

**Diseño, Simulación y Construcción de Antenas Vivaldi
Antipodal en la banda Super High Frequency "SHF" para
sistemas GPR**

Jorge Antonio Cabrales Guardo

Asesor: Fredy Enrique Segura Quijano

Co-Asesor: Juan Carlos Bohórquez

Tesis presentada para obtener el título de Magister en Ingeniería
Electrónica

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
BOGOTA
2012

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	7
1 OBJETIVOS	11
1.1 Objetivo General.....	11
1.2 Objetivos Específicos.....	11
1.3 Alcance y productos finales	11
2 GPR UWB	12
2.1 GPR.....	12
2.1.1 <i>Dominio de Frecuencia y de tiempo en GPR</i>	13
2.1.2 <i>Energía de radiación</i>	15
2.1.3 <i>Variables que afectan la resolución GPR y penetración de la energía</i> 16	
2.2 SFWC	18
2.2.1 <i>Resolución vertical y horizontal</i>	18
2.3 Ultra Wide Band.....	20
3 ANTENAS	21
3.1 Parámetros de radiación de una antena	21
3.1.1 <i>Directividad</i>	21
3.1.2 <i>Ganancia</i>	22
3.1.3 <i>Patrón de radiación</i>	22
3.1.4 <i>Coefficiente de reflexión</i>	22
3.2 Antena TSA (Tapered Slot Antennas)	23
3.2.1 <i>Antena Vivaldi</i>	24
3.2.2 <i>Antena vivaldi Antipodal</i>	24
3.3 Diseño de Microstrip	25
4 PARAMETROS Y DISEÑO DE LA ANTENA	28
4.1 Requerimientos de la antena	28
4.2 Diseño de la antena.....	29
4.2.1 <i>Diseño de la transición de alimentación</i>	31
4.2.2 <i>Diseño de la transición de Microstrip- Double-sided parallel-strip</i>	33
4.2.3 <i>Diseño de la zona radiante</i>	33

5	RESULTADOS	36
5.1	Geometría de la antena	39
5.2	Simulación en HFSS.....	36
5.3	Simulados y medidos para la Antena	40
5.4	Pruebas GPR SFCW	44
6	CONCLUSIONES.....	49
6.1	Trabajo futuro	50
7	REFERENCIAS.....	51

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1. Esquema básico de funcionamiento	8
FIGURA 2. Diagrama GPR Implementado	9
FIGURA 3. Bscan (Tomado de [14]).....	13
FIGURA 4. Opciones de diseño en GPR.....	14
FIGURA 5. Señal transmitida (Tomado de [1]).....	15
FIGURA 6. Huella de la antena	16
FIGURA 7. Banda para UWB por la FCC.....	20
FIGURA 8. Antena Vivaldi (Tomado de [18]).....	24
FIGURA 9. Antena vivaldi Antipodal (Tomado de [18])	25
FIGURA 10. Microstrip (Tomado de [2])	26
FIGURA 11. Líneas de campo de la Microstrip (Tomado de [2]).....	26
FIGURA 12. Geometría de la antena: 1) transición de alimentación. 2) transición de Microstrip- Double-sided parallel-strip. 3) zona radiante.....	30
FIGURA 13. a) Representación del plano, b) Antena Vivaldi Antipodal	31
FIGURA 14. Transición de alimentación	32
FIGURA 15. Stripline de doble cara paralela (Tomado de [21])	33
FIGURA 16. Curvas interiores.....	35
FIGURA 17. Fronteras Wave port y Bondaries	38
FIGURA 18. Microstrip Excitación Cuasi TEM	38
FIGURA 19. Dimensiones finales de la Antena Vivaldi Antipodal	39
FIGURA 20. S11 en el rango de [2 – 20] Ghz	40
FIGURA 21. Plano E y Plano H de la antena a) 3GHz, b) 5GHz y c) 9GHz. ((medido l. discontinuo) y simulado (l. continua)).....	42
FIGURA 22. VSWR	43
FIGURA 23. RETARDO	43

FIGURA 24. Resolución vertical y horizontal.....	45
FIGURA 25. a) Montaje 1 realizado para toma de datos, b) Esquema de distancias del montaje 1.	46
FIGURA 26. A scan –Diferentes pruebas, A) lámina grande en el piso , B) lámina grande sobre caja de tierra, C) lámina pequeña sobre caja bola, D) esfera dentro de la caja, E) lámina pequeña sobre tierra, F) lamina pequeña enterrado 1cm, G) lámina pequeña enterrado 1 cm con tapa en la caja	46
FIGURA 27. Montaje 2- realizado para toma de datos.....	47
FIGURA 28. A scan –placa metálica, arena – 3 cm.	48
FIGURA 29. B scan-placa metálica, arena – 3 cm	48

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla I. Requerimientos de la antena.....	28
Tabla II. λ -free , λ -microstrip y R-campo lejano.....	35
Tabla III. Dimensiones de la antena.....	38
Tabla IV. Parámetros de la Antena.....	40

INTRODUCCIÓN

La visualización de objetos enterrados (madera, rocas, tubos, agua, nieve, hielo, etc.) y la identificación de las capas del subsuelo por métodos no destructivos como el radar de penetración terrestre (GPR) es cada vez más importante alrededor del mundo dada su eficacia al caracterizar objetos de metal, PVC o cualquier otro material con dimensiones de hasta fracciones de centímetros, sin necesidad de realizar remoción de suelo en las zonas sometidas a estudio [1] . Este método se ha llevado a la práctica en diferentes ámbitos como la ingeniería civil, pruebas y vigilancia de las rutas de transporte (carreteras, ferrocarriles, puentes, túneles, etc.), la medicina, la protección del medio ambiente, las detecciones de minas antipersonales, entre otras,[3] -[8] , siendo su mayor ventaja la resolución con que pueden ser discriminados los objetos.

Cuando un GPR emite una onda hacia el suelo a través de una antena, los obstáculos en el camino de la propagación provocan reflexiones que se pueden percibir y analizar (ver FIGURA 1). La propagación de las ondas está gobernada por las ecuaciones de Maxwell y la mayoría de los medios geológicos están influenciados principalmente por la constante dieléctrica (ϵ_r) y la conductividad eléctrica (σ), mientras que la influencia de la permeabilidad magnética relativa es generalmente insignificante. Estos parámetros afectan tanto a la velocidad de propagación de la onda (v) como la atenuación de la energía (α) que son parámetros importantes en el diseño y el propio funcionamiento del sistema [3] .

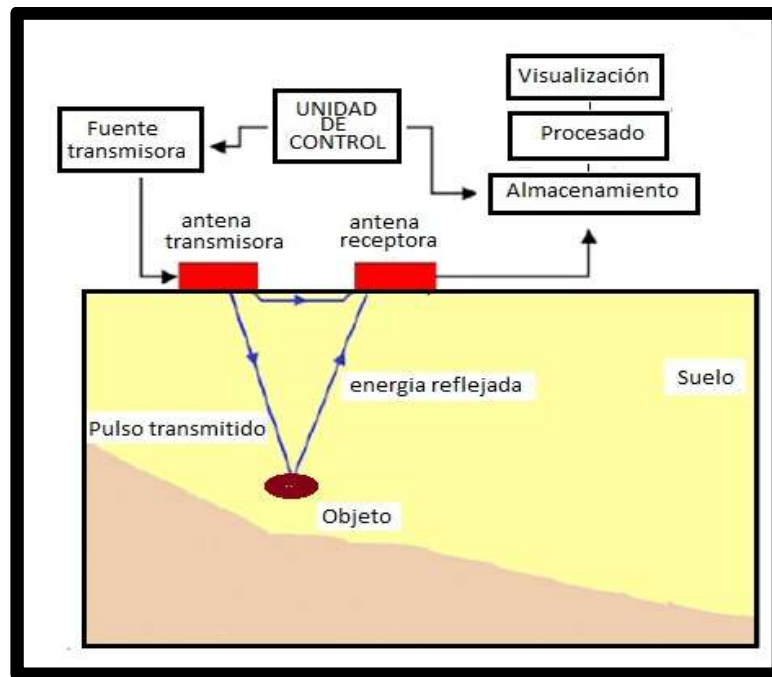


FIGURA 1. Esquema básico de funcionamiento

Se pueden encontrar versiones comerciales de software como REFLEX-WIN [9] , EKKO_MODEL [10] y GPRmax [11] que permiten realizar simulaciones de modelos geométricos basados en los materiales del subsuelo en el dominio del tiempo. Estos programas trabajan bajo condiciones ideales, sin embargo en la práctica, la dificultad del sistema radica en la interpretación de los datos recogidos, dado que las ondas son sensibles a las variaciones de la constante dieléctrica y conductividad del suelo o material a tratar. Dados los problemas de interpretación se hace interesante investigar acerca del desempeño de radares de penetración. En la facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica se reportan dos trabajos desarrolladas sobre el tema [13] .

Con base en los resultados de las referencias mencionadas anteriormente se encuentra la necesidad de diseñar y fabricar la una antena que permita mejorar la eficiencia del sistema de GPR SFCW implementado.

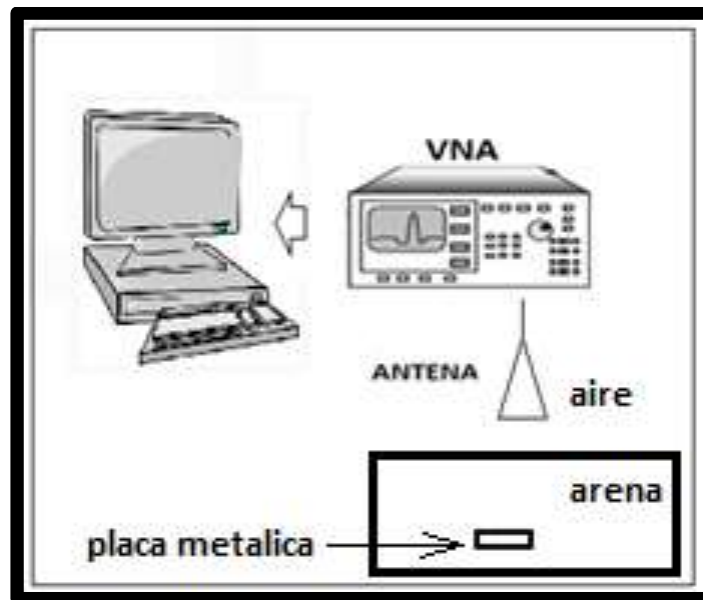


FIGURA 2. Diagrama GPR Implementado

En general, las antenas para aplicaciones de sistema GPR se pueden dividir en dos categorías: antenas con acoplamiento dieléctrico (incluye elementos de dipolo, antenas bowtie y espiral) y antenas con acoplamiento de aire (incluye, principalmente, antenas tipo horns y Tapered Slot Antennas (TSAs) y antenas Vivaldi).

Para antenas con acoplamiento dieléctrico, la energía electromagnética que penetra en el suelo es altamente dependiente de la altura de la antena sobre la superficie. Estos tipos de antenas no son adecuados para su aplicación en un sistema de detección de metal, dado que a medida que aumenta la altura, la energía que penetra en el suelo disminuye considerablemente perdiendo rango de detección. Por otra parte, las antenas por acoplamiento de aire no presentan variación de energía con el cambio de distancia sobre la superficie.

Con este aspecto se puede reconocer una alternativa la cual es la antena Vivaldi, que tiene una ganancia moderada, trabaja en UWB (ultra-banda ancha) y son económicas en su fabricación. Por estas razones el presente trabajo se enfoca en el diseño, simulación y construcción de una antena Vivaldi adaptable al sistema GPR implementado en los trabajos mencionados anteriormente.

Recientemente, se han desarrollado investigaciones de Antenas Vivaldi [15-18], que permiten observar un panorama sobre su uso y funcionamiento; por ejemplo: Bourqui [15] realiza un análisis de diferentes curvas de apertura para la antena, el material dieléctrico y la altura del sustrato basado en simulaciones; para una antena con dimensiones 133x250 mm en un rango de frecuencia de 2-20 Ghz. Rajaraman [16] construyó una antena antipodal balaceada, 3 capas de cobre y 4 capas de dieléctrico. El tamaño fue de 44x80 mm incluido el conector SMA en un rango de 2-12 GHz. Zhang [17] explica un arreglo de antenas Vivaldi para la detección del cáncer utilizando FR4 con una longitud de 73.4 x 41.9 mm en rango funcional de 5Ghz hasta 10 Ghz exceptuando una porción alrededor de 5,9 Ghz. Y Bai [18] presenta una modificación de la antena Vivaldi Antipodal para trabajar en el rango de 4-50 Ghz.

El presente documento, muestra el diseño de la antena Vivaldi construida en sustrato FR4 para UWB, en el rango de frecuencia de 3.1 a 10.6 GHz. La antena fue simulada y optimizada en el software Ansoft HFSS 12.1. Esta antena fue construida en el laboratorio de circuitos impresos de la Universidad de los Andes y se le realizaron pruebas utilizando un sistema de GPR basado en VNA para detectar una placa metálica.

1 OBJETIVOS

1.1 *Objetivo General*

Diseñar, Simular y construir una antena para sistema Radar de Penetración Terrestre (GPR) que permita la localización de objetos metálicos en un rango de 0 a 30 centímetros.

1.2 *Objetivos Específicos*

- Realizar el estudio teórico de arquitectura funcional del sistema GPR.
- Definir los requerimientos eléctricos para una antena que hace parte de un sistema GPR.
- Proponer, diseñar y desarrollar una estrategia para validar el funcionamiento de la antena.
- Utilizando equipos comerciales como por ejemplo el VNA, validar experimentalmente la arquitectura propuesta y su funcionalidad para detectar metales.

1.3 *Alcance y productos finales*

Se realizó el diseño de una antena de tecnología plana, específicamente una antena Vivaldi Antipodal cumpliendo con las recomendaciones por la FCC [12] para sistemas de radares terrestres UWB (Ultra wide-Band). Se simuló y se construyó una antena Vivaldi en FR4 mediante la realización de desempeño del sistema GPR detectando una placa metálica de 20 x 10 cm² a diferentes distancias (entre 30 y 70 cm) en aire y arena.

2 GPR UWB (Ground Penetrating Radar Ultra-wideband)

2.1 GPR

El radar de penetración terrestre (sigla en inglés GPR) es uno de los métodos de penetración de superficie que está ganando aceptación como un medio viable de estudio de campo en arqueología y otras ramas.

Se suelen recoger datos de GPR a lo largo de ubicaciones muy próximas entre sí dentro de una trayectoria. Es un método activo que transmite impulsos electromagnéticos de las antenas sobre la superficie (suelo), se mide el tiempo transcurrido entre el momento en que esta energía es transmitida, reflejada por los materiales enterrados, sedimentos o los cambios en el suelo, y finalmente recibida de vuelta en la superficie. A medida que los impulsos de radar viajan a través de diversos materiales, la velocidad de la onda cambia, dependiendo de las propiedades físicas y químicas del material a través del cual se desplaza. Los tiempos de viaje de la onda se miden en nanosegundos.

La profundidad del radar depende en gran medida de dos factores: 1) la frecuencia de la antena que se utiliza y 2) las características del suelo sometido a reconocimiento, más específicamente su contenido de agua. Este segundo factor ha demostrado ser mucho más decisivo en la profundidad a la cual un pulso EM puede viajar y cuánta atenuación de energía se produce.

La forma de las ondas reflejadas que se reciben desde el interior de la tierra es digitalizada en una traza de reflexión, Ascan, y cuando se realiza un barrido horizontal a través de una trayectoria definida se produce un Bscan (ver FIGURA 3). Una cantidad considerable de muestras de reflexión son analizadas para producir imágenes de dos y tres dimensiones de lo que está por debajo de la superficie.

Un equipo básico de GPR consta de una unidad de control central, una o varias antenas conectadas a ella y un sistema de visualización de datos. La unidad de control controla la emisión, la recepción y el registro de la energía de la onda (ver FIGURA 2).

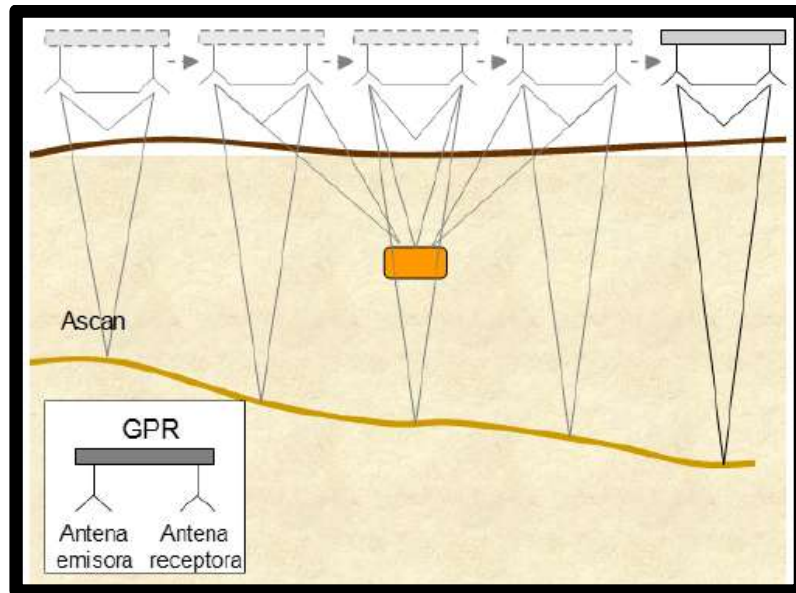


FIGURA 3. Bscan (Tomado de [14])

2.1.1 Dominio de Frecuencia y de tiempo en GPR

Básicamente, los sistemas GPR se pueden clasificar en dos categorías: dominio de la frecuencia y el dominio del tiempo [1] , (ver FIGURA 4).

GPR - SFCW es un buen ejemplo de la utilización de geo-radar directamente en el dominio de la frecuencia. Dicho sistema utiliza un sintetizador de frecuencia para explorar a través de una gama de frecuencias igualmente espaciadas por un intervalo de frecuencia Δf . En cada paso de frecuencia, una onda continua se irradia en el suelo a través de la antena Tx y la señal reflejada es recogida por la antena Rx (si el sistema GPR es de dos o más

antenas; si el sistema solo tiene una antena esta transmite y recibe en intervalos de tiempos). La señal recibida contiene la combinación de las reflexiones de la interface aire-suelo y de cualquier objeto enterrado.

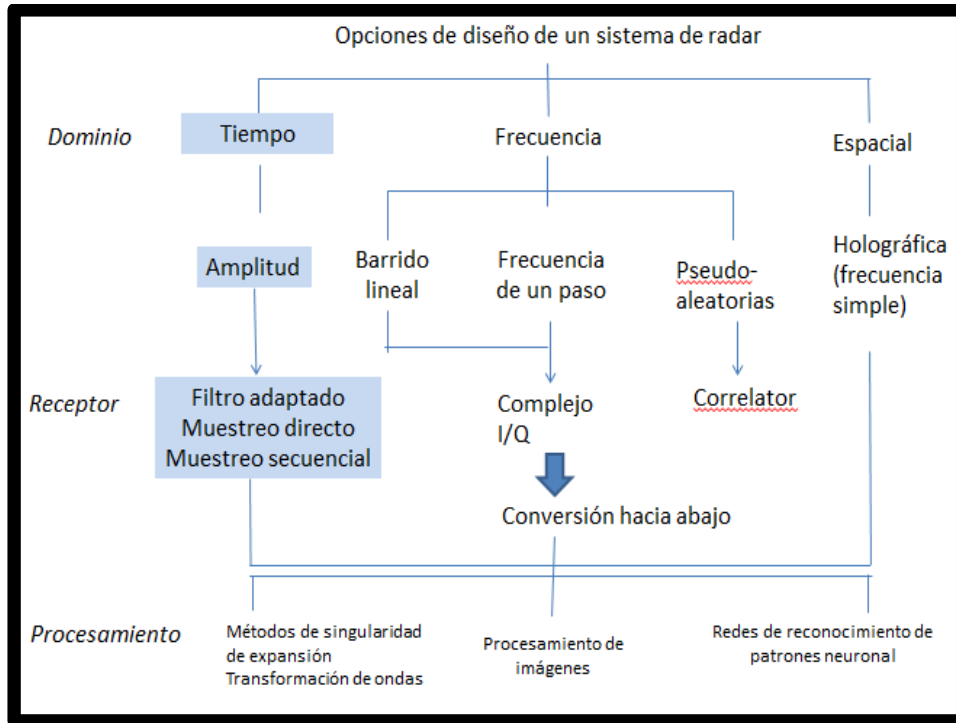


FIGURA 4. Opciones de diseño en GPR

En el dominio del tiempo, el GPR envía un pulso transitorio al suelo y luego recibe los ecos que contienen la información de las propiedades eléctricas del subsuelo. La duración del pulso enviado por el GPR debe ser tan corta como sea posible para un ancho de banda suficiente (resolución de buena profundidad). Comúnmente se utilizan formas de impulso como: un pulso gaussiano, un monociclo gaussiano [1] o Ricker [3], (ver FIGURA 5). Es importante que no exista un componente DC en el pulso de transmisión, de lo contrario, la antena se cargará en cada ciclo de impulsos, causando distorsión en la señal y la eficiencia de radiación se degrada.

En los últimos años, se ha convertido en práctica generar pulsos de precisión muy estrechos con tiempos de duración del orden de 100 pico segundos [8] .

Estos pulsos cortos de tiempo de duración puede alcanzar fácilmente la banda ultra ancha (UWB) para la categoría de alta resolución GPR con un ancho de banda fraccional mucho más grande que el 100%. Una ventaja del GPR de impulso es que las señales recibidas se pueden procesar directamente en el dominio del tiempo [1] , evitando el procedimiento de la transformada de fourier requerido para GPR por SFCW.

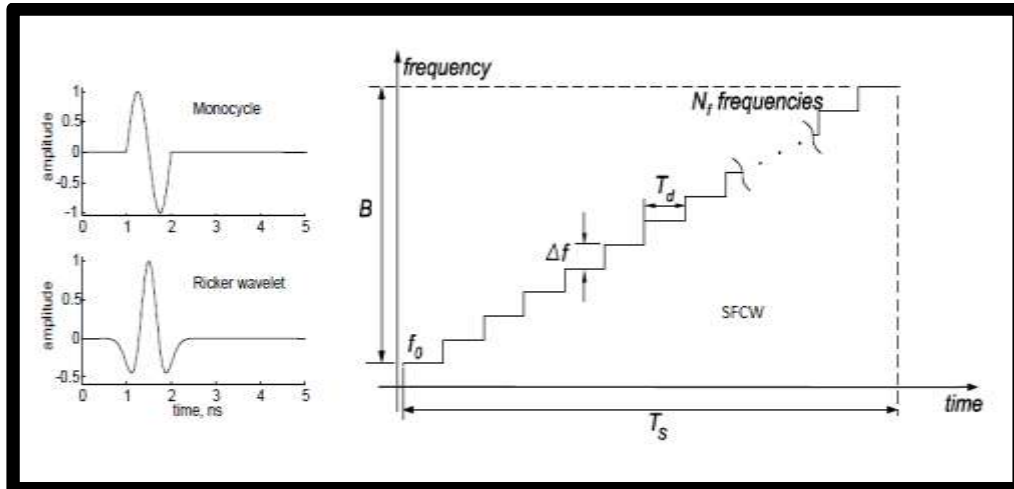


FIGURA 5. Señal transmitida (Tomado de [1])

2.1.2 Energía de radiación

Hay una idea errónea de que la energía radiada por la antena del GPR es un haz de línea. De hecho, las ondas de la energía radiada GPR estándar de antenas comerciales de radar irradian en el suelo es un cono elíptico con el vértice del cono en el centro de la antena transmisora. Cuanto mayor sea la constante dieléctrica (ϵ_r) del material a través del cual pasa la energía, menor

será la velocidad que transmite de la energía del radar, y convierte menor apertura del cono del patrón de radiación, ver FIGURA 6.

Una estimación de este patrón de radiación es importante en el diseño de esparcimiento de las muestras dentro de la trayectoria, en general, el ángulo del cono, y por lo tanto el tamaño de la huella, varía como función de la constante dieléctrica (ϵ_r) del material a través del cual pasan las ondas, y la frecuencia de la energía del radar emitida desde la antenna.

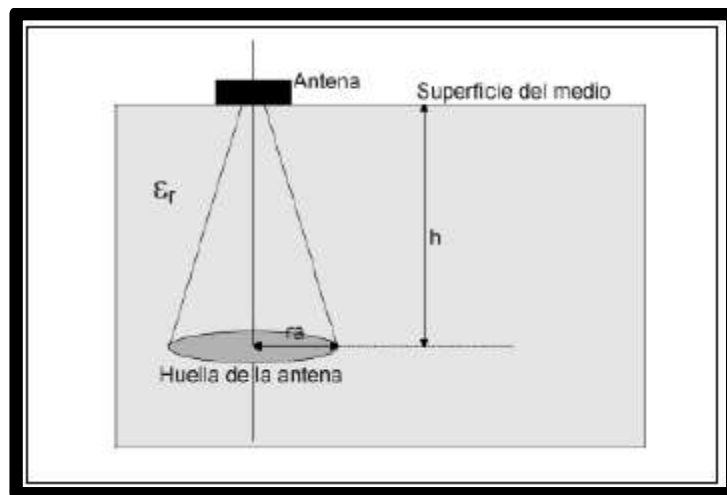


FIGURA 6. Huella de la antena

2.1.3 Variables que afectan la resolución GPR y penetración de la energía

La profundidad máxima efectiva de penetración de las ondas GPR es una función de dos factores principales: 1) la frecuencia de las ondas que se propagan en el suelo, y 2) las características físicas del material a través del cual pasan.

Las propiedades físicas que afectan a las ondas de radar a medida que viajan a través de un medio son la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética. Los suelos, los sedimentos o rocas que son dieléctricos permiten el paso de una gran cantidad de energía electromagnética, sin disiparla.

En un medio eléctricamente con alta conductividad incluyen aquellos que contienen agua salada y algunos que tienen ciertos tipos de arcilla conductora, sobre todo si es arcilla húmeda, en este tipo de suelos, la energía del radar se verá atenuada a poca profundidad. Otros minerales en el suelo, especialmente los que se puede disolver en agua, crean iones libres, los cuales permiten una mayor conductividad eléctrica. Los sulfatos, carbonatos, hierro, sales de todo tipo y de cualquier otra especie elementales cargadas de minerales va a crear una base de alta conductividad y atenúan fácilmente la energía del radar a poca profundidad.

Bajo condiciones muy desfavorables de humedad (con agua ligeramente salina), un sedimento calcáreo o suelos que contienen determinados minerales ricos en arcilla, la profundidad máxima de penetración GPR en el suelo puede ser mucho menos de un metro, no importa la frecuencia la que se utiliza la antena.

La permeabilidad magnética también afecta a la penetración del radar en un medio. La mayoría de los suelos y los sedimentos son sólo ligeramente magnéticos y por lo tanto normalmente tienen una baja permeabilidad magnética. Cuanto mayor es la permeabilidad magnética, la energía electromagnética será más atenuada durante su transmisión, y cuando esto ocurre la parte magnética de la onda EM se destruye, al igual que con la conductividad eléctrica mayor el componente eléctrico se pierde. Los medios que contienen minerales de magnetita, el cemento de óxido de hierro o

suelos ricos en hierro, todos pueden tener una alta permeabilidad magnética y por lo tanto van a transmitir poco la energía del radar.

La energía del radar no penetra el metal. Un objeto metálico refleja toda la energía del radar que incide sobre ella. Los objetos metálicos enterrados son bastante fáciles de ver en los perfiles de reflexión GPR porque generalmente crean múltiples reflexiones apilados uno encima del otro por debajo del objeto de metal.

Una de las variables más importantes en GPR es la selección de antenas con la frecuencia de funcionamiento correcta para la profundidad necesaria y la resolución de las características de interés.

Algunos de los factores importantes que deben ser considerados en la elección de la frecuencia de la antena son los siguientes: 1) las propiedades eléctricas del suelo en el lugar, 2) la profundidad de la transmisión del radar de la energía necesaria para estudiar las características de interés, 3) el tamaño y las dimensiones de los elementos que deben ser hallados, 4) Lugar de acceso, y 5) la presencia de posibles interferencias externas eléctrica dentro del espectro de frecuencias de la antena contemplan para su uso.

2.2 SFCW (Stepped Frequency Continuous Wave)

Los radares SFCW, también conocidos como radares en el dominio de frecuencia, transmiten y reciben trazas consecutivas de intervalos de frecuencias (Δf) en N pasos.

2.2.1 Resolución vertical y horizontal

La resolución vertical es la sensibilidad del equipo para distinguir dos señales adyacentes en el tiempo como eventos separados depende de la frecuencia

de la emisión utilizada y de la duración del pulso, para sistemas con SFCW se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta RV = \frac{c}{2N\Delta f} \quad (1)$$

Donde N es el número de puntos, Δf es el intervalo de frecuencia y c la velocidad de la luz.

La resolución horizontal se define como la capacidad del aparato para resolver un reflector y su geometría. Depende de la velocidad de desplazamiento de la antena y del número de pulsos emitidos por segundo, de la geometría del haz emitido (cono de emisión), de la sección eficaz del reflector (primera zona de Fresnel) y de la profundidad a la que se localiza el reflector. La velocidad de ubicación de la antena y el número de trazas son dos factores que se pueden controlar. No ocurre lo mismo con la geometría del haz emitido, que depende de las características de la antena y de la del medio. La resolución horizontal se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta Rh = R\theta \quad (2)$$

donde θ es el ancho de banda de la antena (en radianes) y R es la distancia del objetivo satisfaciendo la condición de campo lejano la cual es:

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3)$$

2.3 Ultra Wide Band

El termino Ultra Wide Band (UWB) se usa para hacer referencia a cualquier tecnología de radio que usa un ancho de banda mayor de 500 MHz o del 20% de la frecuencia central de acuerdo con la FCC (Federal Communications Commission) y UIT (International Telecommunication Union) [12] .

Mientras que Bluetooth, WiFi, teléfonos inalámbricos y demás dispositivos de radiofrecuencia están limitadas a frecuencias sin licencia en los 900 MHz, 2.4 GHz y 5.1 GHz, UWB hace uso de un espectro de frecuencia recientemente legalizado. UWB puede usar frecuencias que van desde 3.1 GHz hasta 10.6 GHz: una banda de más de 7 GHz de ancho de banda, ver FIGURA 7.

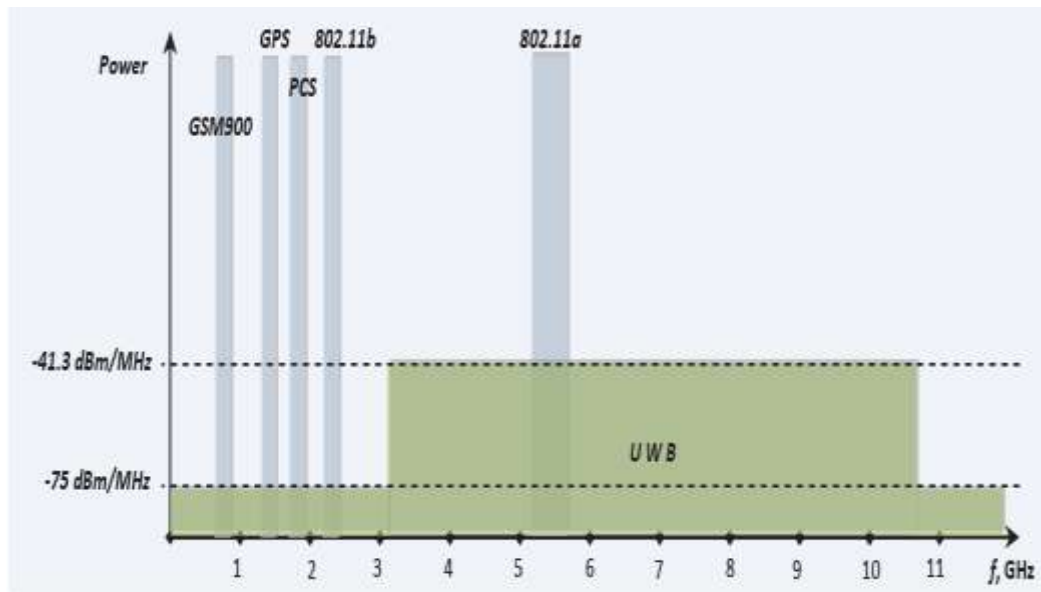


FIGURA 7. Banda para UWB por la FCC

3 ANTENAS

Las antenas son elementos esenciales, especialmente en sistemas UWB. Hay varias ideas genéricas para el desarrollo de antenas UWB como la longitud de onda, independiente de la frecuencia de resonancia, configuraciones eléctricamente pequeñas, array, etc...[6] Los tipos de antenas UWB pertenecen bicónicos, helicoidales, antenas bowtie, antenas rectangulares Loop y antenas Vivaldi.

3.1 Parámetros de radiación de una antena

3.1.1 Directividad

De acuerdo con las definiciones estándar de IEEE de los términos para las antenas (IEEE-1983) la directividad de una antena se define como "la relación de la intensidad de la radiación en una dirección dada desde la antena a la intensidad de la radiación media de todas las direcciones. La intensidad media de radiación es igual a la potencia total radiada por la antena dividida por 4π . Si la dirección no se especifica la dirección de la intensidad máxima de radiación que implica "[19] .

La directividad de la antena nos representa la energía radiada transmitida en una dirección específica, no implica ningún tipo de pérdida disipada por la antena.

$$D = \frac{4\pi}{\text{total input power}} = \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (4)$$

3.1.2 Ganancia

La ganancia de una antena se define como "la relación de la intensidad, en una dirección dada, a la intensidad de la radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena se radiada isotrópicamente" [19] .

$$Gain = 4\pi \frac{\text{radiation intensity}}{P_{rad}} \quad (5)$$

3.1.3 Patrón de radiación

Un patrón de radiación de la antena se define como "una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena como una función de las coordenadas espaciales" [19] . El patrón de radiación se mide en la región de campo lejano en la mayoría de los casos y las propiedades de radiación incluyen la densidad de flujo de potencia, la intensidad de la radiación, la intensidad de campo, directividad, fase o polarización " [19]. La propiedad de radiación más importante, sin embargo, es la distribución espacial de la energía radiada como una función de la posición observada a lo largo de una superficie de radio constante.

3.1.4 Coeficiente de reflexión

El coeficiente de reflexión S11 indica que tanto la antena se adapta con la línea de transmisión de entrada. Es un parámetro que determina como es la transición de la señal desde la línea de transmisión de entrada al espacio libre a través de la antena. Una antena se dice que está suficientemente

acoplada si el 10% o menos de la señal incidente se pierde durante el proceso de transición. El rango de frecuencias sobre el cual el coeficiente de reflexión de la antena S_{11} es -10dB o menos se dice que es el ancho de banda de impedancia de la antena. En este ancho de banda puede ser operado con la mínima potencia de reflexión y el máximo de radiación.

3.2 Antena TSA (*Tapered Slot Antennas*)

Son antenas integradas en sustratos dieléctricos que utilizan la propagación de onda a lo largo de su estructura para proveer una velocidad de fase menor que la velocidad de la luz [18] .

Estas antenas tienen especial interés en aplicaciones donde se requiere una directividad, de al menos 10dB , con anchos de haz desde los 12° hasta los 120° .

La necesidad de utilizar este tipo de antenas planas en estas aplicaciones es debida al tamaño que podemos obtener y su fácil fabricación, la desventaja de utilizar esta tecnología es la pérdida de eficiencia del lóbulo principal debido a la estructura abierta de las TSA [19] .

Esta familia de antenas planas puede ser dividida en dos grupos principales: las broadside y las end-fire. La antena broadside se caracteriza porque radia en la dirección perpendicular al plano de la antena, como por ejemplo la antena bowtie y la antena espiral de periodicidad logarítmica. Las antenas end-fire se caracterizan por que tiene patrones de radiación con el máximo de radiación en el plano de la antena, son de este grupo la LTSA (apertura lineal), la SWSA (apertura con ancho constante) y la Vivaldi (apertura exponencial).

3.2.1 Antena Vivaldi

La antena Vivaldi fue desarrollada por Gibson en 1978, [22] , como un elemento de antena plana con el cual se podía producir un haz simétrico en la salida, con una ganancia apreciable y con lóbulos laterales pequeños.

Esta antena consiste en un metal con una ranura que varía gradualmente de manera exponencial, esta antena es independiente de la frecuencia y una parte de la apertura exponencial es eficientemente radiante para una longitud de onda dada [20] , ver FIGURA 8.

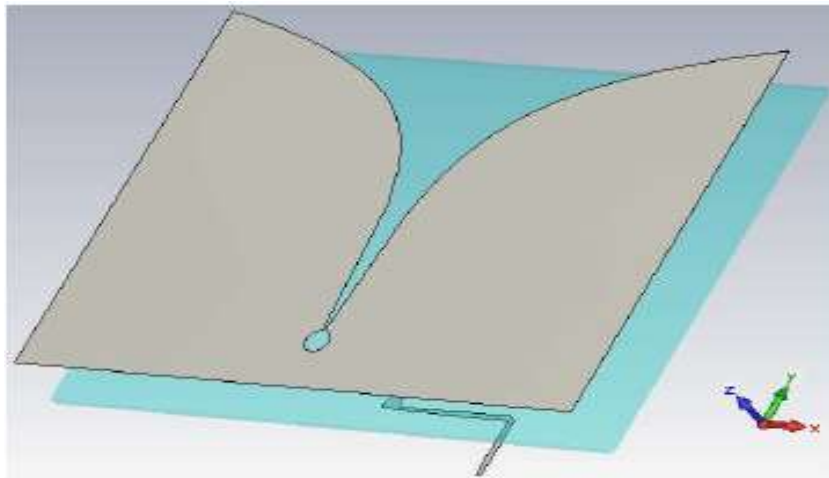


FIGURA 8. Antena Vivaldi (Tomado de [18])

3.2.2 Antena vivaldi Antipodal

Buscando una estructura de alimentación adecuada para la antena Vivaldi Gazit [23] propone la antena Vivaldi antipodal, la cual elimina la utilización del balun de la antena propuesta por Gibson, la transición de la microstrip a la slotline está realizada mediante una stripline paralela. La línea microstrip se usa como alimentación de entrada, la slotline tiene el propósito final de

radiar mientras que la strip sirve como región de transición, por lo que, afectará al comportamiento de la propia antena, ver FIGURA 9.

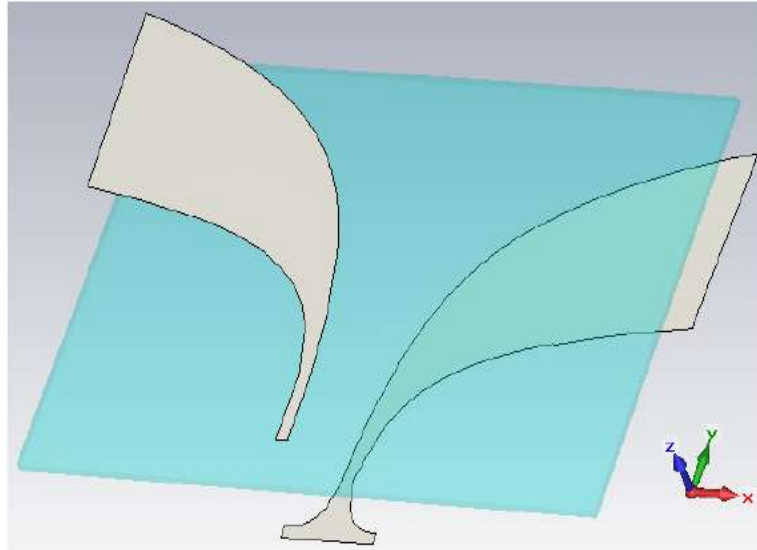


FIGURA 9. Antena vivaldi Antipodal (Tomado de [18])

3.3 Diseño de Microstrip

La antena Microstrip es la más popular de las antenas tipo planar, se utiliza en este proyecto como alimentación de entrada.

La geometría de la línea microstrip, es un conductor fino de anchura W impreso en un sustrato dieléctrico de grosor h y permitividad relativa ϵ_r , que por la otra cara tiene el plano metálico que actúa como plano de tierra.

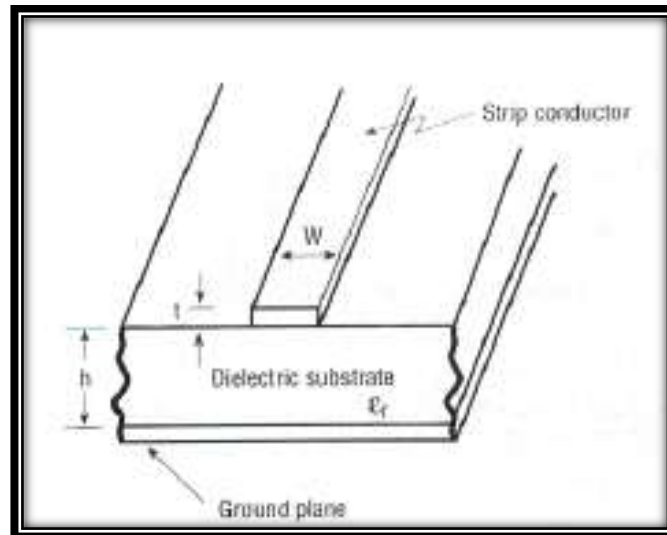


FIGURA 10. Microstrip (Tomado de [2])

La presencia del dieléctrico hace que la mayoría de las líneas de campo se concentren entre el conductor Strip y el plano de tierra [2] .

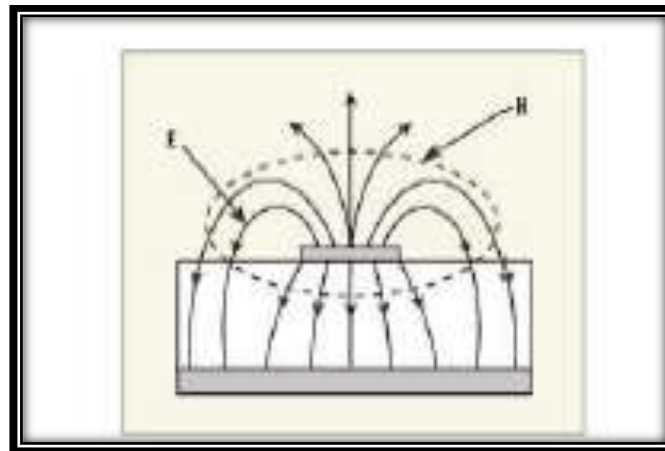


FIGURA 11. Líneas de campo de la Microstrip (Tomado de [2])

El cálculo de las dimensiones de la microstrip se realiza con base en las siguientes ecuaciones [2] :

$$\text{para } \frac{W}{h} < 2, W = \frac{8e^A}{e^{2A}-2} \quad (6)$$

$$\text{para } \frac{W}{h} > 2, W = \frac{2h}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (7)$$

$$A = \frac{z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (8)$$

$$B = \frac{377\pi}{2z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12\frac{h}{W}}} \quad (10)$$

Donde W es el ancho de la línea de la microstrip superior, h es el espesor del sustrato, ϵ_r es la constante dieléctrica del sustrato y ϵ_e es la permitividad dieléctrica efectiva de la línea de la microstrip.

La permitividad dieléctrica efectiva será menor que la del sustrato, la velocidad de fase y la constante de propagación:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (11)$$

$$\beta = K_0 \sqrt{\epsilon_e} \quad (12)$$

La longitud de onda de la microstrip será:

$$\lambda_m = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (13)$$

4 PARAMETROS Y DISEÑO DE LA ANTENA

4.1 *Requerimientos de la antena*

A continuación, se presentan los requerimientos definidos para el diseño de la antena cumpliendo con los estándares para UWB.

De acuerdo con la FCC y UIT-R [12], las antenas ultra-banda ancha (UWB) utilizan la banda por debajo de 900MHz y la banda de 3.1-10.6 GHz, con un ancho de banda mínimo de 500 MHz, o 20% de la frecuencia central y que emiten una densidad de potencia espectral por debajo de -41,25 dBm / MHz.

En la tabla I, se muestra las condiciones de diseño de la antena, la cual debe ser direccional para tener concentrada la energía de radiación. Si el VSWR es menor o igual a 2, el porcentaje de potencia entregada a la antena está

por encima del 89% y se considera que la antena está adaptada a la línea de transmisión conectada a ella.

Físico	<i>De dimensiones pequeñas y de bajo costo de fabricación</i>
Ancho de banda de funcionamiento	3.1-10.6 GHz
Impedance Bandwidth	<i>S11 < -10dB (3.1-10.6 GHz)</i>
Patrón de radiación	<i>Direccional</i>
Ganancia	3 – 10 dB
HPBW	40-120 deg
VSWR	<i><=2, en el rango de frecuencias deseado</i>
Grupo de retardo	<i>Valor similar en el rango de frecuencia</i>

Tabla I. Requerimientos de la antena

4.2 Diseño de la antena

La antena se compone principalmente de tres partes, la primera sección está formada por la microstrip cuya función principal es acoplar la impedancia a 50Ω y realizar la transición con una stripline de doble cara paralela (double-sided parallel-strip), cuya sección está unida con el conector SMA. La segunda parte, es la double-sided parallel-strip, la cual es una estructura equilibrada que proporciona una buena transición de ancho de banda. Y la última parte es la zona de radiación que está constituida por dos curvas exponenciales.

La antena contiene una ranura de abertura exponencial utilizada para lograr directividad. La estructura de radiación de la antena consta de dos brazos, superior e inferior, que se encuentran en los lados opuestos del sustrato (ver FIGURA 12). La alimentación de la antena se da por medio de una microstrip (50Ω) conectada al brazo superior, el plano de tierra tiene forma exponencial conectada con el brazo inferior para mejorar la adaptación de impedancia.

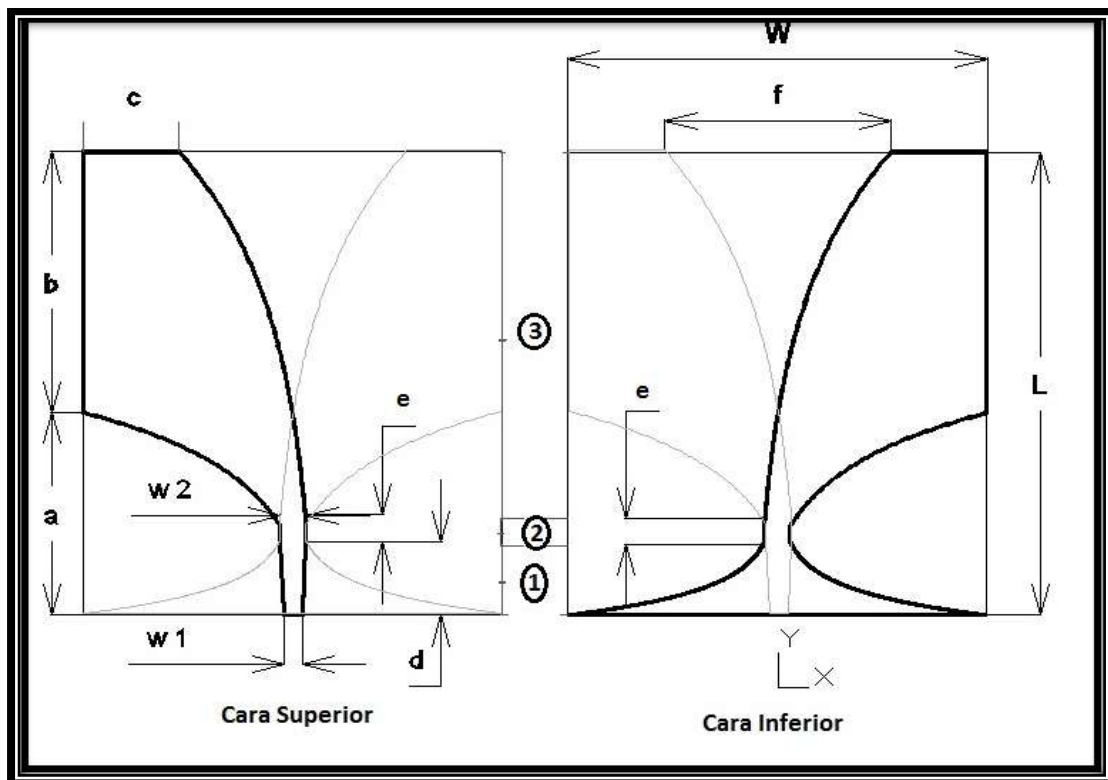


FIGURA 12. Geometría de la antena: 1) transición de alimentación. 2) transición de Microstrip- Double-sided parallel-strip. 3) zona radiante.

De acuerdo con la geometría de la antena el plano XY es plano E y el plano YZ es el plano H, mientras que la dirección de máxima radiación de la antena está a lo largo del eje Y ($\theta=90^\circ$, $\phi=90^\circ$) ver FIGURA 13.

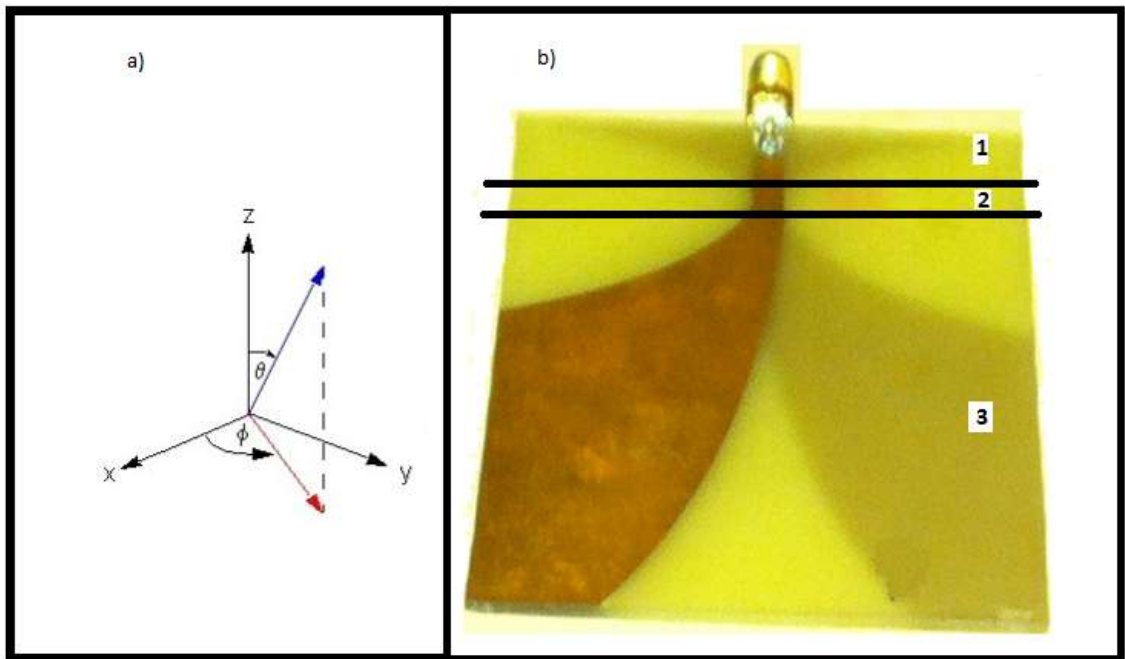


FIGURA 13. a) Representación del plano, b) Antena Vivaldi Antipodal

4.2.1 Diseño de la transición de alimentación

La geometría de la línea microstrip, es un conductor fino de anchura W , impreso en un sustrato dieléctrico de grosor h y permitividad relativa ϵ_r , que por la otra cara tiene el plano metálico que actúa como plano de tierra, parte número 1 de la FIGURA 12 comprendida por la longitud de la variable d .

El ancho de la línea de la microstrip y la stripline de doble cara se calculan basados en la teoría de líneas de transmisión presentada en Pozar [2].

El ancho de microstrip en el extremo inferior (ver FIGURA 14) es de 2.84 mm (w_1), se incrementa hasta 4.09 mm en el otro extremo (w_2) para conseguir un acoplamiento gradual de la impedancia con segunda parte de la antena.

Uno de los lados es impreso con una masa de cobre para ser la referencia de impedancia formando el plano de tierra, cuya forma de está basado en métodos empírico, Kim [21] . Debido al hecho que la anchura de tierra está cambiando junto con la transición, la impedancia característica de dicha estructura no se puede mantener constante con la longitud.

Las curvas del plano de tierra (Ground plane) fueron diseñas de acuerdo a Bancroft [20] que presenta el diseño de una antena Microstrip fed tapered Balun printed dipole (MFTBA), las ecuación implementada se muestra a continuación:

$$x = \pm D e^{-ay} \quad (14)$$

$$D = \frac{\lambda}{2} \quad (15) \quad a = \frac{-\ln(W^2/D)}{L_1} \quad (16)$$

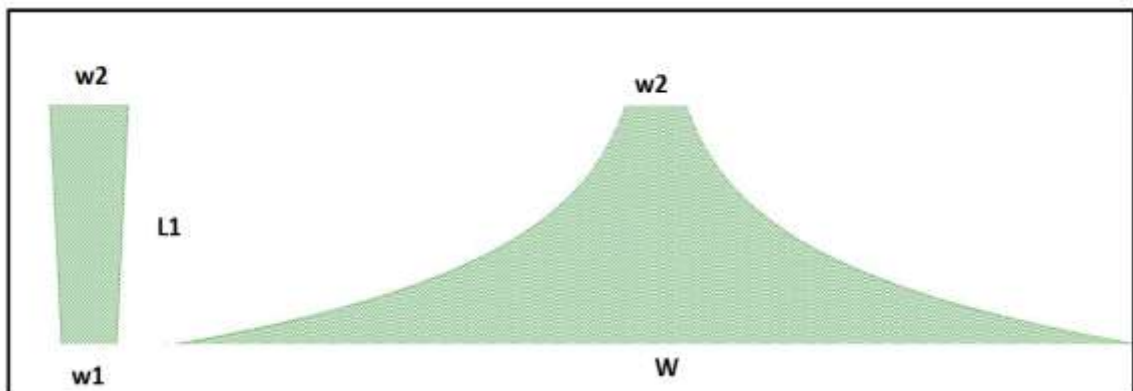


FIGURA 14. Transición de alimentación

4.2.2 Diseño de la transición de Microstrip- Double-sided parallel-strip

Una double-sided parallel-strip es una línea equilibrada, como se muestra en la FIGURA 15. La distribución del campo en esta línea se mantiene sin cambios, si un infinito conductor eléctrico perfecto se inserta en el centro del sustrato a una distancia $h/2$ y paralelo a las tiras, como resultado se transforma la Double-sided parallel-strip en una combinación de dos líneas microstrip idénticas colocadas de espaldas, Kim [21] .

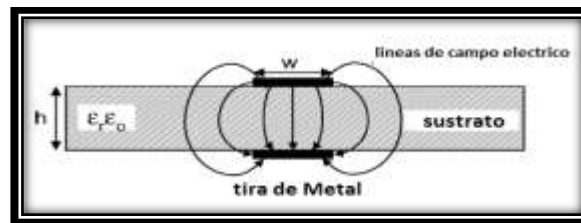


FIGURA 15. Stripline de doble cara paralela (Tomado de [21])

Por lo tanto, el diseño de la Double-sided parallel-strip está simplemente relacionada con el diseño de la línea microstrip, para el ancho W , tomando $h/2$ como el grosor del dieléctrico.

4.2.3 Diseño de la zona radiante

La parte radiante está compuesta por dos placas de cobre simétricas de forma exponencial que se encuentran a lados opuestos del sustrato. Las curvas de radiación internas son los principales contribuyentes de la radiación, es decir que actúan como la carga en un circuito y proporcionan la resistencia de radiación (ver zona 3 FIGURA 12).

Las curvas exponenciales de radiación nos proveen una variación de distancias que va desde el espesor del sustrato (mínima separación) hasta la distancia de la frecuencia de corte (máxima separación). La distancia entre ellas identifica la frecuencia de la radiación. La frecuencia depende de la longitud de onda de radiación y es formada debido a la separación entre las corrientes, ver FIGURA 16.

El principio de radiación de la antena Vivaldi se relaciona con la radiación de un dipolo, donde inicialmente la propagación de las ondas electromagnéticas es a través de la línea de transmisión (los cables conductores), llamadas guías de ondas y en el extremo abierto las líneas de ondas se separan permitiendo la propagación de la onda, Balanis [19] . Después de realizar simulaciones con diferentes ecuaciones se obtuvo un buen comportamiento de la antena con la ecuación planteada por Bancroft [20] , donde se muestra el diseño de una LTSA (exponentially tapered slot antenna). Las curvas interiores y exteriores utilizadas para el diseño son:

$$y = \pm Ae^{Bx} \quad (17)$$

$$A = \frac{W2}{2} \quad (18) \quad B = \frac{\ln\left(\frac{\lambda}{2/W2}\right)}{L-a} \quad (19)$$

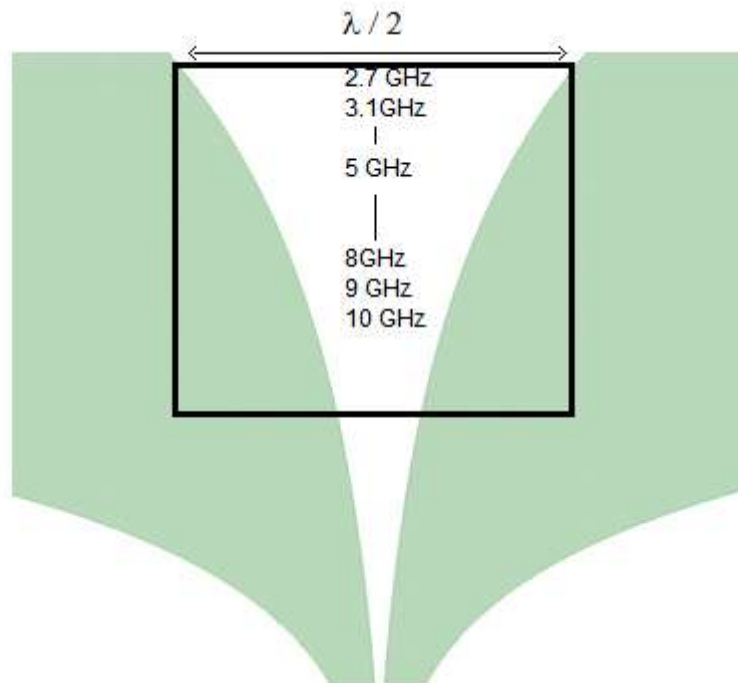


FIGURA 16. Curvas interiores

Las curvas interiores se definen de tal manera que tengan una relación de abertura a diferentes frecuencias, (ver FIGURA 16), determinada por la longitud media de la onda en el rango de frecuencias (ver tabla III, donde λ_m es la longitud de onda de la microstrip a diferentes frecuencias). La frecuencia límite inferior de este tipo de antena se determina por la abertura máxima de curva exponencial. Para el presente diseño se utilizó como frecuencia inferior 2.5 GHz. La apertura final de la antena construida fue definida por la optimización realizada en la simulación HFSS donde resultó como valor adecuado 35.85mm dando una frecuencia de corte de 2.75GHz a - 10dB de S11.

Frec.(GHz)	λ -aire (m)	$\lambda_m/2$ (m)	R, campo lejano (m)
0.5	0.5996	0.1643	0.004275
1	0.2998	0.0821	0.00855
1.5	0.1999	0.0548	0.012825
2	0.1499	0.0411	0.0170999
2.5	0.1199	0.0329	0.0213749
3	0.0999	0.0274	0.0256499
3.5	0.0857	0.0235	0.0299249
4	0.075	0.0205	0.0341999
4.5	0.0666	0.0183	0.0384749
5	0.06	0.0164	0.0427498
5.5	0.0545	0.0149	0.0470248
6	0.05	0.0137	0.0512998
6.5	0.0461	0.0126	0.0555748
7	0.0428	0.0117	0.0598498
7.5	0.04	0.011	0.0641248
8	0.0375	0.0103	0.0683997
8.5	0.0353	0.0097	0.0726747
9	0.0333	0.0091	0.0769497
10	0.03	0.0082	0.0812247

Tabla II. λ -free, λ -microstrip y R-campo lejano. ($\epsilon_r= 4,4$ y $h =1,575\text{mm}$)

5 RESULTADOS

5.1 Simulación en HFSS

Los diseños de antena no se rigen por fórmulas exactas por lo que es necesario utilizar un simulador que nos ayuda a entender el comportamiento de la antena modificando sus parámetros calculados, generalmente el resultado práctico real podría no ser el mismo que el calculado teóricamente, en este proyecto se utilizó el software HFSS de Ansoft para analizar el comportamiento de la estructura antes de su fabricación.

Para tener un resultado muy aproximado al real se realizaron muchas simulaciones variando la frecuencia de solución de la simulación, además se definieron rangos de frecuencias para disminuir el tiempo de simulación, se varia la caja de radiación en el simulador garantizando que cumpliera con los

mínimos requisitos del programa para una correcta simulación acorde a la frecuencia de simulación para no incrementar los tiempos de simulación.

Las principales configuraciones realizadas son:

- Simulación Driven terminal
- cobre 0.017mm grosor
- FR4
- Rango 2-5 Ghz,5-8 Ghz, 8-11 Ghz, 2-11Ghz todos con 401 pasos.
- Maximun Delta S 0.01
- Minimun number of passes 10
- Maximun Refinement per pass 30%
- Waveport
- Salida: S11,HPBW, Directividad, VSWR

La frontera de radicación se determinó a partir de la longitud de onda de frecuencia 1.5 GHz , resultando en cálculo aproximadamente una distancia de 5 mm, equivalente a la cuarta parte de la longitud de onda de esta frecuencia, y se verificaron las dimensiones del puerto de alimentación, (ver FIGURA 17).; para que se comportara similar al campo eléctrico de la Microstrip (quasi TEM), (ver FIGURA 18).

Se realizaron simulaciones con frecuencia de adaptación desde 2 GHz hasta 12 GHz con incremento de 500MHz para analizar los resultados en todo en rango de frecuencia del diseño; se utilizaron las utilidades de optimización del programa para lograr el mejor rendimiento de la antena con las características de diseño deseado.

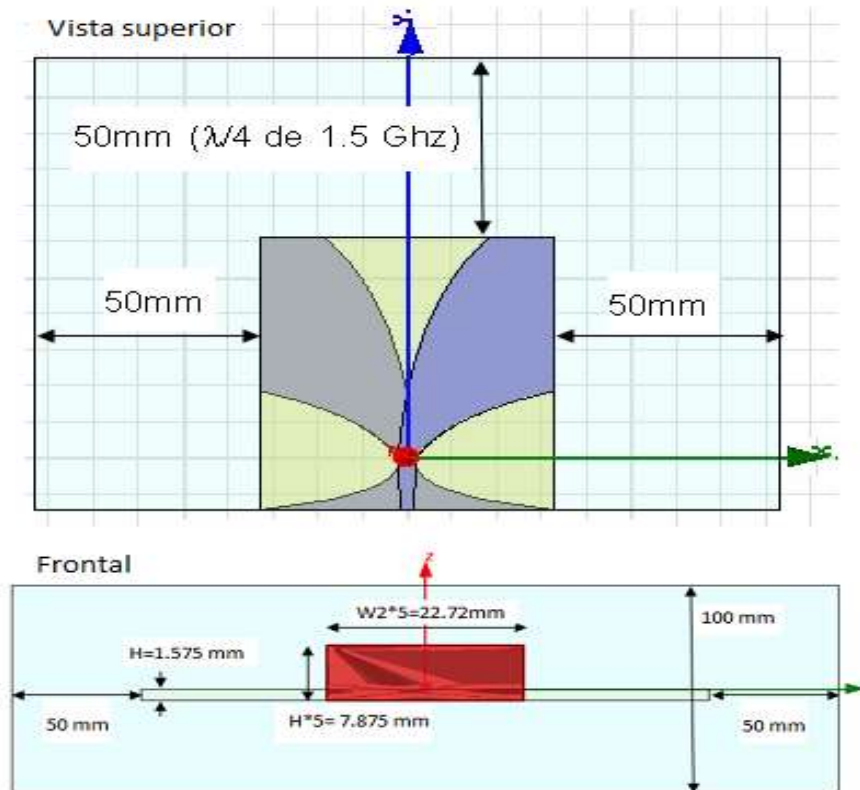


FIGURA 17. Fronteras Wave port y Bondaries

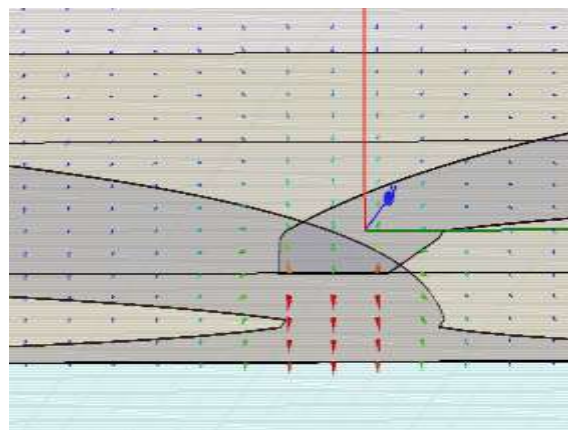


FIGURA 18. Microstrip Excitación Cuasi TEM

5.2 Geometría de la antena

Las dimensiones finales de la antena que se establecieron para este trabajo fueron de 65.81 x 75.38 mm², en FR4 con constante dieléctrica de 4.4 y 1.57 mm de grosor, en la tabla III y FIGURA 19 se detallan las dimensiones.

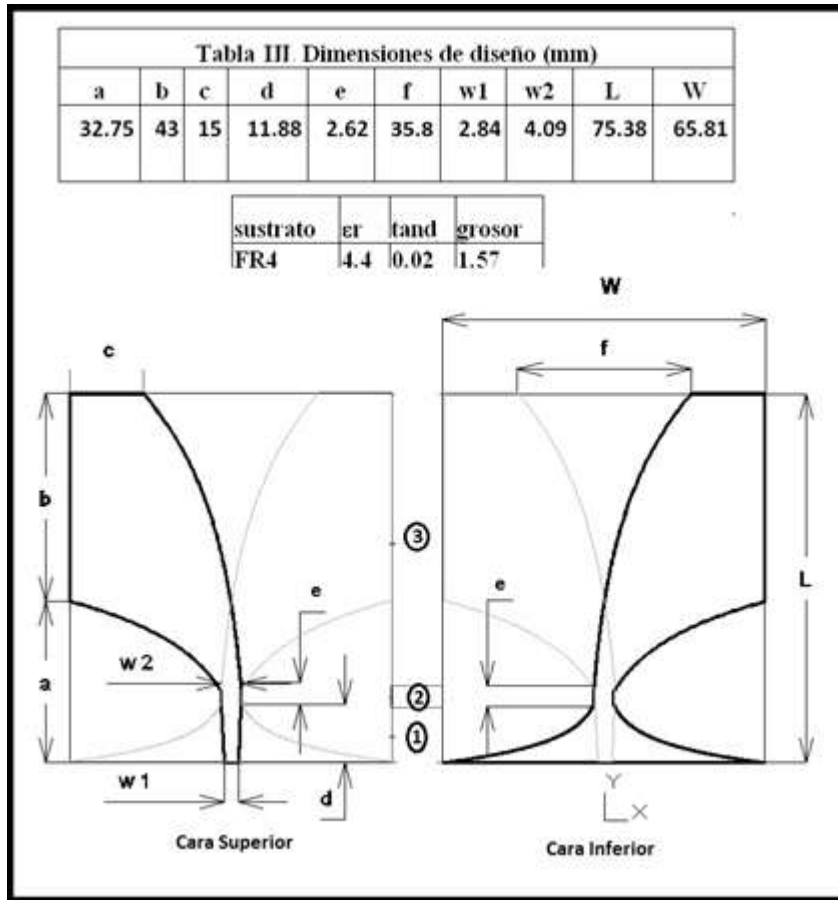


FIGURA 19. Dimensiones finales de la Antena Vivaldi Antipodal

5.3 Simulados y medidos para la Antena

En este apartado se realiza la comparación de los resultados obtenidos mediante el software Ansoft High frequency Structure Simulator (HFSS), con los obtenidos de las mediciones reales efectuadas.

En la FIGURA 20. Se observa el parámetro S11, en donde se obtuvo un rango de $< -10\text{dB}$ medido desde 2.75Ghz hasta 12.5 Ghz presentando mucha similitud con la frecuencia inferior simulada que intercepta el valor requerido; en la tabla IV se muestran los parámetros de HPBW y ganancia.

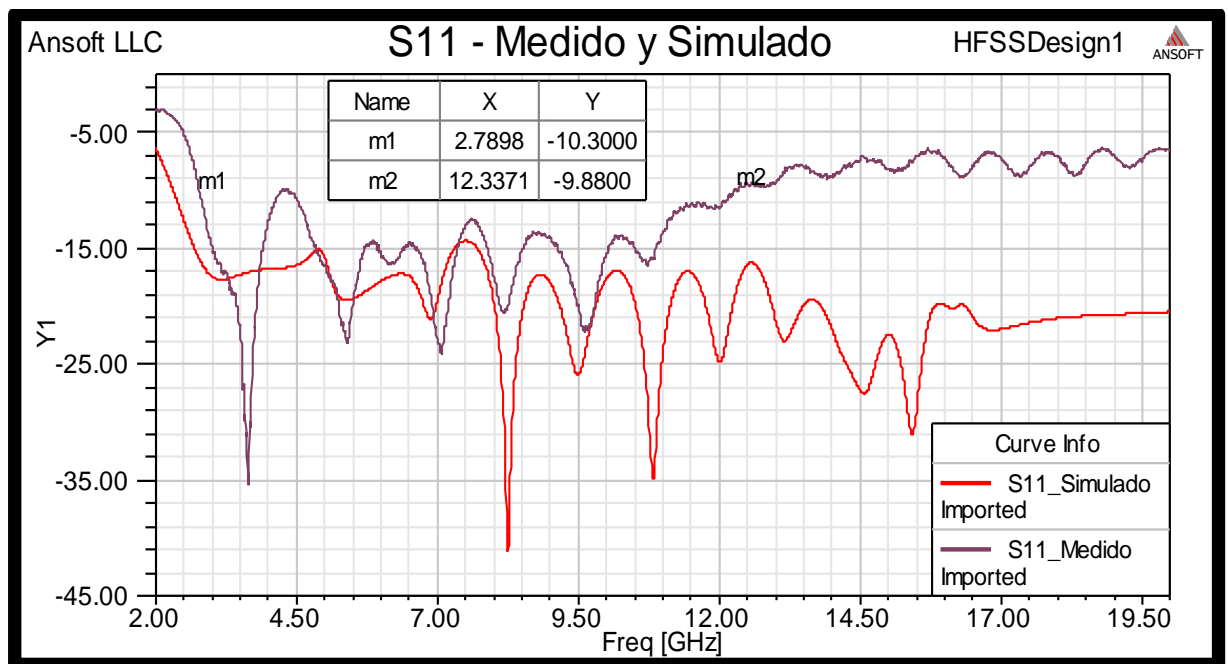


FIGURA 20. S11 en el rango de [2 – 20] Ghz

Valores simulados				
	Plano H		Plano E	
Frec.	HPBW (°)	G (dBi)	HPBW (°)	G(dBi)
3 GHz	125	4.1	69	4.1
5 GHz	77	6.97	60	6.97
9 GHz	55	5.79	75	5.78
Valores Medidos				
	Plano H		Plano E	
Frec.	HPBW (°)	G (dBi)	HPBW (°)	G(dBi)
3 GHz	116	4.09	57	4
5 GHz	77	6.48	81	5.7
9 GHz	52	5.29	69	5.23

Tabla IV. Parámetros de la Antena

En la FIGURA 21, se observa el patrón de radiación en Plano E y H simulado (línea discontinua) y medido (línea continua) para tres diferentes frecuencias (3, 5 y 9 Ghz) en donde presenta un comportamiento similar en directividad. La antena presenta una mayor directividad en el plano H a medida que se aumenta la frecuencia.

Otro parámetro importante para el diseño de la antena es el VSWR, mostrado en la FIGURA 22. El resultado muestra que hay un buen acople entre la línea de transmisión en el rango deseado. La antena Vivaldi, es una estructura no resonante por lo tanto el retardo presenta pocas oscilaciones sobre la banda deseada y tiende a estabilizar en 1.5 ns en la antena diseñada, ver FIGURA 23.

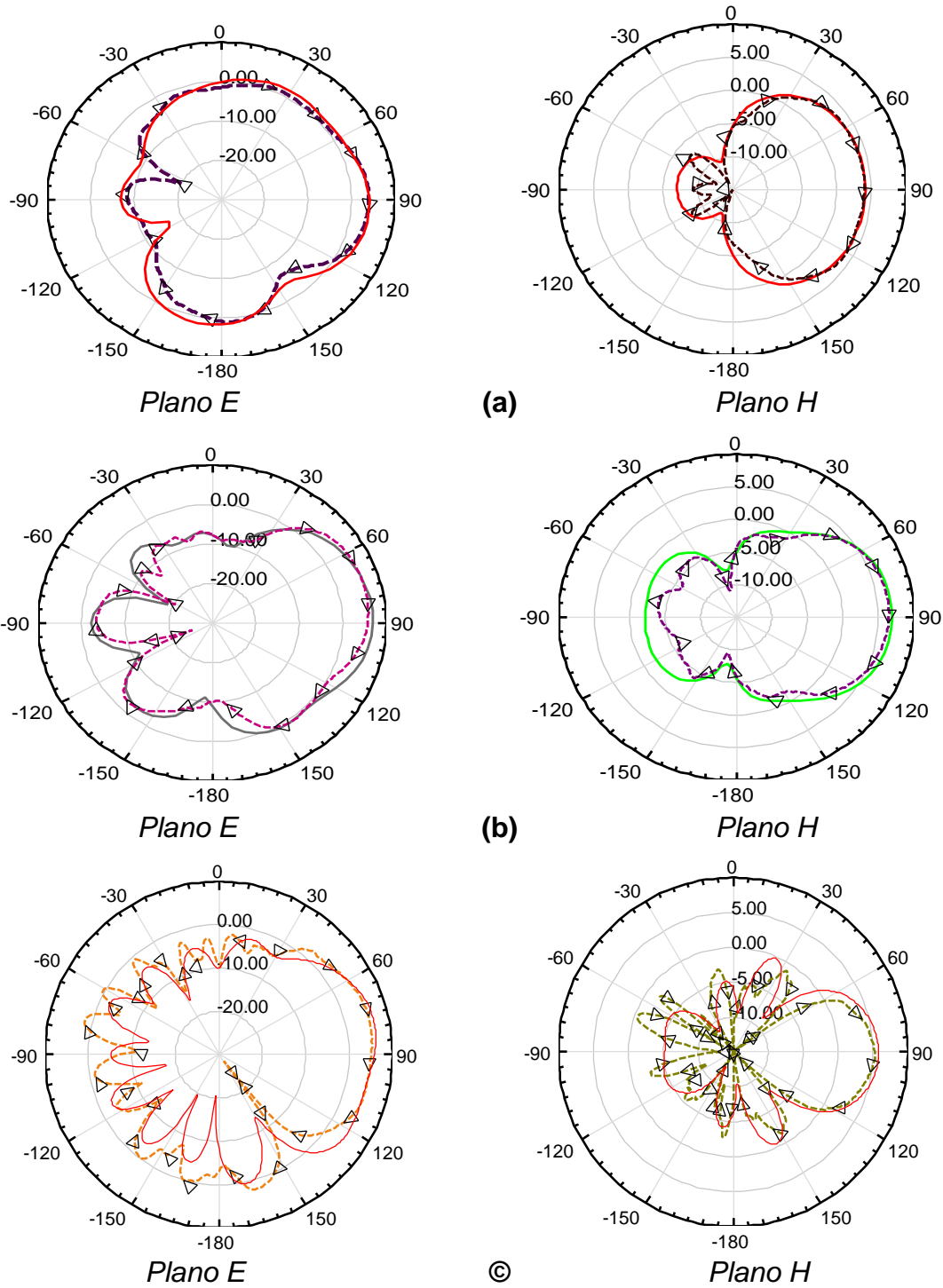


FIGURA 21. Plano E y Plano H de la antena a) 3GHz, b) 5GHz y c) 9GHz. ((medido l. discontinuo) y simulado (l. continua))

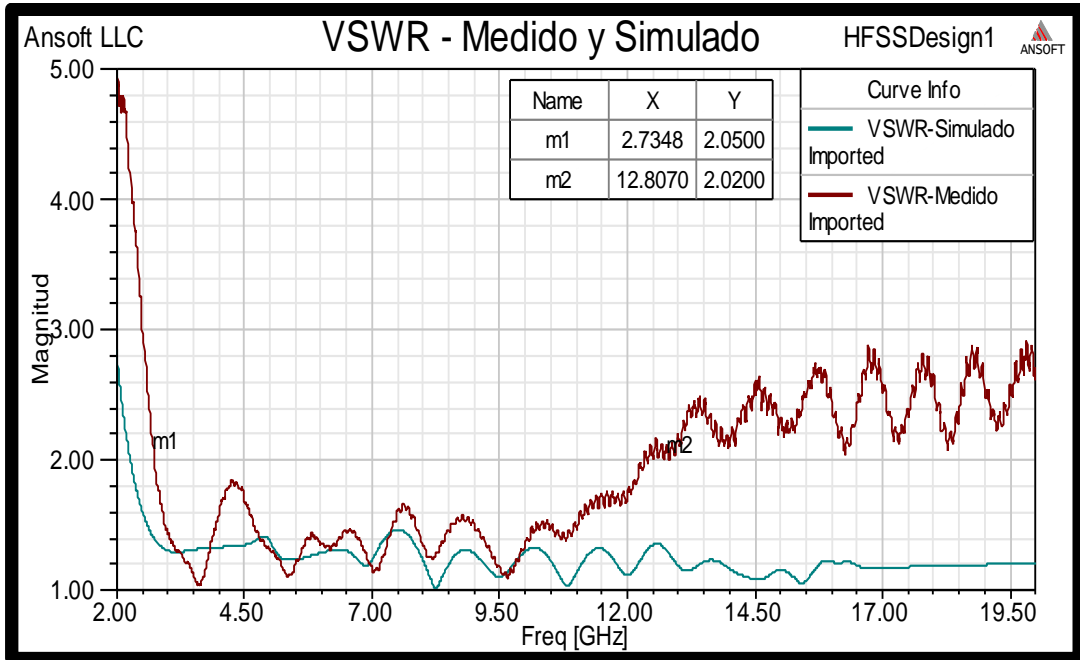


FIGURA 22. VSWR

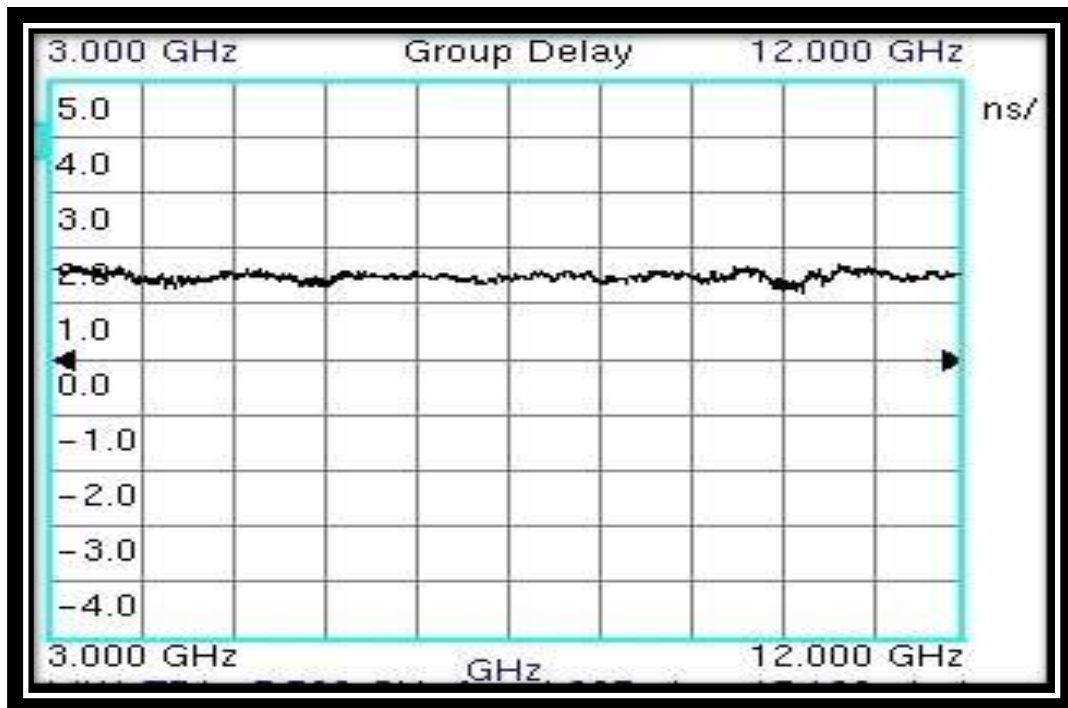


FIGURA 23. RETARDO

5.4 Pruebas GPR SFCW

Para las pruebas emulando un GPR SFCW se configuro el VNA en el rango de 3.0-10.0 GHz con 4001 puntos para tener la máxima resolución vertical permitida por el equipo.

Se calculó la resolución vertical y horizontal, ver FIGURA 24 dando como resultados:

$$\Delta Rh-10\text{cm} = 1.94 \text{ cm}$$

$$\Delta RV-60\text{cm} = 11.68 \text{ cm}$$

$$\Delta RV\text{-aire} = 2.14 \text{ cm}$$

$$\Delta RV\text{-arena } (\epsilon_r=4) = 1.07$$

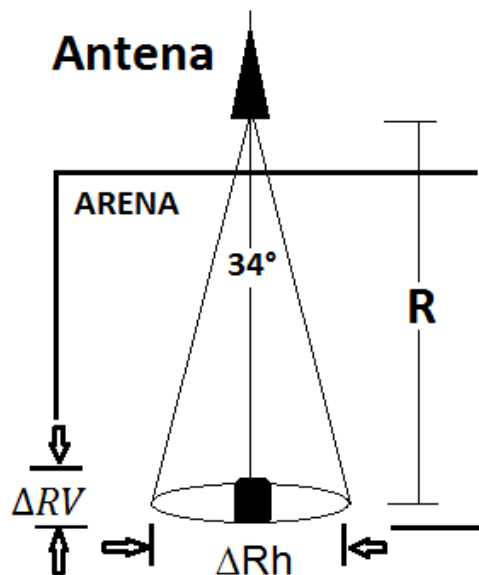


FIGURA 24. Resolución vertical y horizontal

En la FIGURA 25, se muestra el montaje 1 realizado para la toma de datos con el VNA, de esta manera procesarlos en el Programa de GPR y por último mostrar los resultados. En la FIGURA 26, se muestran los resultados de las diferentes pruebas realizadas en A) se utilizó una lámina grande (34 cm x 24 cm) ubicado a una distancia de 60 cm con referencia al conector SMA, en B) se posiciona la lámina grande a una distancia de 42 cm con respecto a la referencia, en C) se utilizó la lámina pequeña (20 cm x 10 cm) a una distancia de 42 cm, la misma distancia de la prueba B, en la siguiente prueba D), se utilizó una esfera con diámetro de 2.5 cm, sobre la superficie de tierra en la caja, con una distancia de 49 cm con respecto al conector SMA y 8 cm con respecto a la tapa de la caja. En la figura 10 se observa que la onda reflejada tiene muy poca intensidad, en E) se utiliza la lámina pequeña a una distancia igual que la prueba D, dando como resultado una mayor intensidad del eco captado en comparación a la esfera, en F) se enterró 1 cm la lámina pequeña y por último en G) la toma de datos fue similar a F) agregando la tapa de la caja, la reflexión de esta se muestra en la figura encerrada en un círculo, las distancias determinadas por el programa GPR fueron muy similares a las distancias reales de los objetos a detectar en las diferentes configuraciones.

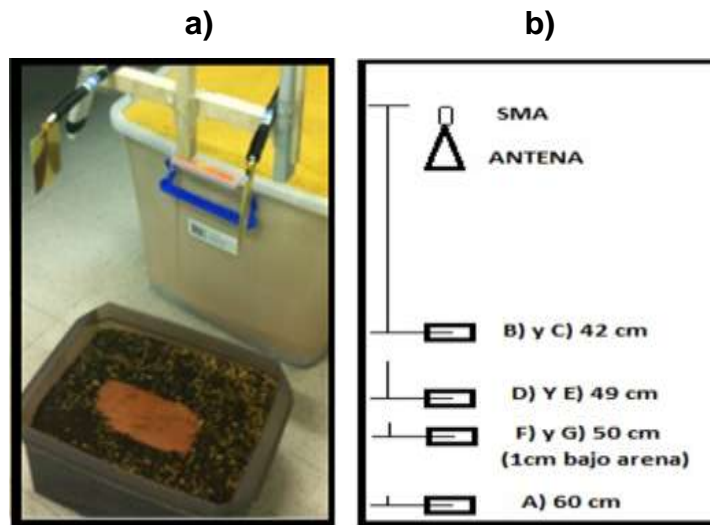


FIGURA 25. a) Montaje 1 realizado para toma de datos, b) Esquema de distancias del montaje 1.

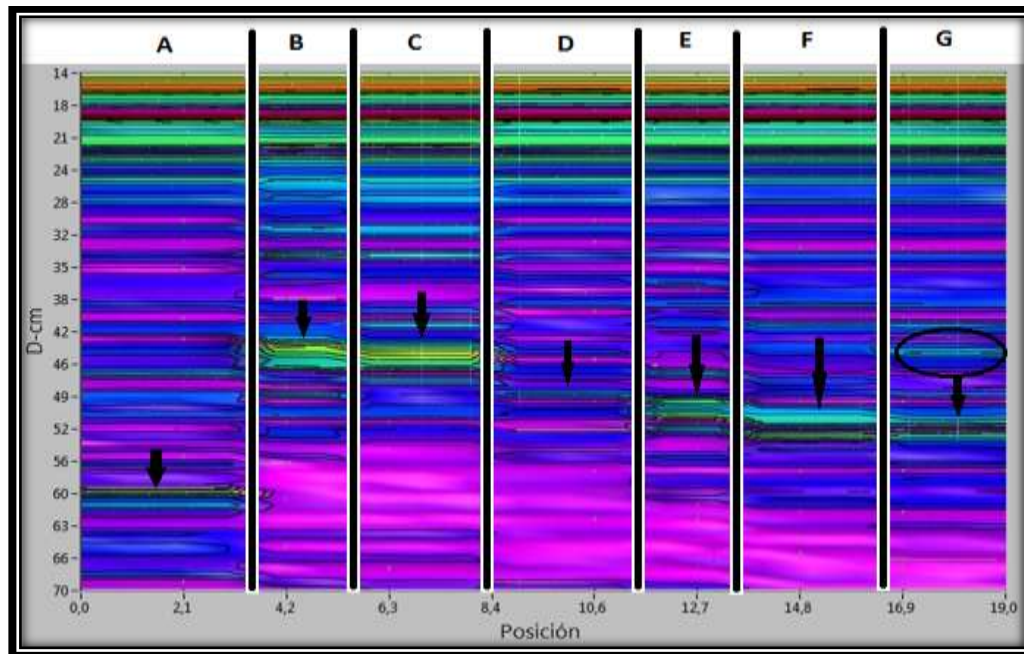


FIGURA 26. A scan –Diferentes pruebas, A) lámina grande en el piso , B) lámina grande sobre caja de tierra, C) lámina pequeña sobre caja bola, D) esfera dentro de la caja, E) lámina pequeña sobre tierra, F) lamina pequeña enterrado 1cm, G) lámina pequeña enterrado 1 cm con tapa en la caja

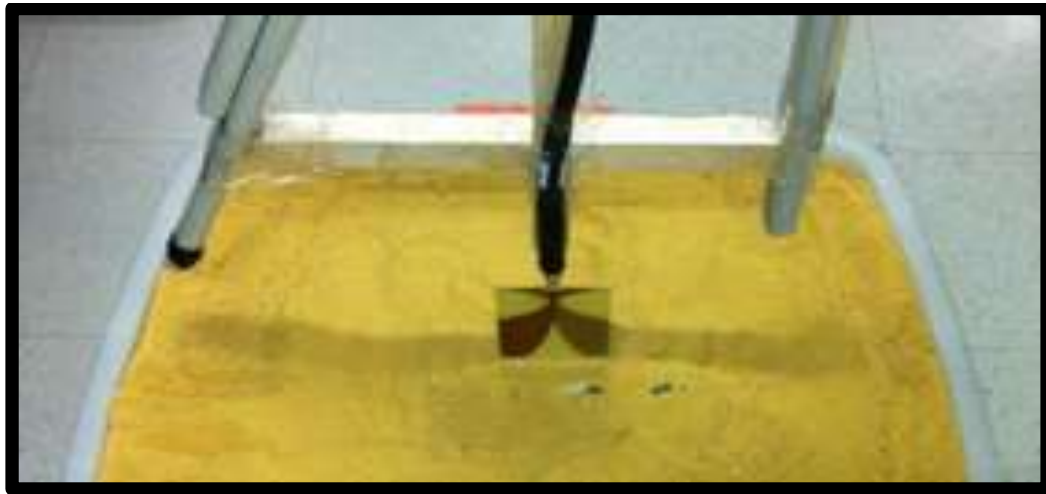


FIGURA 27. Montaje 2- realizado para toma de datos.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con la placa metálica ubicada 3 centímetros por debajo de la arena y el conector SMA está a 11 cm de la superficie del material, ver FIGURA 27.

Tras realizar 11 tomas de datos espaciados por 2 cm, en la FIGURA 28 se observan todos los Ascan sobre-montados, se aprecia los diferentes picos presentados por éstos alrededor de 15 cm de profundidad (reflexiones sobre la placa) debido a la proximidad del barrido sobre el objeto.

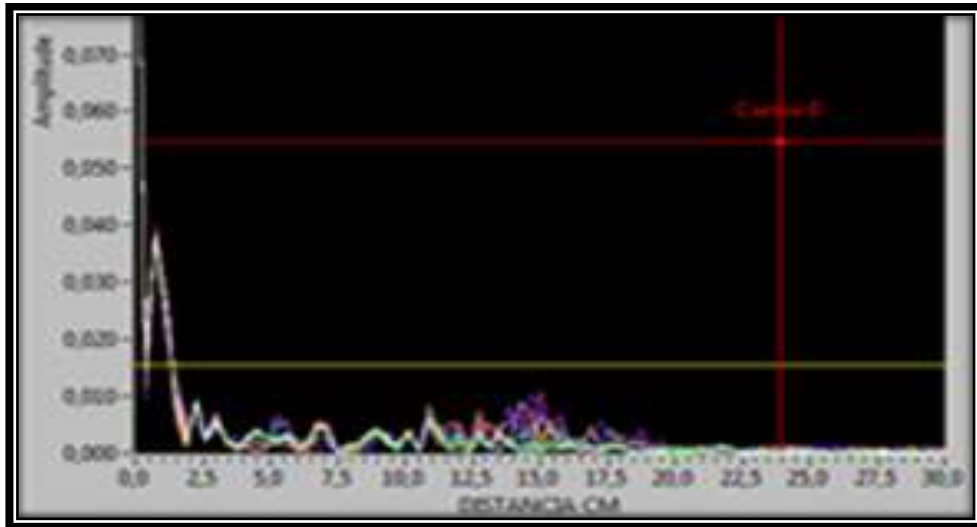


FIGURA 28. A scan –placa metálica, arena – 3 cm.

En la FIGURA 29, se muestra el Bscan del montaje 2. Se puede apreciar una línea continua alrededor de 11cm que identifica la superficie de la arena en la zona central de la imagen, encerrada en círculo se observa la placa metálica detectada a una profundidad de entre 14 y 15 cm. La placa no se encontraba completamente alineada con el eje horizontal por lo que se aprecia un comportamiento inclinado del objeto en la imagen.

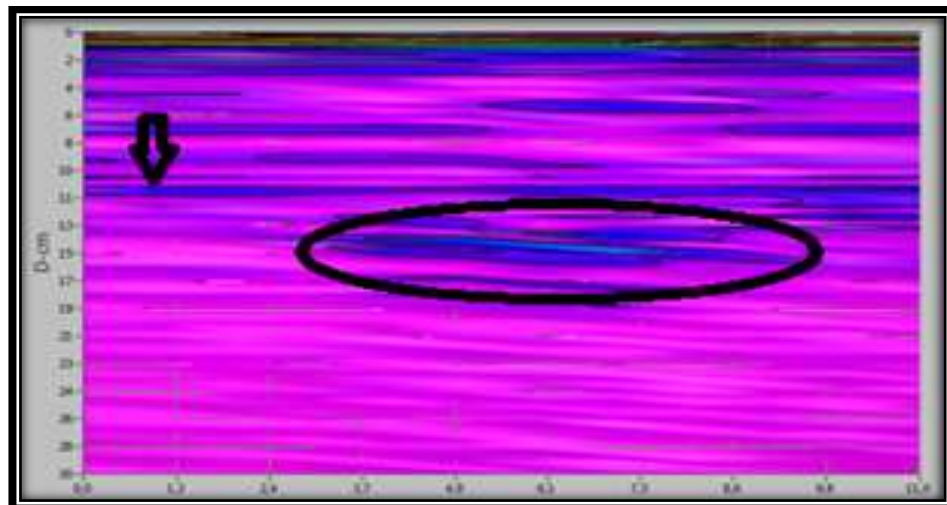


FIGURA 29. B scan-placa metálica, arena – 3 cm

6 CONCLUSIONES

Existe una variedad de metodologías tanto teóricas como experimentales para diseñar Antenas Vivaldi, para nuestro diseño se utilizaron pautas generales de diferentes artículos para estructurar la antena, realizar simulaciones en HFSS y optimizar las variables para cumplir con nuestros parámetros de diseño, la antena construida tiene $65.81 \times 75.38 \text{ mm}^2$, en FR4 con constante dieléctrica de 4.4 y 1.57 mm de grosor; conclusiones específicas de la antena:

- La dimensión de **b** (FIGURA 19), que es la diferencia entre los máximos de las curvas exterior e interior, tiene un efecto importante sobre las características de adaptación de impedancia, especialmente a bajas frecuencias.
- La longitud de la parte de radiación principalmente controla la ganancia de la antena. A mayor longitud una mayor ganancia, pero se traduce en mayores niveles de polarización cruzada. El borde exterior muestra poco impacto en la ganancia, la transición de alimentación ha mostrado muy poco efecto sobre la ganancia de la antena, pero influye en los niveles de polarización cruzada.
- La longitud de la ranura de forma exponencial, ha mostrado un efecto significativo sobre el *HPBW* del plano H, mientras el patrón del plano E es casi nulo, la longitud de las curvas exteriores, tiene poco efecto sobre la *HPBW*, pero afecta a los niveles de lóbulos laterales y secundarios. Por lo tanto, puede ser optimizado para suprimir los niveles de lóbulos laterales y secundarios, la Longitud de la transición de alimentación afecta principalmente los niveles de lóbulos laterales

de los patrones de plano E. Las transiciones de alimentación le aporta simetría a la antena en los patrones de radiación en el plano E.

Se implementó la antena con el VNA emulando un GPR SFCW realizando pruebas de detección en una caja de arena con una placa metálica, los resultados obtenidos en la detección fueron aceptables.

6.1 Trabajo futuro


- Como trabajo futuro se recomienda realizar el diseño de la antena con mayor rango de frecuencia tratando de bajar la frecuencia inferior alrededor de 1 GHz y como frecuencia superior 20 GHz , conservando demás parámetros de diseño como radiación , S11, etc..
- Finalmente realizar una comparación de la antena vivaldi diseñada con una antena Horn en la misma banda de frecuencia y sacar valores de eficiencia en relación a las antenas.

7 REFERENCIAS

- [1] Daniels, D. J., Ground penetrating radar 2nd ed., IET, cap. 1,2,3,4,5 y 12, 2004.
- [2] David M. Pozar, "Microwave engineering", John Wiley & Sons, Inc., cap.3, 2005.
- [3] J. L. Davis and A. P. Annan, Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, Geophysical Prospecting, vol. 37, no. 5 pp. 531-551, 2006.
- [4] E.M. Staderini, UWB radars in medicine, IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag., vol. 17, no. 1, pp. 13–18, 2002.
- [5] J. C. Cook, Radar transparencies of mine and tunnel rocks, Geophysics, vol, no. 5, pp. 865-885, 2000.
- [6] J.D. Taylor, Ultra Wideband Radar Technology. New York: CRC Press, cap. 1 y 2, 2001.
- [7] Subsurface Radar Imaging Of Underground Archeological Objects In Kyiv Petcherskaja lavra, Kyiv, Ukraine, Anatoliy Boryssenko, IEEE, Electrical and Computer Engineering , pp. 855-860, 1999.
- [8] Conyers Lawrence B., Ground-penetrating radar for archaeology, cap1, 2004.
- [9] REFLEX-WIN, [consulta: 1 Febrero 2012]. <http://www.gprmax.org>
- [10] EKKO_MODEL, [fecha de consulta: 1 Febrero 2012]. <http://www.sensoft.ca/>
- [11] GPRmax, [fecha de consulta: 1 Febrero 2012]. <http://www.sandmeier-geo.de/Reflex/reflexw.htm>
- [12] Federal Communications Commission (www.fcc.org), Authorization of Ultrawideband Technology, First Report and Order, Washington, DC, February 14, 2002.

- [13] Lopera Téllez, Olga Lucía, An integrated detection and identification methodology applied to ground-penetrating radar data for humanitarian demining applications, Tesis Doctorado U. Andes, 2008.
- [14] Prieto Perilla, Edith Juliana, Desempeño de un radar de penetración de suelos en función de la humedad del suelo para aplicaciones en desminado humanitario, Tesis U. Andes, 2007.
- [15] Jeremie Bourqui, Balanced Antipodal Vivaldi Antenna With Dielectric Director for Near-Field Microwave Imaging, IEEE, Antennas and Propagation, 2010.
- [16] Ravi, Prakash, Rajaraman, Design of a wideband Vivaldi antenna array for the snow radar , Thesis, coimbatore Inst. of Tech, India, 2010.
- [17] Haoyu Zhang, Smart Antenna Array for Brain Cancer Detection, IEEE, Antennas and Propagation Conference (LAPC), 2011.
- [18] Jian Bai, Compact Antipodal Vivaldi Antenna for 4–50-GHz UWB Application, IEEE, Microwave Theory and Techniques , 2011.
- [19] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, 3rd ed., Wiley-Interscience,cap.1, 2005.
- [20] Randy Bancroft, Microstrip and printed antenna design 2nd ed., 2008.
- [21] Sang-Gyu Kim, Ultrawide-Band Transitions and New Microwave Components Using Double-Sided Parallel-Strip Lines, IEEE, Microwave Theory and Techniques, pag. 2148 – 2152, 2004.
- [22] P.J. Gibson, “The Vivaldi Aerial”, in Proc. 9th European Microwave Conf. (Brighton U.K.) 1979, pp. 101-105.
- [23] Gazit, “Improved design of a Vivaldi antenna,” *IEEE Proc. H*, 1988, pp 89-92.

Logo



SISTEMA DE BIBLIOTECAS
IDENTIFICACIÓN TRABAJO DE GRADO

FECHA DE ELABORACIÓN		
DD	MM	AAAA
13	09	2012

1. IDENTIFICACIÓN AUTOR(ES) DEL TRABAJO DE GRADO

CÓDIGO	DOCUMENTO DE IDENTIDAD		APELLIDOS	NOMBRES	CORREO ELECTRÓNICO
	TIPO	NÚMERO			
200329091	CC	7919045	CABRALES GUARDO	JORGE ANTONIO	ja.cabrales911@uniandes
	CC				
	CC				
	CC				
	CC				
	CC				

PROGRAMA	Maestría	ENTREGÓ FORMATO: <input checked="" type="checkbox"/> SB-10 "Entrega trabajo de grado y autorización de uso a favor de la Universidad de los Andes". Documento con el cual, el autor permite que su trabajo sea utilizado por la Universidad, para fines de consulta y de mención en sus catálogos bibliográficos, tanto físicos como en línea.
FACULTAD	Facultad de Ingeniería	
DEPARTAMENTO	Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica	

1.1 IDENTIFICACION DE TRABAJO DE GRADO PARA DOBLE TITULACIÓN

PROGRAMA	No Aplica	TESIS PARA DOBLE TITULACIÓN: <input type="checkbox"/> Si el trabajo de grado presentado aplica para obtener dos (2) titulaciones, por favor marque esta casilla y diligencie la información de esta sección.
FACULTAD	No Aplica	
DEPARTAMENTO	No Aplica	

2. INFORMACIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO

Diseño, Simulación y Construcción de Antenas Vivaldi Antipodal en la banda Super High Frequency "SHF" para sistemas GPR

TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO:

DESCRIPCIÓN FÍSICA	MATERIAL ACOMPAÑANTE (Cantidad):		FECHA DE ELABORACIÓN		
	Número de páginas: 51	Casetes Audio: _____ Discos compactos: _____	DD	MM	AAAA
Ilustraciones: _____	Casetes Video: _____ Diapositivas: _____	01	08	2012	
	Disquetes: _____ Otros: _____ ¿Cuáles? _____				

***RESUMEN DEL TRABAJO DE GRADO:**

En este Artículo se muestra el diseño de Antena Vivaldi Antipodal (AVA) en el rango de frecuencia: 3.1 - 10.6 GHz de acuerdo a recomendación de la FCC [12] para Ground Penetrating Radar-Ultra-wideband (GPR UWB), la cual es usada en un GPR en el dominio de la frecuencia utilizando SFCW (stepped frequency continuous wave). Para emular el sistema se utiliza un VNA realizando un barrido de frecuencia en la banda de trabajo. La antena Vivaldi se simuló y se construyó en FR4. Se realizaron pruebas de desempeño del sistema GPR detectando una placa metálica de 20 x 10 cm² a diferentes distancias (entre 30 y 70 cm) utilizando como medio aire y arena.

OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO:

Objetivo General

Diseñar, Simular y construir una antena para sistema Radar de Penetración Terrestre (GPR) que permita la localización de objetos metálicos en un rango de 0 a 30 centímetros.

Objetivos Específicos

Realizar el estudio teórico de arquitectura funcional del sistema GPR.

Definir los requerimientos eléctricos para una antena que hace parte de un sistema GPR.

Proponer, diseñar y desarrollar una estrategia para validar el funcionamiento de la antena.

Utilizando equipos comerciales como por ejemplo el VNA, validar experimentalmente la arquitectura propuesta y su funcionalidad para detectar metales.

METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE GRADO:

Diseñar y construir una antena para una aplicación específica de radar de penetración terrestre con base en las investigaciones desarrolladas en el tema, estudiando los diferentes modelos de GPR, sus limitaciones y parámetros de diseño en cada prototipo. Para ello, se ha organizado su ejecución en dos fases. La primera fase corresponde a las etapas de diseño, simulación y fabricación y la segunda hace referencia a la etapa de pruebas de funcionamiento, análisis de desempeño y síntesis de los resultados.

Para lograr los objetivos del proyecto se plantearán las siguientes actividades:

1. Revisión Bibliográfica: Recolección de información y síntesis documental.
2. Criterios: En esta etapa se definirán concretamente los criterios de diseño.
3. Simulación con los criterios de diseño.
4. Diseño de nuestro sistema básico de GPR
5. Fabricación del bloque de antenas, integrar con el bloque de control y realizar pruebas de funcionamiento.
6. Comparación de desempeño (simulación y Experimental)
7. Verificar que se estén cumpliendo con los objetivos propuestos.
8. Documento definitivo a presentar

CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE GRADO:

Existen una variedad de metodologías tanto teóricas como experimentales para diseñar Antenas Vivaldi, para nuestro diseño se utilizaron pautas generales de diferentes artículos para estructurar la antena, realizar simulaciones en HFSS y optimizar las variables para cumplir con nuestros parámetros de diseño, la antena construida tiene $65.81 \times 75.38 \text{ mm}^2$, en FR4 con constante dieléctrica de 4.4 y 1.57 mm de grosor; conclusiones específicas de la antena:

La dimensión de b (ver figura 2), que es la diferencia entre los máximos de las curvas exterior e interior, tiene un efecto importante sobre las características de adaptación de impedancia, especialmente a bajas frecuencias.

La longitud de la parte de radiación principalmente controla la ganancia de la antena. A mayor longitud una mayor ganancia, pero se traduce en mayores niveles de polarización cruzada. El borde exterior muestra poco impacto en la ganancia, la transición de alimentación ha mostrado muy poco efecto sobre la ganancia de la antena, pero influye en los niveles de polarización cruzada.

La longitud de la ranura de forma exponencial, ha mostrado un efecto significativo sobre el HPBW del plano H, mientras el patrón del plano E es casi nulo, la longitud de las curvas exteriores, tiene poco efecto sobre el HPBW, pero afecta a los niveles de lóbulos laterales y secundarios. Por lo tanto, puede ser optimizado para suprimir los niveles de lóbulos laterales y secundarios, la longitud de la transición de alimentación afecta principalmente los niveles de lóbulos laterales de los patrones de plano E. Las transiciones de alimentación le aporta simetría a la antena en los patrones de radiación en el plano E.

Se implementó la antena con el VNA emulando un GPR SFCW realizando pruebas de detección en una caja de arena con una placa metálica, los resultados obtenidos en la detección fueron aceptables.

***PALABRAS CLAVES (TEMAS) DEL TRABAJO DE GRADO:**

GPR, SFCW, UWB, Reflexión, Constante dieléctrica, VNA, Antena Vivaldi, Ascan, Bscan.

ACUERDOS DE CONFIDENCIALIDAD: NO TIENE ACUERDO(S) TIENE ACUERDO(S)

Si selecciona tener acuerdo de confidencialidad, por favor diligencie el siguiente cuadro:

Persona natural o jurídica	Desde			Hasta		
	DD	MM	AAAA	DD	MM	AAAA

3. FIRMAS

AUTORES (Nombre completo)	*FIRMAS
Jorge Antonio Cabrales Guardo	Jorge A Cabrales G
DIRECTORES / ASESORES (Nombre completo)	*FIRMAS
Fredy Enrique Segura Carjano	FES
JURADO / LECTOR (Nombre completo)	*FIRMAS
ROBERTO BUSTAMANTE	R Bustamante

Las firmas de Autor y Director/Asesor son obligatorias. Si tiene inconvenientes con el registro de la firma del Jurado/Lector, deberá tramitar ante la respectiva Facultad la autorización para registrar las firmas de pares o un sello que justifique la ausencia de la firma faltante.	

SB-09

[Verificar información](#)[Imprimir](#)

ENTREGA EJEMPLAR TRABAJO DE GRADO Y AUTORIZACIÓN DE SU USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Yo JORGE ANTONIO CABRALES GUARDO, mayor de edad, vecino de Bogotá D.C., identificado con la Cédula de Ciudadanía N° 7919045 de Cartagena, actuando en nombre propio, en mi calidad de autor del trabajo de tesis, monografía o trabajo de grado denominado: **Diseño, Simulación y Construcción de Antenas Vivaldi Antipodal en la banda Super High Frequency "SHF" para sistemas GPR**, hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos del ser el caso, en formato digital o electrónico (CD-ROM) y autorizo a LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento. PARÁGRAFO: La presente autorización se hace extensiva no sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material, sino también para formato virtual, electrónico, digital, óptico, usos en red, internet, extranet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

EL AUTOR - ESTUDIANTES, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y tiene la titularidad sobre la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL ESTUDIANTE - AUTOR, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Bogotá D.C., a los trece (13) días del mes de Septiembre de Dos Mil doce (2012).

EL AUTOR - ESTUDIANTE.

(Firma) 

Nombre JÓRGE ANTONIO CABRALES GUARDO

C.C. N° 7919045 de Cartagena