento de Antioquia», p. 75, 2009.

- [16] C. Serrano Cordero y O. Pérez Curutchet, «Análisis, diseño estructural y construcción de un dron para la detección de minas antipersona», sep. 2016, Accedido: mar. 03, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/102000>.
- [17] M. García Fernández, Y. Álvarez López, A. Arboleya Arboleya, y F. L. Las Heras Andrés, «Sistema de GPR embarcado en un UAV para la detección de objetos ocultos enterrados», 2018, Accedido: jul. 17, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/51029>.
- [18] H. P. Penagos, «GENERALIDADES SOBRE MINAS ANTIPERSONALES»:., p. 31, 2011.
- [19] B. Sai, I. Morrow, y P. van Genderen, «Limits of Detection of Buried Landmines Based on Local Echo Contrasts», 1998, [En línea]. Disponible en: <https://pe2bz.philpem.me.uk/Comm01/-%20-%20Ion-Photon-RF/-%20-%20Radar%20-%20-%20-%20GroundPen%20-%20-%20/Rpt-001/landmine.pdf>.
- [20] M. E. Piñeros Moreno y R. D. de J. Herrera Muriel, «Proyecto de factibilidad económica para la fabricación de bloques con agregados de plástico reciclado (PET), aplicados en la construcción de vivienda».
- [21] T. V. Mosquera Góngora, «Caracterización de las propiedades electromagnéticas de tres suelos en dos municipios antioqueños afectados por minas anti personas», abr. 2016, Accedido: mar. 03, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/4175>.
- [22] M. de la V. Pérez Gracia, *Radars de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2001.
- [23] F. Parrini *et al.*, «ULTRA: Wideband ground penetrating radar», oct. 2006, pp. 182-185, doi: 10.1109/EURAD.2006.280304.
- [24] I. Hertl y M. Strycek, «UWB antennas for ground penetrating radar application», en *2007 19th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications*, sep. 2007, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICECOM.2007.4544458.
- [25] G. Baker, T. Jordan, y J. Pardy, «An introduction to ground penetrating radar (GPR)», en *Special Paper of the Geological Society of America*, vol. 432, 2007, pp. 1-18.
- [26] D. Ayala-Cabrera, R. Pérez-García, J. Izquierdo, y M. Herrera, «Análisis de datos de GPR para la visualización de tuberías de sistemas de abastecimiento de agua», dic. 2011.
- [27] G. A. Ramírez Arroyave, «Diseño de una antena multibanda basada en fractales para redes móviles inalámbricas de banda ancha en las frecuencias de 0.9, 2.4 y 3.5 GHz», 2009.
- [28] V. F. Romero Romero, «Antena Fractal para sistemas de comunicaciones en la banda de 2.4 GHz», 2013.
- [29] V. H. Chahuilco Gálvez, «Diseño de antenas fractales para televisión digital para interiores y exteriores», *Pontif. Univ. Católica Perú*, sep. 2012, Accedido: mar. 10, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/1523>.
- [30] P. F. Solano Solano, «Mimetizar Antenas para Wireless», p. 79, 2015.
- [31] R. Kumar y P. Malathi, «On the Design of CPW- Fed Ultra Wideband Triangular Wheel Shape Fractal Antenna», p. 5, 2010.
- [32] A. Amini, H. Oraizi, y M. A. C. zadeh, «Miniaturized UWB Log-Periodic Square Fractal Antenna», *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, mar. 2015, doi: 10.1109/LAWP.2015.2411712.

- [33] D. A. Murillo Florez, «Estructura Caotica Y Fractal Del Hamiltoniano De Henon-Heiles», 2014.
- [34] L. F. Herrera Díaz y A. Conde, «Caos, fluidos y flujos», 2001, Accedido: jul. 18, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingainv/article/view/21355/22314>.
- [35] O. A. Vizcaíno Céspedes, «Estado del Arte tecnológico en la localización de tuberías de distribución de agua potable», Universidad de los Andes, 2010.
- [36] W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. 2003.
- [37] N. G. Mariño Freire, «Construcción de un prototipo para prácticas de propagación de ondas electromagnéticas en la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial», ene. 2015, Accedido: mar. 10, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/8598>.
- [38] C. A. Vila Burguete, «Simulacion de Zonas de Fresnel para Enlaces de Microondas Terrestres», may 16, 2005. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/vila_b_ca/ (accedido mar. 01, 2019).
- [39] W. Hayt y J. Buck, *Teoría electromagnética*, Séptima. McGraw-Hill, 2006.
- [40] H. Sierra Coley, «Análisis de la detección de minas mediante la técnica GPR “Ground Penetrating Radar”», *Instname Universidad Los Andes*, 2017, Accedido: ago. 18, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/13969>.
- [41] K. Takahashi, H. Preetz, y J. Igel, «Soil properties and performance of landmine detection by metal detector and ground-penetrating radar — Soil characterisation and its verification by a field test», *J. Appl. Geophys.*, vol. 73, n.º 4, pp. 368-377, abr. 2011, doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.02.008.
- [42] L. Cardona, J. Jiménez, y N. Vanegas, «CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EMPLEADOS EN LA FABRICACIÓN DE ARTEFACTOS EXPLOSIVOS IMPROVISADOS», *Rev. Colomb. Mater.*, vol. 0, n.º 5, pp. 13-19, may 2014.
- [43] Md. T. I. Huque, Md. K. Hosain, Md. S. Islam, y Md. A.-A. Chowdhury, «Design and Performance Analysis of Microstrip Array Antennas with Optimum Parameters for X-band Applications», *IJACSA*, vol. 2, 2011.
- [44] A. F. Alsager, «Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna Arrays», p. 80, 2011.
- [45] M. Sadiku, *Elementos de Electromagnetismo*, Tercera edición. 2003.
- [46] C. A. Cadavid Suárez, E. Góez Suescún, y J. Machado Charry, «Caracterización y cuantificación de las áreas degradadas de las oficinas territoriales Cartama y Citara». 2005, [En línea]. Disponible en: http://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/SUELO/AIRNR_CN_5768_2004.pdf.

ANEXO 1: HERRAMIENTAS Y SOFTWARE UTILIZADOS PARA EL DISEÑO, CALCULO Y SIMULACIÓN DE LA ANTENA FRACTAL

Existen diferentes programas y aplicativos que pueden ser utilizados para realizar el diseño de la geometría fractal y la simulación de antenas, para nuestro proyecto decidimos utilizar tres programas: Autocad 2017®, CST Microwave Studio 2018®. Para el modelamiento y simulación de fenómeno físico los programas utilizados fueron Cadence AWR® y Matlab®. A continuación, vamos a describir algunas de sus principales funcionalidades y porque fueron necesarios en el desarrollo del presente trabajo.

CST Microwave Studio

Es una herramienta especializada para la simulación 3D EM de componentes de alta frecuencia. Permite un análisis rápido y preciso de dispositivos como antenas, filtros, acopladores, estructuras planas y de múltiples capas.

Es un programa muy completo con varias opciones para ajustar y presentar los datos. Dispone de una interfaz gráfica que permite generar todo tipo de superficies y volúmenes. Además, permite efectuar el análisis electromagnético de circuitos y dispositivos de microondas, con el cual se puede obtener una predicción adecuada del comportamiento para los campos eléctricos y magnéticos del dispositivo. La figura 40 muestra algunas antenas que fueron diseñadas y analizadas con este software, las cuales están incluidas en los tutoriales y ejemplos del mismo.

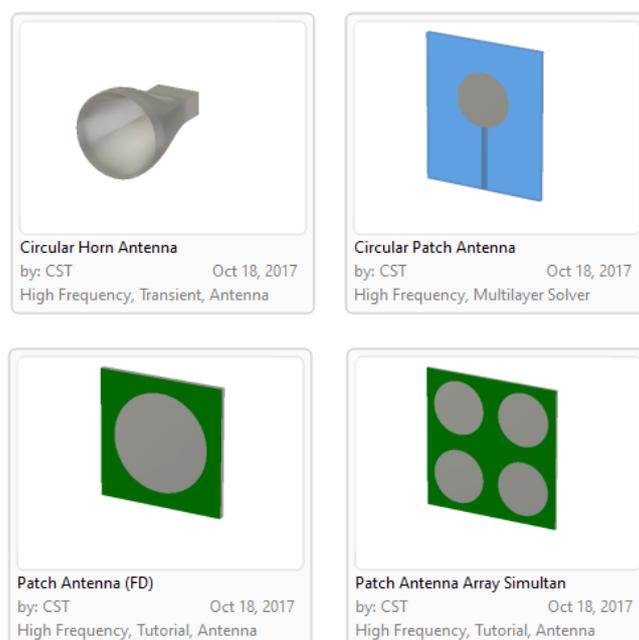


Figura 40: Ejemplos de antenas en CST

Las características y funciones de este software lo hacen adecuado para construir y simular antenas fractales ya que permiten personalizar las dimensiones y forma que tendría el parche en una antena de microstrip, lo cual no es posible en la mayoría de simuladores de antenas.

MATLAB

MATLAB (Matrix Laboratory), es un entorno matemático de computación y desarrollo de aplicaciones orientado para proyectos que requieran elevados cálculos matemáticos y su respectiva visualización gráfica. Esta herramienta integra análisis numérico, cálculo matricial, procesado de señal y visualización gráfica en un entorno muy completo. Algunas de sus aplicaciones más destacadas son:

- Analizar, visualizar y modelar datos y sistemas biológicos.
- Adquirir, procesar y analizar imágenes y videos para el desarrollo de algoritmos y el diseño de sistemas.
- Diseñar y simular redes eléctricas y sistemas de transporte.
- Diseñar, probar e implementar sistemas de control.
- Diseñar, codificar y verificar sistemas integrados.
- Analizar señales y datos de series de tiempo. Modelar, diseñar y simular sistemas de procesamiento de señales.
- Crear, diseñar, probar y verificar sistemas de comunicaciones inalámbricas.

Para el presente proyecto, este software permitió la simulación y análisis de la propagación de señal generada a través de los medios, permitiendo incluir y calcular las variables involucradas en el proceso como frecuencia, permitividad, coeficiente de reflexión, entre otras, para un algoritmo que grafica la señal que incide y se refleja en cada medio hasta el regreso de la señal en la antena receptora.

AutoCAD 2017

AutoCAD® es un software de diseño asistido por computadora (CAD) en el cual se apoyan tanto arquitectos como ingenieros y profesionales de la construcción para crear dibujos precisos en 2D y 3D. Algunas de sus principales características son:

- Crea, anota y edita geometría en 2D y modelos en 3D con sólidos, superficies y objetos de malla.
- Automatiza tareas tales como comparar dibujos, agregar bloques, crear planificaciones.
- Incluye características específicas de la industria y objetos inteligentes para arquitectura, ingeniería mecánica, diseño eléctrico y más.

El aporte de este software para el estudio realizado radica en la facilidad que brinda para realizar el plano con dimensiones acotadas de la antena fractal, el cual permitió construir con mayor precisión y facilidad la antena en el software de simulación.

Cadence AWR

La plataforma de software AWR proporciona un entorno intuitivo pero potente que da rienda suelta a la productividad de la ingeniería, lo que permite a los ingenieros abordar los desafíos de diseño de los sistemas de comunicación.

Integra tecnologías de simulación de circuitos, sistemas y EM, permitiendo a los diseñadores de circuitos de RF / microondas desarrollar especificaciones de componentes y analizar el rendimiento de los dispositivos. Se puede estudiar el comportamiento de la red lineal y no lineal (dominio de tiempo y frecuencia).

El uso de este software en el estudio realizado permitió construir los modelos circuitales de los elementos caracterizados para simular el fenómeno físico de la reflexión de la señal, de esta manera se logró medir la potencia recibida tanto para la mina como la antena en cada una de las diferentes frecuencias utilizadas.

ANEXO 2: PROTOCOLO DE SIMULACIONES PARA EL ANÁLISIS DEL FENÓMENO FÍSICO

En este protocolo se presenta el desarrollo de las simulaciones realizadas para verificar el funcionamiento de la antena diseñada, en el análisis del fenómeno físico. Los resultados obtenidos permitirán argumentar la utilidad de la antena para ser usada en el proceso de detección de artefactos explosivos en envases de plástico.

1. Requerimientos previos

Para poder realizar la simulación es necesario haber realizado previamente la caracterización de los medios en los cuales se va a propagar la señal transmitida por la antena, además de la caracterización de la mina y la antena como fuente del sistema. La sección 3.3 del documento, especifica las propiedades eléctricas de cada medio y los cálculos realizados para la obtención de los parámetros, que van a ser utilizados en la simulación.

Adicionalmente, para poder llevar a cabo las simulaciones, fue necesario familiarizarse previamente con las herramientas de software AWR® y Matlab®. Las características y aplicaciones de ambos softwares se encuentran especificadas en el Anexo 1.

2. Procedimiento

Las simulaciones realizadas constan de tres etapas, la primera consiste en el modelamiento de los medios como una línea de transmisión hasta una carga, en esta etapa se van a diseñar 4 circuitos en el software AWR para representar el proceso de transmisión y recepción de la señal, utilizando los diferentes tipos de suelo caracterizados.

La segunda Etapa consiste en las simulaciones de los circuitos realizando variación en la frecuencia de operación según las características de la antena diseñada. Los resultados obtenidos durante esta etapa determinarán la frecuencia de operación que se utilizara para la tercera etapa.

La última etapa consiste en las simulaciones de la propagación de la señal y el análisis del fenómeno de reflexión, por medio del software Matlab. Para esta etapa se realizaron dos simulaciones un considerando que la señal incide normal a la superficie y otra aplicando el ángulo de Brewster para reducir el índice de reflexión que se presenta al pasar la señal al segundo medio (suelo).

Etapa 1: Construcción de los circuitos equivalentes

Los pasos para el desarrollo de la primera etapa son:

1. Creamos un nuevo proyecto en el software AWR.
2. Incluimos los elementos del circuito que conforman las dos líneas de transmisión (los dos medios caracterizados).
3. Interconectamos los elementos del circuito según el modelamiento realizado en el capítulo 3.3 para cada medio.
4. Asignamos a cada elemento los valores calculados para cada medio (ver tablas 5 y 8), utilizando los valores del primer tipo de suelo.
5. Incluir un medidor para analizar la potencia en la carga del circuito.
6. Construimos un nuevo esquemático en nuestro proyecto y duplicamos el circuito ya construido, asignando los parámetros para el segundo tipo de suelo (ver tabla 8).
7. Construimos un nuevo esquemático, para simular el retorno de la señal desde la carga hasta la antena receptora. Se conservan los mismos elementos del circuito anterior pero ahora la carga va a actuar como fuente y la antena receptora la nueva carga.
8. Se duplica el circuito de retorno y se asigna al primero los parámetros del primer tipo de suelo y al segundo circuito de retorno los del segundo tipo de suelo.
9. Construidos los cuatro circuitos, se procede a la segunda etapa.

Etapa 2: Pruebas variando la frecuencia

Los pasos para el desarrollo de la segunda etapa son:

1. Seleccionar la primera frecuencia de simulación.
2. Ejecutar la simulación para el primer circuito.
3. Medir la potencia y el voltaje en la carga y graficar el resultado.
4. Asignar el valor de voltaje medido en la carga del circuito 1 para la fuente en el circuito de retorno 1.
5. Ejecutar la simulación para el circuito de retorno.
6. Medir la potencia en la carga, graficar el resultado.
7. Repetir los pasos del 1 al 6 con la siguiente frecuencia (ver tabla 2)
8. Registrar los resultados en la Tabla 9.
9. Repetir los pasos del 1 al 7 para el circuito2 y circuito de retorno 2.
10. Registrar los resultados del paso 9 en la Tabla 10.
11. Analizar los resultados obtenidos en las simulaciones para dar respuesta a las hipótesis planteadas y generar las conclusiones.

Etapa 3: Simulación de la propagación de la señal

Los pasos para el desarrollo de la última etapa son:

1. Identificar con base a los resultados de la etapa 2 la frecuencia de operación que presenta el mayor valor de potencia en la carga del circuito de retorno.

2. Construir en Matlab un script para simular la propagación de la señal a través de los medios, que genere la gráfica de la señal incidente y la señal reflejada en cada uno de los siguientes casos:
 - Caso 1: Al pasar la señal del aire al suelo.
 - Caso 2: Al pasar la señal del suelo a la mina.
 - Caso 3: Al para la señal del suelo al aire.
 - Caso 4: Señal que regresa a la antena.
3. Incluir en el script los valores de la impedancia característica de los medios y la mina de plástico calculados en la sección 3.3.6 para calcular y aplicar el coeficiente de reflexión a la señal.
4. Ejecutar el script de Matlab considerando que la señal incide normal entre los medios (90° respecto a la separación de los medios).
5. Registrar en el documento las gráficas generadas para cada uno de los casos.
6. Ejecutar el script de Matlab, modificando el ángulo de incidencia de la señal por el ángulo de Brewster que se calculó en la sección 3.3.6 del documento.
7. Registrar en el documento las gráficas generadas en la segunda simulación para cada uno de los casos.
8. Analizar los resultados obtenidos en las simulaciones para dar respuesta a las hipótesis planteadas y generar las conclusiones.

ANEXO 3: CONSTANCIA DEL INICIO DEL PROCESO PARA LA PUBLICACIÓN DEL ARTICULO

Como parte de los requerimientos de la institución para los trabajos de grado, el presente proyecto debe generar un artículo de publicación en una revista indexada, a continuación, se presenta una copia del correo recibido por la editorial para la revista INGENIERIA de la Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, a la cual se postuló el artículo.

Cristian Hernando Blanco Gomez:

Gracias por enviarnos su manuscrito "Diseño y simulación de una antena fractal para detección de minas antipersonal artesanales de envase plástico" a Ingeniería. El sistema de gestión de revistas online que usamos podrá seguir su progreso a través del proceso editorial identificándose en el sitio web de la revista:

URL del manuscrito: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/reving/authorDashboard/submission/17188>

Si tiene cualquier pregunta no dude en contactar con nosotros/as. Gracias por tener en cuenta esta revista para difundir su trabajo.

Nelson L. Diaz, PhD.

Revista INGENIERÍA

ISSN: 0121-750X E-ISSN: 2344-8393

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá-Colombia

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/issue/current>