

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA**



---

**Prototipo de Georradar en la Banda de 2.45 GHz**

---

Tesis presentada para obtener el grado de: **Maestría en Ingeniería Electrónica,  
opción Instrumentación Electrónica**

PRESENTA

**Autor:**

Ing. Daniel Vinicio Naranjo Sanango\*

**Asesor(es):**

Dr. Richard Torrealba Meléndez

Dr. Mario López López



# Dedicatoria

Este trabajo que se desarrolló con mucha dedicación y disciplina, se lo dedico a mis padres, Carlos Alberto y Anita María, por el apoyo incondicional y por haber hecho posible mi estancia a miles de kilómetros de distancia de casa. Gracias a su esfuerzo, el obtener el grado de maestría fue posible. A mis hermanos Carlos Armando y Alvaro Paul por su apoyo incondicional y consejos de vida. Finalmente, a toda mi familia que siempre estuvo al pendiente de mí mientras llegué a México con un sueño para cumplir.

Gracias por haber puesto su confianza en mí y sobre todo porque incluso existieron momentos en que llegaron a confiar más en mí, que yo mismo. LOS QUIERO A TODOS.



# Agradecimientos

Agradecimiento a Dios y a la Virgen de Guadalupe por escuchar mis oraciones y otorgarme las bendiciones a lo largo de este trayecto, fue difícil en su momento, pero no fue imposible, gracias a sus bendiciones tuve fuerzas y fe para no rendirme.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación SECIHTI, por el apoyo económico otorgado a lo largo del programa de maestría, el cual sirvió para desarrollar el proyecto "Prototipo de Georradar en la Banda de 2.45 GHz".

A la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por permitirme el ingreso al programa de maestría y también por la formación académica otorgada a lo largo del posgrado.

A mis asesores, el Dr. Richard Torrealba Meléndez y el Dr. Mario López, por sus asesorías y apoyo didáctico a lo largo del desarrollo del proyecto de titulación. Sin sus observaciones y motivaciones, no hubiera sido posible completarlo.

A todos los docentes de la facultad por sus enseñanzas, conocimientos compartidos y por cada proyecto que cada uno de ellos nos impulsó a ser mejores en el área.

A todos mis compañeros y amigos que hice a lo largo de este proceso, de manera especial a Rafael, Antonio y Yoyontzin, con quienes compartí un sinnúmero de proyectos, experiencias y aventuras que me permitieron aprender sobre la cultura mexicana, conllevando sus tradiciones y costumbres. También un agradecimiento a mi compañero de laboratorio Raul, por la ayuda prestada a lo largo de estos dos años de posgrado.

GRACIAS A TODOS



# Índice general

<b>Dedicatoria</b>	<b>III</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>V</b>
<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del Problema y Justificación . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	10
1.2.1. General . . . . .	10
1.2.2. Específicos . . . . .	10
1.3. Metodología . . . . .	11
1.4. Revisión Histórica de Uso del Georradar . . . . .	11
1.5. Enfoque Actual . . . . .	12
1.6. Trabajos Similares . . . . .	13
<b>II. Radio-Definido por Software y sus Aplicaciones como Georradar</b>	<b>19</b>
2.1. Georradar: Usos y Aplicaciones . . . . .	19
2.1.1. Campos de Estudio y Aplicación . . . . .	20
2.2. Radio-Definida por Software (SDR) . . . . .	21
2.2.1. Características . . . . .	22
2.2.2. Aplicaciones SDR . . . . .	23
2.3. Espectrograma . . . . .	24
2.3.1. Definición . . . . .	25
2.3.2. Procesamiento Básico del Espectro . . . . .	25
2.3.3. Tipos de Espectrograma . . . . .	27
2.4. Antenas . . . . .	28
2.4.1. Tipos de Antenas . . . . .	29
2.4.2. Antenas de Microstrip o Parche . . . . .	32
2.5. Modulación y Procesamiento de la Señal . . . . .	33
2.5.1. Modulación por Cuadratura (I/Q) . . . . .	34
<b>III.Arquitectura de SDR para Aplicación de Georradar</b>	<b>37</b>
3.1. Capacitación y Manejo de las Tecnologías Asociadas . . . . .	37
3.1.1. Instalación del sistema operativo KUIPER de LINUX en la tar- jeta de desarrollo ZEDBoard . . . . .	37

3.2. Evaluación del Prototipo a Escala 4 de Desarrollo Tecnológico . . . . .	38
3.2.1. Integrar los componentes principales de la invención tecnológica . . . . .	38
3.2.2. Realizar pruebas de validación de efectividad de la invención en laboratorio . . . . .	41
3.2.3. Explorar con mayor profundidad aspectos o certificaciones de manufacturabilidad relacionados con el desarrollo de su invención tecnológica . . . . .	51
3.2.4. Alcanzar la validación de mercado referente a la invención con entrevistas con usuarios potenciales y estudios de mercado . . . . .	52
3.2.5. La invención tecnológica debe funcionar a nivel de laboratorio . . . . .	53
3.2.6. Identificar los riesgos tecnológicos de mercado y financieros con un plan de mitigación para los mismos . . . . .	57
3.2.7. Actualizar el estudio de patentes nacionales e internacionales y responder si se cuenta con una estrategia de gestión de la propiedad intelectual . . . . .	59
3.2.8. Plan de licenciamiento de tecnología a terceros . . . . .	59
<b>IV.Resultados y Análisis</b>	<b>61</b>
4.1. Resultados de la Evaluación del Prototipo a Escala 4 de Desarrollo Tecnológico . . . . .	61
4.1.1. Integrar los componentes principales de la invención tecnológica . . . . .	61
4.1.2. Realizar pruebas de validación de efectividad de dicha invención de laboratorio . . . . .	62
4.1.3. Explorar con mayor profundidad aspectos o certificaciones de manufacturabilidad relacionados con el desarrollo de su invención tecnológica . . . . .	69
4.1.4. Alcanzar la validación de mercado referente a la invención con entrevistas con usuarios potenciales y estudios de mercado . . . . .	71
4.1.5. La invención tecnología debe funcionar a nivel de laboratorio . . . . .	74
4.1.6. Identificar los riesgos tecnológicos de mercado y financieros con un plan de mitigación para los mismos . . . . .	81
4.1.7. Actualizar el estudio de patentes nacionales e internacionales y responder si se cuenta con una estrategia de gestión de la propiedad intelectual . . . . .	82
<b>V. Conclusiones</b>	<b>83</b>
5.1. Trabajos Futuros . . . . .	84
<b>VI.Lista de Nomenclatura</b>	<b>87</b>

<b>A. Anexos</b>	<b>95</b>
1.1. Desarrollo de artículo científico . . . . .	95
1.2. Estancia Universitaria . . . . .	97
1.3. Encuesta de Validación de Mercado . . . . .	99



# Índice de figuras

I.1.	Ejemplo de diseño de una antena parche [13]. . . . .	5
I.2.	Diagrama de conexión propuesto por el fabricante [17]. . . . .	7
I.3.	Diagrama de flujo de la metodología de trabajo. . . . .	11
I.4.	Diagrama de bloques de la patente SOFTWARE DEFINED RADAR US20220120851 [21]. . . . .	14
I.5.	Sistema de bloques de transmisión y recepción de la patente ES2746900 [22]. . . . .	14
I.6.	Representación de las aplicaciones de telecomunicaciones de la patente ES2746900 [22]. . . . .	15
I.7.	Diagrama de bloques de la patente SOFTWARE DEFINED AUTOMO- TIVE RADAR SYSTEMS [24]. . . . .	16
II.1.	Principios de operación de un georradar. . . . .	20
II.2.	Representación de la operación del georradar [26]. . . . .	21
II.3.	Representación de un espectrograma [28]. . . . .	25
II.4.	Espectrograma discontinuo [30]. . . . .	27
II.5.	Espectrograma continuo [30]. . . . .	28
II.6.	Diagrama que muestra la antena y sus fases de operación [31]. . . . .	28
II.7.	Variante de lazo de una antena tipo hilo. . . . .	30
II.8.	Modelo de arreglo de antenas [37]. . . . .	31
III.1.	Vista del sistema operativo LINUX. . . . .	37
III.2.	Diagrama de bloques de la arquitectura planteada para el prototipo. . . . .	38
III.3.	Diagrama de flujo de enlace entre subsistemas. . . . .	40
III.4.	Diagrama de bloques para prueba de espectrograma. . . . .	41
III.5.	Algoritmo generado para la transmisión. . . . .	43
III.6.	Esquema de conexión entre el módulo de hardware y el analizador de espectros. . . . .	43
III.7.	Diagrama de flujo para algoritmo de transmisión y recepción SDR. . . . .	44
III.8.	Esquema de conexión desde transmisión y recepción en el módulo Trans- ceptor. . . . .	45
III.9.	Bosquejo de la antena parche a diseñar. . . . .	45
III.10.	Modelo y dimensión de la antena parche. . . . .	47
III.11.	Parámetros asignados al sustrato dieléctrico. . . . .	47

III.12	Asignación de la capa conductora. . . . .	48
III.13	Esquema visual de conexión para evaluar el patrón de radiación . . . . .	48
III.14	Posicionamiento de la antena de banda ancha para la transmisión. . . . .	49
III.15	Posicionamiento de la antena diseñada para la recepción. . . . .	49
III.16	Diagrama ilustrado de la conexión de dos antenas a un Analizador Vectorial de Redes. . . . .	51
III.17	Subsistema de transmisión de georradar diseñado . . . . .	53
III.18	Subsistema de transmisión de georradar diseñado . . . . .	54
IV.1.	Implementación física del prototipo para pruebas a nivel de laboratorio. . . . .	62
IV.2.	Espectrograma correspondiente al diagrama de bloques mostrada en la Figura III.4 . . . . .	63
IV.3.	Espectro generado a través del enlace de 2.45 GHz visto desde un analizador de espectros. . . . .	63
IV.4.	Espectro generado a través del enlace de 2.45 GHz visto desde Matlab. . . . .	64
IV.5.	Transmisión con atenuación a -10 dBm. . . . .	65
IV.6.	Respuesta en frecuencia de las antenas diseñadas mediante simulación computacional. . . . .	66
IV.7.	Coefficiente de reflexión de la antena de transmisión. . . . .	67
IV.8.	Coefficiente de reflexión de la antena de recepción. . . . .	67
IV.9.	Patrón de radiación medido y simulado para la antena diseñada. . . . .	68
IV.10	Parámetros S21 y S11 de dos antenas para transmisión y recepción con 3cm de separación. . . . .	69
IV.11	Resultados pregunta 1 encuesta. . . . .	71
IV.12	Resultados pregunta 2 encuesta. . . . .	72
IV.13	Resultados pregunta 3 encuesta. . . . .	72
IV.14	Resultados pregunta 4 encuesta. . . . .	73
IV.15	Resultados pregunta 5 encuesta. . . . .	73
IV.16	Resultados pregunta 6 encuesta. . . . .	74
IV.17	Resultados pregunta 7 encuesta. . . . .	74
IV.18	Espectro obtenido al medir en el espacio libre (Pref). . . . .	75
IV.19	Línea de tendencia basadas en las mediciones de atenuación calculada obtenidas en la Tabla IV.4. . . . .	76
IV.20	Espectrograma resultante de la señal de referencia (sin objetivo). . . . .	78
IV.21	Espectrograma y espectro de frecuencia resultante de la señal con una placa de cobre. . . . .	78
IV.22	Espectrograma y espectro de frecuencia resultante de la señal con una varilla de acero. . . . .	79

IV.23Espectrograma y espectro de frecuencia resultante de la señal con un objetivo biológico. . . . .	79
IV.24Espectrograma y espectro de frecuencia resultante de la señal con una varilla de acero en terreno húmedo. . . . .	81



# Índice de tablas

I.1. Trabajos destacados recientes sobre las aplicaciones del georradar . . . . .	9
I.2. Resumen de reivindicaciones de patentes entorno a SDR. . . . .	17
II.1. Ventajas del SDR . . . . .	22
II.2. Desventajas del SDR . . . . .	23
II.3. Variaciones de antenas de hilo [33] . . . . .	30
III.1. Características de la Zynq-7000 . . . . .	39
III.2. Características del AD9361. . . . .	40
III.3. Parámetros de la señal seno. . . . .	41
III.4. Parámetros iniciales para diseño de antena a 2.45 GHz. . . . .	46
III.5. Tabla Compuesta de Parámetros de Antena Calculados . . . . .	46
III.6. Parámetros de la señal de onda discreta. . . . .	53
III.7. Parámetros de la función de generación de pulsos. . . . .	54
III.8. Características del tren de pulsos generado. . . . .	54
III.9. Tabla de Gestión de Riesgos . . . . .	57
III.10. Análisis de patentes actualizadas al momento de empezar pruebas de laboratorio. . . . .	59
IV.1. Resumen estadístico para diferentes niveles de atenuación. . . . .	64
IV.2. Parámetros S medidos a 2.45 GHz según la separación de antenas. . . . .	68
IV.3. Normatividad Aplicable por Sistema Tecnológico . . . . .	70
IV.4. Medición de potencia y atenuación para distintos tipos de arena. . . . .	75
IV.5. Análisis completo de detección para diferentes objetos en tierra seca. . . . .	77
IV.6. Análisis completo de detección para una varilla de acero en tierra húmeda. . . . .	80
IV.7. Tabla comparativa de tecnologías GPR. . . . .	82



# I. Introducción

Al hablar de georradar se refiere a un método no invasivo para el análisis del subsuelo, el cual usa pulsos de frecuencia que se envían y estos, al rebotar en algún objeto ubicado en el subsuelo, permiten un retorno de la potencia de la señal. El georradar tradicional, a nivel de componentes de hardware, requiere: la unidad de control, las antenas de recepción y transmisión, así como también de la unidad de visualización para la interpretación de las señales.

El sistema de radar tuvo sus primeras implementaciones en 1904 cuando Christian Hülsmeier obtuvo la primera patente de tecnología de radar, seis años más tarde se implementa una tecnología de radar basada en antenas de superficie con un radar de onda continua. La tecnología de radar como la conocemos hoy en día tuvo su origen en 1926 cuando el Dr. Hülsenbeck introdujo el sistema de radar por pulsos; este último representa un gran avance que se utiliza hasta el día de hoy en el que cada vez se van mejorando las técnicas de implementación ya sea en hardware o software [1].

A lo largo de la historia, el uso del georradar ha tenido gran relevancia en distintas disciplinas del estudio e investigación como: estudios ambientales, hidrogeología, ingeniería, ciencias forenses y arqueología. Específicamente en el estudio de varios casos específicos como son:

- Mapeo de subsuelo y lechos rocosos [2].
- Identificación de sumideros.
- Localización de tuberías, tanques subterráneos, etc.
- Determinar espesor en terrenos donde exista hielo.
- Localización de fuente de agua subterráneas.
- Estudio de suelo previo a la construcción de estructuras.
- Localización de fosas comunes [3].
- Estudio de la humedad del suelo [4].
- Localización de restos para estudio arqueológico [2].
- Estudios de construcción de vías para transporte público [5]

Y aunque las posibles áreas de aplicación del georradar son vastas, los costos asociados a la compra de uno de ellos siguen siendo considerables, especialmente cuando se busca utilizarlos con fines académicos de investigación y desarrollo.

Actualmente, en el mercado existen una amplia gama de dispositivos georradar diseñados con aplicaciones específicas, esto dependiendo mucho del área en la que aplique, ya sea en obras civiles, arqueológicas, forenses, etc. Las empresas que se destacan como fabricantes de estos dispositivos son LEICA GEOSYSTEMS, IDS GEORADAR Y NOVATEST [6]. Sin embargo, debido a su alto costo de implementación en hardware, dejan de ser accesibles para otros consumidores, ya sean estas: instituciones educativas, grupos científicos de experimentación, etc.

Debido a la difícil adquisición de un georradar sin importar su aplicación, la barrera de los elevados costos limita mucho su accesibilidad. Ante esta problemática, surge como necesidad el explorar nuevos enfoques para la fabricación de la herramienta georradar. Es por eso que este proyecto se enfocará en los georradares basados en Radios Definidos por Software, que no solo promete a futuro reducir costos, sino también su flexibilidad y la capacidad de personalizarlo según demande el objetivo del proyecto a realizar.

## 1.1. Planteamiento del Problema y Justificación

El georradar presenta un amplio rango de aplicabilidad en múltiples disciplinas, ya que es un instrumento capaz de detectar y ubicar objetos enterrados, estructuras subterráneas, etc. A partir de esa perspectiva del enfoque práctico y útil de las tecnologías de georradar, se motiva la investigación con un objetivo: descubrir nuevas técnicas para ampliar esta área del conocimiento, la cual se verá reflejada a lo largo de este proyecto técnico.

La tecnología de los radares de penetración terrestre (georradar) es muy útil en el área de desarrollo de obras civiles, por ejemplo, para la detección de grietas. En el trabajo mencionado en [7], se expone el uso de la técnica de un georradar 3D y los datos que este procesó fueron usados para crear una base de datos con la que se entrenaron modelos de aprendizaje profundo. Los modelos usados fueron los modelos YOLO (You Only Look Once) [8], que permiten detectar objetos en tiempo real. Los resultados mostraron que las versiones YOLOv4 y YOLOv5 son más efectivas para detectar grietas en pequeños conjuntos de datos comparados con la versión anterior (YOLOv3). YOLOv4 fue destacado por su velocidad de detección, alcanzando 10.16 cuadros por segundo en una CPU media, mientras que YOLOv5 obtuvo la mejor precisión de hasta 94.39%. Con esto, se rescata el uso del georradar y la adaptabilidad en otros campos; en este caso, adaptando al aprendizaje profundo, a futuro podría emplearse el prototipo a desarrollar en este proyecto y juntarlo con estos métodos de aprendizaje para crear un sistema robusto con mayor precisión.

Teniendo en cuenta el contexto de aplicaciones, en la República Mexicana, el uso de georradars es un potenciador en distintas áreas; una de ellas es para expediciones arqueológicas. Enfocados en encontrar y continuamente enriquecer la historia sobre el territorio mexicano, el Instituto Nacional de Antropología e Historia reportó, solo durante el 2023, varios descubrimientos a lo largo del territorio mexicano en localidades como Veracruz, Michoacán, Chapultepec, Campeche y Oaxaca, entre otras [9]. Esto destaca la importancia de contar con herramientas adecuadas en el área de expediciones arqueológicas.

Es importante recalcar el uso de la tecnología de georradar en el área de las ciencias forenses. De acuerdo con la estadística recabada hasta 2023, desde el 2018 se han encontrado alrededor de 2863 fosas clandestinas. Adicional a esto, el Registro Nacional de Personas Desaparecidas y No Localizadas señala que en el mismo período se encontraron 6046 personas sin vida, lo cual da una tasa de aproximadamente un 50 % de personas localizadas en fosas clandestinas [10]. De ahí la importancia de contar con herramientas como el georradar para la localización de restos humanos en el área de ciencias forenses.

El desarrollo de un sistema de georradar montado en drones, según el estudio reciente [3], representa un avance significativo en la eficiencia y efectividad de la búsqueda de fosas clandestinas. La integración de la tecnología GPR con drones no solo amplía el alcance de las áreas que pueden ser investigadas, sino que también minimiza la perturbación del sitio, un factor crucial para preservar la evidencia intacta en las escenas de crimen. Además, la mayor precisión en la localización de restos gracias al sistema RTK GPS facilita una rápida y precisa identificación de las zonas de interés. Esta innovadora aproximación optimiza los recursos en las investigaciones forenses y también promete incrementar la tasa de localización y recuperación de personas desaparecidas, brindando esperanza y resolución a más familias afectadas por estos sucesos.

La tecnología de georradar también puede trabajar en conjunto con otras tecnologías como la tomografía de resistividad eléctrica, que se usa para el mapeo de propiedades eléctricas del subsuelo, en conjunto ayudan a crear modelos 3D y 2D mejor detallados al momento de detectar objetos en el subsuelo, lo cual ha venido siendo de gran utilidad en el campo de la arqueología y geología para el descubrimiento de estructuras subterráneas o restos de las mismas [2].

Existen factores que pueden alterar las lecturas del georradar como: las condiciones climáticas, el tipo de suelo, etc., en el que, luego de establecer un sitio controlado con cuatro tumbas experimentales con diferentes condiciones de entierro, se adquirieron datos a través del georradar. Lograron determinar que suelos comunes como arcilla y arena afectan en la detección de objetivos forenses según varía su proporción [4].

El georradar, al igual que otras herramientas, tiene sus limitantes, por lo que es

necesario realizar adaptaciones, ya sean de hardware o software, por ejemplo para la detección de objetos alargados en el subsuelo [11], se propone un sistema de radar de doble polarización híbrido con una antena transmisora circularmente polarizada y dos receptoras linealmente polarizadas para mejorar la detección en objetos alargados presentes en el subsuelo. De tal manera que después de un modelo matemático, usando el método de rotación de Alford mejorado para estimar el ángulo de rotación de la varilla. Así como esta, existen varias limitantes al momento de investigar sobre la implementación del georradar en proyectos de índole profesional o educativa, limitaciones que se pueden ver en lo económico o tecnológico.

El costo de los georradares ha sido un obstáculo y marca una de las barreras más grandes para los usuarios al momento de querer adquirir uno de estos dispositivos portátiles ya sea con fines: de investigación o industriales. Esto se debe principalmente a su avanzada tecnología en hardware y el alcance que puede llegar a tener un georradar al momento de la detección de objetos y estructuras subterráneas. Aparte de eso, el software que ocupan estos dispositivos es especializado y está diseñado para que los usuarios logren interpretar y visualizar los datos recogidos. Los costos aproximados cuando se habla de adquirir un dispositivo GPR oscila entre los \$ 14,000 y \$ 100,000 [12], los costos varían debido a la necesidad de cada usuario final o el propósito que vaya a tener en la industria y depende de características como:

- Frecuencias (múltiples o única)
- Características de software
- Portabilidad
- Sistema GPS (simple o con interfaz de usuario)
- Almacenamiento de datos (local o servicio en la nube)

Bajo esta percepción, el portal MARKETS AND MARKETS proyecta que el mercado de georradares crecerá de 390.9 millones de dólares en 2025 a 579.4 millones para 2030, a una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 8.2%. Este crecimiento es impulsado principalmente por la alta demanda de equipos GPR para la seguridad y protección de servicios públicos subterráneos [6].

La búsqueda de nuevos modelos de georradar más económicos y para otros segmentos de mercado con menos recursos económicos se enfoca en hallar nuevas alternativas tecnológicas que permitan costos más accesibles, lo que permitirá su uso en más áreas del conocimiento y sectores industriales. La innovación incremental en la implementación de hardware y software juega un papel muy importante en la reducción de costos sin que su eficacia y precisión se vean afectadas. Se pone como ejemplo el desarrollo

de antenas de parche para georradars, las cuales serán desarrolladas y usadas en este proyecto de manera similar a lo observado en la Figura I.1, ya que constituyen una solución compacta y menos costosa de producir [13], comparándolas con las usadas comúnmente como: las antenas Yagi o logarítmicas.

Adicionalmente, estas nuevas soluciones permiten la integración a nuevos campos del mercado que tradicionalmente no han sido cubiertos, de manera que se abren oportunidades en donde el costo y las limitaciones técnicas representan una traba para el desarrollo.

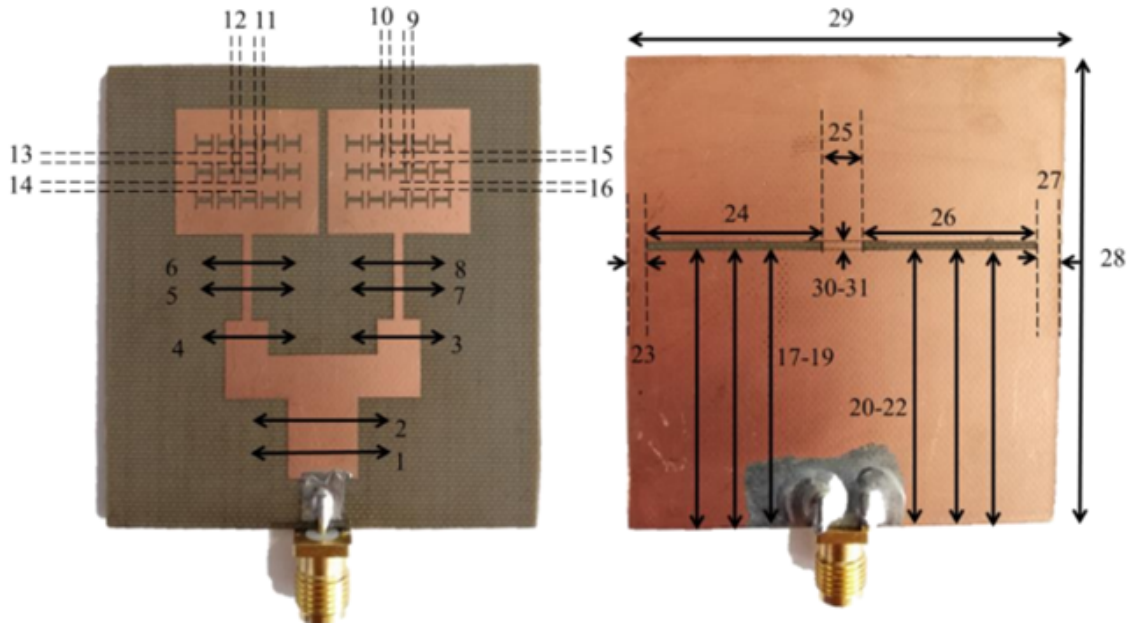


Figura I.1: Ejemplo de diseño de una antena parche [13].

En este contexto de búsqueda de otros caminos para la implementación de georradars, el Radio Definido por Software (SDR) aparece como una solución atractiva. El SDR se basa en el principio de que las funciones de hardware tradicionalmente fijas, como la modulación/demodulación, filtrado y amplificación, pueden realizarse mediante software en un procesador, FPGA o DSP (Digital Signal Processor).

El uso del Radio Definido por Software en investigaciones recientes se destaca principalmente por el nivel de su implementación sencilla y accesible, así lo propone el autor Mirel Paun [14], destaca en su trabajo un sistema que utiliza operaciones de radar chirp con un ancho de banda de 40 MHz, lo que le permite en teoría alcanzar una resolución espacial de 375 cm en el aire, la cual mejora en medios con alta permitividad, como el suelo humedecido, debido a la reducción de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. La disminución de la velocidad de las ondas en sustratos de alta permitividad, como la tierra húmeda, resulta en una mejor resolución espacial en comparación con la resolución teórica en el aire. Esta característica mejora la capacidad del

sistema de georradar montado en drones para detectar y ubicar con mayor precisión los restos enterrados en el subsuelo.

De la misma manera, existen alternativas para mejorar las técnicas de procesamiento de señales en uso de tecnología de georradar, al tomar en cuenta las técnicas de Radio Definido por Software para proporcionar un sistema más robusto y preciso para la calibración de las señales y la reducción de ruido. Al hablar de la reducción de ruido, citando el trabajo de investigación del autor Yan Zhang [15] en el que utiliza el método de regresión Ridge para mitigar el efecto del ruido en el receptor, lo cual tuvo como resultado imágenes de mejor calidad y mayor precisión en los datos recogidos. Actualmente, existen herramientas que nos permiten realizar Radio Definido por Software, y en este trabajo se utiliza una tarjeta FPGA de la familia ZYNQ-7000 AESZ7EV-7Z020-G, y en conjunto a esta se usará un transceptor de radiofrecuencia (RF) ADFMCOMMS2-EBZ, con el objetivo de transmitir y recibir frecuencia en altas velocidades a doble canal.

Al hablar de la tarjeta AD-FMCOMMS2-EBZ, esta aprovecha el transceptor RF AD9361, que permite generar y recibir señales de alta frecuencia en un rango ajustable, desde 70 MHz hasta 6 GHz. Esto permite una adaptación precisa a diferentes tipos de suelo y condiciones del terreno. Además, el módulo ofrece una interfaz digital que puede conectarse directamente a procesadores o a dispositivos FPGAs, proporcionando capacidades avanzadas de procesamiento de señales. Esto hace que el sistema sea flexible y versátil para diversas aplicaciones de exploración subterránea. Sin embargo, para optimizar el rendimiento en rangos específicos, puede ser necesario ajustar los componentes externos del sistema. Esto añade una capa adicional de adaptabilidad y personalización, haciendo al georradar aún más versátil y adecuado para una amplia gama de aplicaciones [16].

La conexión de la tarjeta ZedBoard con el módulo FMComms4 a través del conector FMCLPC, como se puede observar en la Figura 1.2, expande sus capacidades. Al actuar como el back-end del sistema, la tarjeta ZedBoard se encarga de tareas de mayor complejidad como modulación y de-modulación, el filtrado y el cifrado/descifrado de canales. Estos procesos han venido representados en la época actual, un significativo aporte para la implementación de nuevas tecnologías de radio, por ejemplo, el Radio Definido por Software (SDR).

La tecnología de los sistemas de georradar, aunque ya está en una etapa madura, continúa adicionando pequeñas mejoras que indican que su vigencia permanece. Entre algunos de los trabajos recientes se pueden mencionar: En el trabajo de [7], se empleó el modelo de aprendizaje profundo (deep learning) YOLO en conjunto con un georradar para la detección de grietas en el pavimento asfáltico, concluyendo la efectividad de los algoritmos YOLOv4 y YOLOv5 para cumplir con el objetivo del proyecto. Los trabajos

de [3] y [4] reportan el uso de GPR en Ciencias Forenses. En [3], se usa un sistema de drones con radares de penetración terrestre para localizar tumbas clandestinas, usando además GPS en tiempo real, generando un sistema autónomo. Los resultados fueron favorables, demostrando efectividad en distintos tipos de suelo y diferentes etapas de descomposición. En [4], se utiliza la visualización en 2D de georradar en un intervalo de frecuencias de 400 a 900 MHz, logrando mapear características superficiales del suelo y evaluar la composición y estructura del perfil.

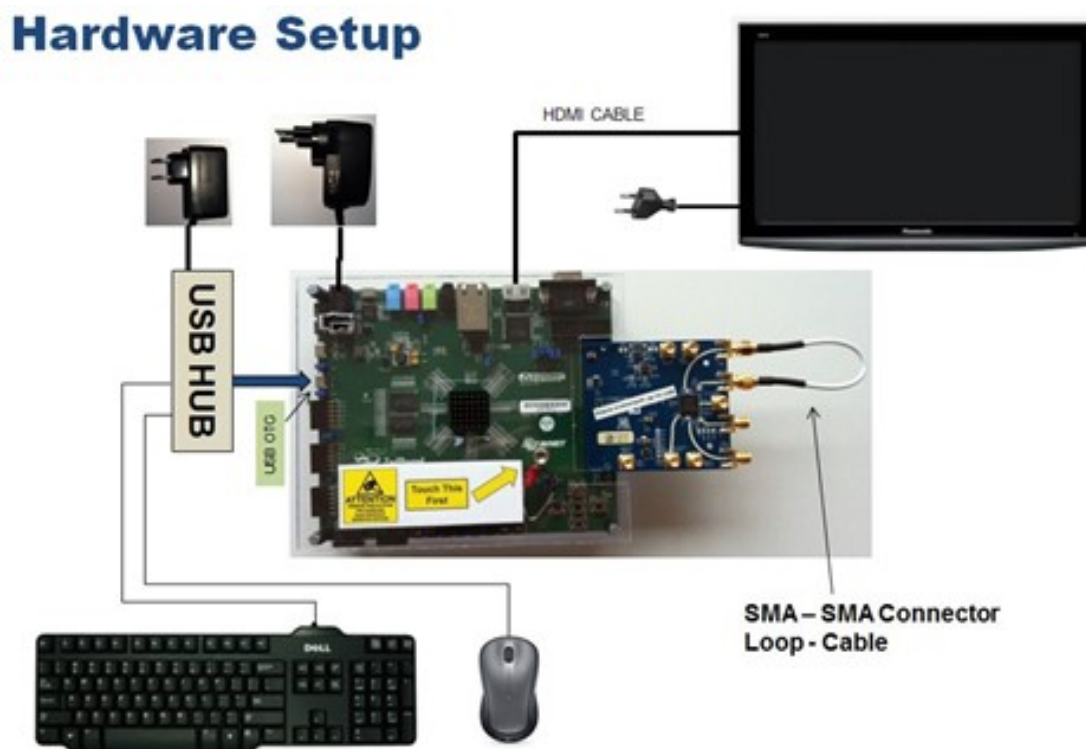


Figura I.2: Diagrama de conexión propuesto por el fabricante [17].

También se realizó una comparación en escenarios donde variaban la humedad y la composición del suelo, evaluando las condiciones climáticas y el contenido de arcilla para la detección de objetivos. En [11],[14],[15] se utiliza el GPR en Geología. En [11], se realizaron pruebas de laboratorio para evaluar el rendimiento bajo condiciones específicas y asegurar la validez de los resultados. Se usa la calibración polarimétrica para garantizar precisión en las mediciones del ángulo de orientación de objetos grandes enterrados. El sistema fue calibrado con un experimento utilizando un trihedro reticulado para corregir desequilibrios y diafonía entre los canales de recepción. En [14], se presentan resultados de un sistema GPR de bajo costo utilizando un sistema de Radio Definido por Software (SDR), antenas comerciales Vivaldi y una PC, logrando detectar un túnel con una resolución en el aire de 188 cm. En [15], se propone una técnica para optimizar la calidad de las señales en un sistema GPR utilizando SDR, empleando un

radar de onda continua de frecuencia escalonada (SFCW) y aplicando un proceso de calibración para corregir diferencias de fase entre transmisor y receptor. Además, se utiliza la regresión de cresta para reducir el ruido en las señales recibidas, logrando una mejora de 7 dB en la relación señal/ruido (S/R) en las mediciones A-scan, y de 13 dB en las imágenes B-scan. Otro de los campos en los que continúan introduciéndose mejoras en el GPR es en Arqueología, como se ve reportado en [2], el cual destaca el uso del GPR y la tomografía de resistividad eléctrica para ubicar estructuras terrestres en Turquía, mencionando hallazgos prometedores para futuras investigaciones y excavaciones. A continuación, en la Tabla I.1 se resumen algunos de los proyectos y áreas de aplicación más destacados y recientes.

Tabla I.1: Trabajos destacados recientes sobre las aplicaciones del georradar

Campo de Aplicación	Tema	SDR	Rango de Frecuencias	Características Destacadas
Ingeniería civil	Detectar grietas ocultas usando algoritmos de aprendizaje profundo [7].	No	40–2980 MHz	Tecnología de georradar. Modelos <i>deep learning</i> : YOLOv4 y YOLOv5. Precisión de detección $\approx 94.39\%$ . Velocidad de detección $\approx 10.16$ FPS en PC de escritorio.
	Uso de dron aéreo con georradar para localizar fosas clandestinas [3].	No	50–1400 MHz	Trayectorias de vuelo efectivas. Adaptable a distintos tipos de suelo y estados de descomposición.
Ciencias forenses	Comparación de datos obtenidos en temporada seca y lluviosa [4].	No	400–900 MHz	La estación impacta en la calidad de las imágenes 2D. Requiere parametrización según condiciones ambientales.
Geología	Calibración de datos obtenidos con un GPR [11].	No	50–6000 MHz	Corrección de desequilibrios y diafonía. Mejoras en la estimación de firmas hiperbólicas y orientación.
	GPR con SDR [14].	Sí	40 MHz	Detección de túnel de $2 \times 2$ m. Antenas comerciales monopolo; pruebas en aire y suelo.
Arqueología	Reducción de ruido para un GPR basado en SDR [15].	Sí	3–3500 MHz	Incrementos de S/R de 6.9 y 8.2 dB en A-scan y B-scan. Regresión de cresta para reducir ruido. Configuración <i>loopback</i> para eliminar diferencias de fase y de la RF interna.
	Uso conjunto de GPR y tomografía de resistividad eléctrica en arqueología [2].	No	50–1400 MHz	Localización de estructuras subterráneas. Menor efectividad en suelos arcillosos de alta humedad.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. General

Instrumentar a nivel 4 de la Escala de Desarrollo Tecnológico un prototipo de georradar operando en la banda de 2.45 GHz como posible alternativa tecnológica para usos académicos y sociales a los georradars comerciales.

### 1.2.2. Específicos

1. Instrumentar un espectrograma de potencia de señal mediante el uso del software SIMULINK y una Interfaz de Usuario Gráfica, desarrollada específicamente para la interpretación de la información proporcionada por el georradar a desarrollar.
2. Instrumentar un transceptor de pulsos en la banda de 2.45 GHz mediante la programación de la tarjeta de desarrollo de sistemas de radio frecuencia AD-FMCOMMS2-EBZ y la tarjeta de desarrollo FPGA AES-Z7EV-7Z020-G.
3. Diseñar y manufacturar un sistema radiante de dos antenas para transmisión y recepción que opere en la banda de 2.45 GHz.
4. Utilizar técnicas de las Oficinas de Transferencia de Tecnología para evaluar el prototipo desarrollado como posible alternativa tecnológica a los georradars comerciales para usos académicos y sociales.

### 1.3. Metodología

En la Figura I.3, se muestra el diagrama de flujo que corresponde a las etapas cruciales de este proyecto de tesis. Este programa está diseñado de forma sistemática, basado en los objetivos y organizado en cascada.

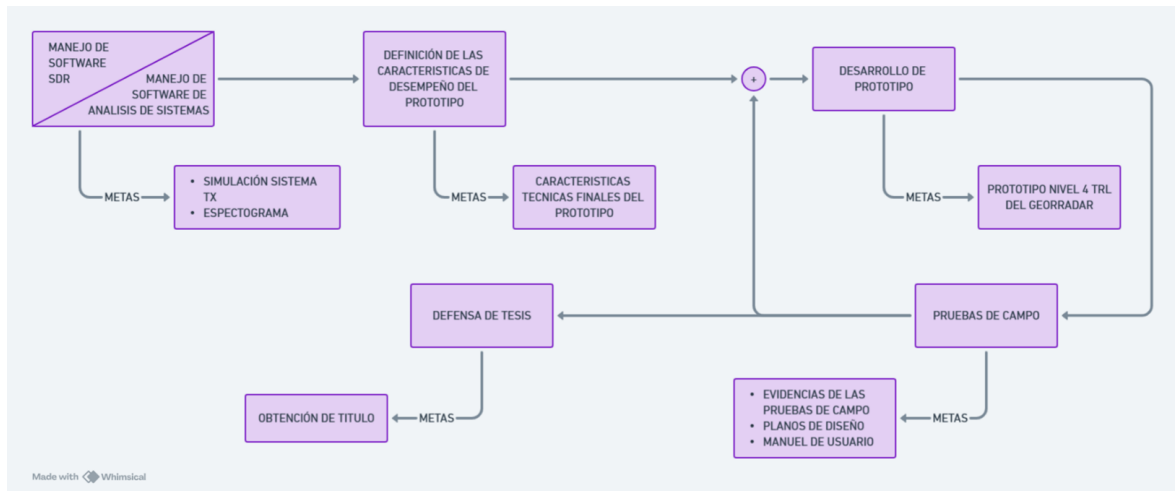


Figura I.3: Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.

### 1.4. Revisión Histórica de Uso del Georradar

En secciones anteriores se mencionaron brevemente los hechos históricos y sus protagonistas para el desarrollo de las primeras tecnologías de radar. Sin embargo, los primeros estudios de georradar no se dieron sino hasta el año de 1929 por W. Stern, el cual se enfocó en medir el espesor de glaciares en Austria, poniendo atención a un estudio aéreo que proporcionaba el análisis de señales que rebotaban desde las superficies de hielo a las montañas más altas. Esta investigación despertó el interés por el estudio del comportamiento de las señales de radar [18]. Se pueden destacar otros estudios sobre georradar como El Said (1956) y Waite y Schmidt (1961), quienes demostraron la capacidad del GPR para la detección de características subsuperficiales. La demostración de Waite del sonido de hojas de hielo con altímetros de radar instalados en aeronaves, lo que llevó al uso del eco de radio en muchos lugares del mundo [19]. Y no fue sino hasta el año de 1960 cuando se propuso el uso de radares móviles por Robin John Call Cook, quien escribió el artículo llamado “Proposed monocycle-pulse, Very High Frequency radar para airborne ice and snow measurements” [20].

El conocimiento básico sobre el GPR creció rápidamente, y las aplicaciones del método se diversificaron notablemente. En los años 1980, el uso del GPR se expandió significativamente debido a avances tecnológicos y un mejor entendimiento de las propiedades físicas involucradas. Desde el principio, estos radares se desarrollaron pa-

ra uso militar, por ejemplo, para la localización de túneles en la zona desmilitarizada en Corea del Norte. Pronto siguió el uso comercial. El georradar halló su aplicación práctica en las necesidades de mapeo e ingeniería y en los servicios municipales que realizaban pruebas en el terreno para empresas privadas. También se llevaron a cabo diversas investigaciones adicionales utilizando la tecnología de GPR, por ejemplo, con el objetivo de explorar minas subterráneas y depósitos de sal [18].

Los primeros georradars asequibles se vendieron a mediados de los años 90. Actualmente, existen varias empresas que fabrican sistemas GPR y diversas compañías que ofrecen servicios de medición. Además, se realizan investigaciones en el campo del georradar en universidades de todo el mundo. La mayoría de los sistemas están destinados a su uso en superficie, donde el transmisor y el receptor están ubicados sobre el suelo. Sin embargo, existen también aplicaciones especiales, como en pozos estrechos, donde el sistema debe caber en un orificio que puede tener una profundidad de más de un kilómetro [18].

## 1.5. Enfoque Actual

En la era moderna, el georradar (GPR) ha emergido como una herramienta invaluable en diversos campos, revolucionando metodologías tradicionales y ampliando las capacidades de investigación y análisis en múltiples disciplinas. Su importancia es evidente en áreas como la arqueología, la detección de minas terrestres y la predicción de la salud de las baterías de iones de litio (LIBs). Este ensayo explora cómo el GPR ha transformado estas áreas y la importancia de su uso en la actualidad.

En la arqueología, el GPR ha cambiado radicalmente la manera en que los investigadores descubren y estudian sitios históricos. Tradicionalmente, la arqueología dependía de métodos invasivos y laboriosos, como la excavación y la trinchera, para descubrir restos enterrados. Sin embargo, con la introducción del GPR, los arqueólogos pueden ahora explorar grandes áreas con rapidez y precisión, sin causar daño a los sitios arqueológicos. Esta tecnología permite obtener imágenes detalladas del subsuelo, revelando estructuras y objetos sin necesidad de excavación. Por ejemplo, investigaciones geofísicas en el famoso 'plateau' de Giza han proporcionado imágenes detalladas de las pirámides y la Esfinge, facilitando un estudio más profundo de estas estructuras sin riesgo de daño.

La integración de tecnologías avanzadas como el GPS y dispositivos de comunicación remota ha incrementado la eficiencia de las investigaciones geofísicas, permitiendo a los arqueólogos recopilar datos de manera más rápida y precisa. Esta capacidad no invasiva es crucial para preservar la integridad de los sitios arqueológicos, lo cual es una de las mayores necesidades en el campo de la arqueología. La combinación de métodos geofísicos en arqueología ha dado lugar a una subdisciplina conocida como

arqueogeofísica, destacando la importancia de esta tecnología en las investigaciones arqueológicas modernas.

En el ámbito de la detección de minas terrestres, el GPR ha demostrado ser una herramienta vital para mejorar la seguridad y eficiencia de las operaciones de desminado. Durante la última década, se han enterrado una cantidad alarmante de minas terrestres, lo que representa un grave riesgo para la vida humana y limita el uso seguro de vastas áreas de terreno. Las plataformas autónomas equipadas con GPR, incluyendo vehículos aéreos no tripulados (UAVs), han sido desarrolladas para acelerar el proceso de detección de minas y reducir los riesgos para los operarios humanos.

El GPR permite la detección precisa de objetos enterrados, incluso en condiciones ambientales adversas. Sin embargo, factores como la humedad del suelo, la rugosidad de la superficie y la vegetación pueden afectar la calidad de las señales reflejadas, presentando desafíos adicionales.

## 1.6. Trabajos Similares

A pesar de estos obstáculos, los avances en el procesamiento de datos y la optimización de hardware continúan mejorando el rendimiento del GPR, destacando su papel crucial en la detección precisa de minas terrestres y contribuyendo significativamente a los esfuerzos de desminado humanitario.

El uso de GPR también se ha extendido al campo de la predicción de la salud de las baterías de iones de litio (LIBs), esenciales en dispositivos electrónicos, sistemas de almacenamiento de energía y tecnología aeroespacial. La capacidad de las LIBs se degrada con el tiempo, lo que puede representar riesgos de salud y seguridad. La predicción precisa del estado de salud (SOH) y la vida útil restante (RUL) de estas baterías es crucial para garantizar su funcionamiento seguro y eficiente. En este enfoque se puede determinar un segmento de mercado muy importante dada la creciente demanda de autos eléctricos, pues se puede enfocar en dar un seguimiento de mayor precisión para poder emitir un diagnóstico en la vida útil de las baterías usadas por los vehículos eléctricos.

Un modelo innovador basado en la descomposición en modos empíricos (EMD) y el algoritmo de filtro de partículas-regresión de procesos gaussianos (PF-GPR) ha demostrado ser eficaz para predecir con precisión el SOH y la RUL de las LIBs. Este modelo descompone la curva de degradación de las baterías para capturar fluctuaciones locales y tendencias de degradación, utilizando algoritmos avanzados para predecir secuencias específicas y establecer relaciones de mapeo precisas. Este enfoque ha mostrado un error relativo de predicción de SOH inferior al 1,5 % y un error absoluto máximo de predicción de RUL de un ciclo, superando a modelos anteriores en precisión y robustez. Posteriormente, el procesador acumula estos pulsos para construir una forma de onda

de banda ancha sintética (SWW). Como se puede observar en el diagrama de bloques de la Figura I.4, el sistema incluye un procesador y un dispositivo de entrada para recibir el plan de frecuencias y los pulsos reflejados, realizando el desplazamiento y la acumulación de los pulsos para la construcción de la SWW.

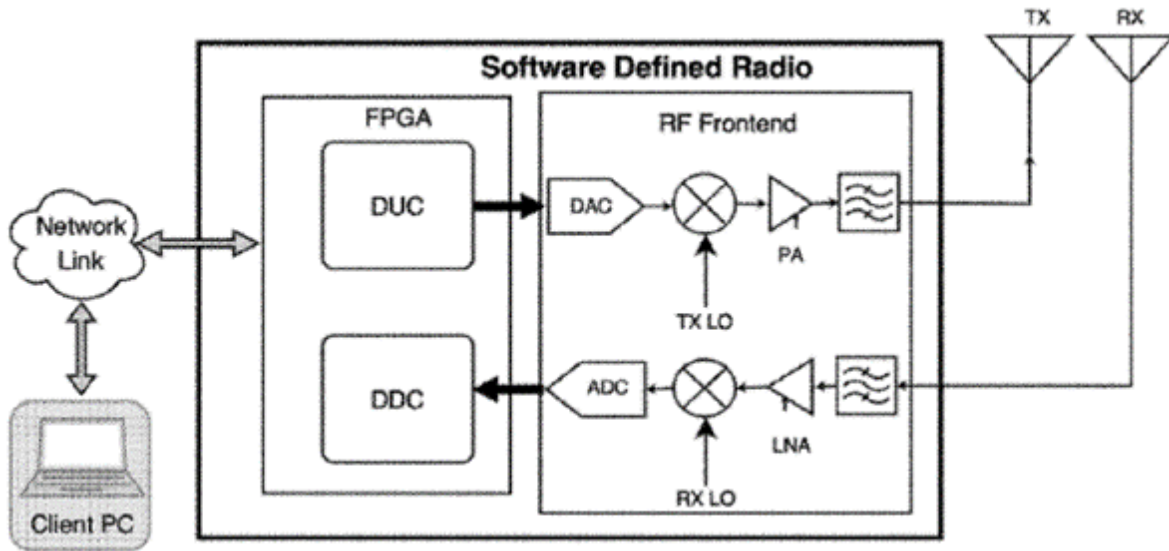


Figura I.4: Diagrama de bloques de la patente SOFTWARE DEFINED RADAR US20220120851 [21].

El siguiente proyecto analizado describe un terminal de radio definido por software (SDR) diseñado para un sistema de antenas múltiples inteligentes. Como se puede observar en el diagrama de bloques de la Figura I.5, este terminal incluye una unidad de almacenamiento, un microprocesador y al menos un acelerador de banda base.

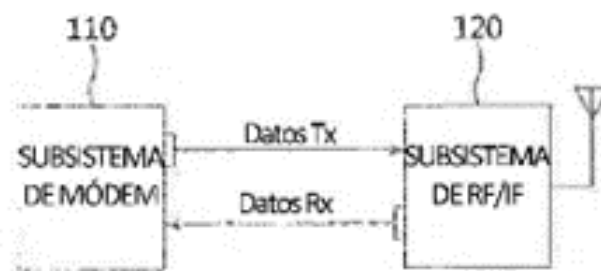


Figura I.5: Sistema de bloques de transmisión y recepción de la patente ES2746900 [22].

El microprocesador lee el código desde la unidad de almacenamiento y ejecuta comandos para cargar bloques de función al acelerador de banda base, implementando así varios algoritmos de antena inteligente. Estos algoritmos incluyen la multiplexación

espacial, modelado de haz, codificación de espacio-tiempo y estimación de dirección de llegada. Contiene una terminal cuya capa de mando de radio transfiere comandos de control para seleccionar y manejar estos algoritmos. La capa de controlador de banda base recibe estos comandos y los transfiere al acelerador de banda base.

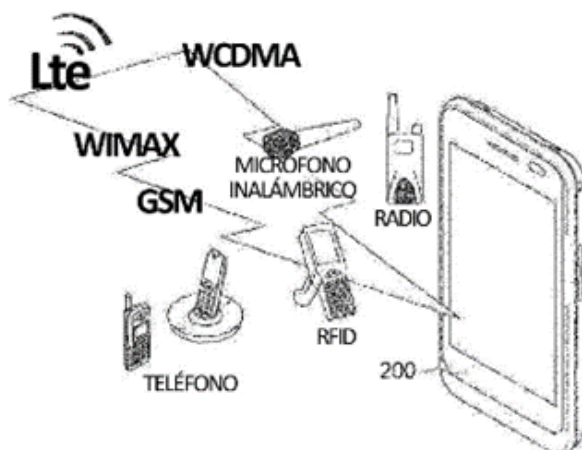


Figura I.6: Representación de las aplicaciones de telecomunicaciones de la patente ES2746900 [22].

Los bloques de función están diseñados para implementar algoritmos específicos y son controlados por un bloque de control que gestiona las operaciones e interfaces según el algoritmo seleccionado. Es lo que describen los autores del proyecto patentado que se titula “DISPOSITIVO TERMINAL DE RADIO DE DEFINICIÓN POR SOFTWARE DE ANTENA INTELIGENTE Y PROCEDIMIENTO PARA DISTRIBUIR E INSTALAR UNA APLICACIÓN DE TERMINAL DE RADIO DE DEFINICIÓN POR SOFTWARE” [22].

El autor Shope Steven en su trabajo patentado US20120249356 describe un sistema de radar penetrante de superficie y una metodología asociada para investigar la superficie y el subsuelo de una zona objetivo. El sistema implementa un código de espectro ensanchado de secuencia directa (DSSS) de ancho de banda estrecho para minimizar la dispersión y distorsión dependientes de la frecuencia. Este enfoque permite mayores ganancias de proceso para adaptarse a diferentes profundidades de penetración y mejorar la recuperación de señales reflejadas. La señal de radar DSSS, con requisitos de potencia pico relativamente bajos, es adecuada para aplicaciones aéreas como aviones tripulados y UAVs. El radar puede detectar objetos ocultos bajo la superficie o entre diferentes materiales debido a sus propiedades electromagnéticas distintivas. Además, puede operarse en diferentes plataformas, como torres y montañas, no limitado solo a plataformas aéreas. El sistema ajusta dinámicamente la ganancia del proceso variando la longitud de la secuencia y el factor de expansión de chips para optimizar la

penetración y la detección de señales reflejadas [23].

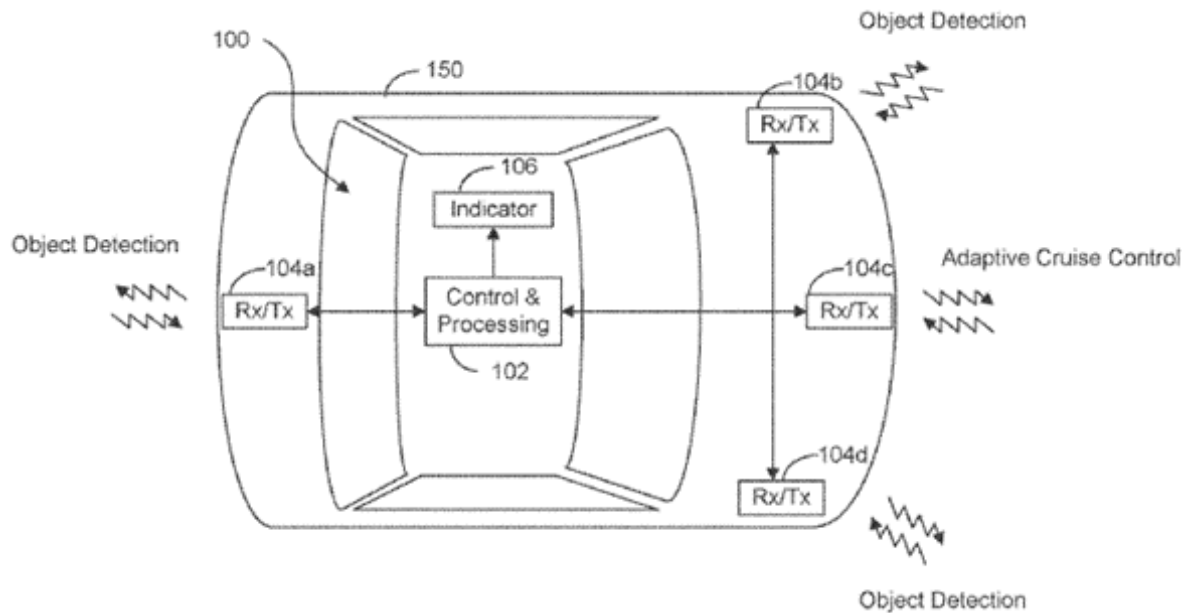


Figura I.7: Diagrama de bloques de la patente SOFTWARE DEFINED AUTOMOTIVE RADAR SYSTEMS [24].

Colaboradores de la firma UNHDER, INC, a través de su desarrollo en el proyecto “SOFTWARE DEFINED AUTOMOTIVE RADAR SYSTEMS” [24], dan a conocer métodos y un sistema de radar que pueden adaptarse a diferentes entornos y objetivos modificando el procesamiento de transmisión y recepción para optimizar el rendimiento. Esto se logra ajustando características de la señal transmitida como la señal de banda base, el ancho de banda, la frecuencia, la potencia y las antenas de transmisión, así como el procesamiento del receptor, incluyendo las antenas de recepción, técnicas de mitigación de interferencias y la duración del procesamiento de la señal. Un sistema de radar para vehículos incluye, como se puede ver ejemplificado en la Figura I.7, múltiples transmisores y receptores, una memoria y una unidad de control que gestiona la operación y el procesamiento de datos para mejorar la detección de objetos en el entorno, facilitando la adaptabilidad del sistema, la cual asegura un rendimiento óptimo del radar en condiciones variables.

En la Tabla I.2 presenta un resumen de reivindicaciones clave de diversas patentes centradas en la tecnología de SDR aplicada a sistemas de radar. En ella se detallan el folio, el título y las reivindicaciones específicas que cada invención aporta al campo, abarcando desde el ajuste de frecuencia y el filtrado de señales hasta algoritmos avanzados para antenas inteligentes y sistemas automotrices.

Tabla I.2: Resumen de reivindicaciones de patentes entorno a SDR.

<b>Folio de Patente</b>	<b>Título</b>	<b>Reivindicación en SDR</b>
US20220120851	SOFTWARE DEFINED RADAR	Recibe series de pulsos reflejados Frecuencia ajustable Onda SWW La SWW ofrece una alta resolución Aplica filtros de supresión de lóbulos Recepción desde microcontrolador con SDR y FPGA
ES2746900	Dispositivo terminal de radio de definición por software de antena inteligente y procedimiento para distribuir e instalar una aplicación de terminal de radio de definición por software.	Microprocesador para implementar algoritmos de antena inteligente Control por capas Bloques de función específicos Paquetes descargables para SDR Bloques de función descargables y reconfigurables Flexibilidad en SDR según algoritmos de antena inteligente
US20120493356	SURFACE PENETRATING RADAR SYSTEM AND TARGET ZONE INVESTIGATION METHODOLOGY	Espectro ensanchado de secuencia directa Algoritmo DSSS que mejora la detección en áreas de interés Modulación de la señal para cubrir mayores distancias sin pérdida de señal Ajuste de parámetros de ejecución del algoritmo DSSS
US20190904353	SOFTWARE DEFINED AUTOMOTIVE RADAR SYSTEMS	Sistema transmisor y receptor ajustable Detección y filtrado de señales de interferencia Configuración por condiciones ambientales Procesamiento Doppler avanzado para mejorar la precisión en la estimación de velocidad de objetos específicos



# II. Radio-Definido por Software y sus Aplicaciones como Georradar

## 2.1. Georradar: Usos y Aplicaciones

El radar de penetración terrestre (GPR), también conocido como radar de penetración superficial (SPR), está diseñado para investigar el subsuelo. Su uso se ha extendido no solo a la inspección de suelos, sino también a la de paredes y otras estructuras. El GPR se compone principalmente de una unidad central, una antena transmisora, una antena receptora y una computadora. La unidad central genera un pulso electromagnético, o señal electromagnética, que es emitida al suelo por la antena transmisora. Aunque la señal se irradia en todas las direcciones, la mayor parte de la energía se concentra en un volumen cónico bajo la antena. Cuando las ondas electromagnéticas encuentran una discontinuidad enterrada, como un objeto, la interfaz entre dos capas geológicas, una cavidad o una zona con diferente humedad, estas se dispersan en todas las direcciones, incluida la reflexión hacia la antena receptora. Generalmente, las antenas transmisora y receptora están incorporadas en una estructura rígida que se mueve conjuntamente, permitiendo que la señal recopilada se visualice en tiempo real en la pantalla del computador y se almacene en su disco duro. El equipo del GPR también incluye cables adecuados para conectar la unidad central, las antenas y la computadora, junto con un dispositivo para suministrar energía en el campo, generalmente proporcionada por baterías recargables [25].

El principio de funcionamiento de un GPR es similar al de un radar convencional, aunque existen diferencias significativas en términos de tecnologías, necesidades, aplicaciones y bandas de frecuencia. A diferencia del radar convencional, que usualmente detecta objetivos en movimiento, el GPR se utiliza para identificar objetivos estáticos, y la interpretación de los datos no suele requerirse en tiempo real. Las ondas electromagnéticas del GPR no se propagan en el aire, sino en medios más complejos (como se ejemplifica en la Figura II.1) con diferente permitividad, que suelen ser inhomogéneos, con pérdidas, posiblemente dispersivos, y en algunos casos anisotrópicos y/o magnéticos. Además, las características del medio no son conocidas a priori y deben ser estimadas a partir de los datos recogidos. Esto resalta la importancia del GPR en la investigación geofísica, donde su capacidad para penetrar diversos tipos de terreno y materiales hace posible la detección y análisis de características subterráneas de manera no invasiva y con alta precisión.

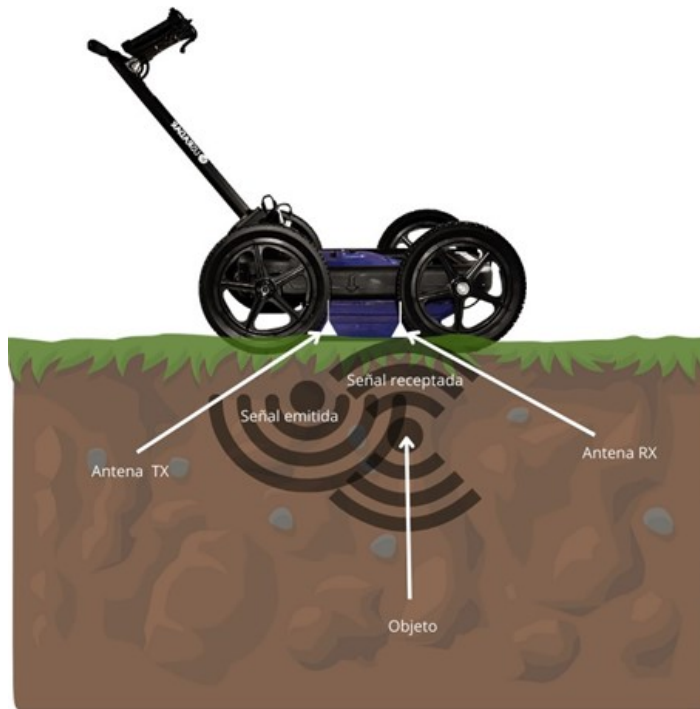


Figura II.1: Principios de operación de un georradar.

### 2.1.1. Campos de Estudio y Aplicación

El radar de penetración terrestre (GPR) tiene una amplia gama de aplicaciones que abarcan diversos campos, cada uno beneficiándose significativamente de esta tecnología. En arqueología, el GPR permite identificar áreas con posibles restos enterrados de interés, evitando excavaciones exhaustivas y costosas. También es crucial en la arqueología preventiva, ya que ayuda a prospeccionar áreas antes de la construcción de infraestructuras para evitar la destrucción de sitios arqueológicos [19]. Además, el GPR es útil para monitorear monumentos históricos, proporcionando información sobre su estado de conservación y ayudando en proyectos de restauración. Por ejemplo, puede detectar habitaciones ocultas, criptas y frescos no visibles a simple vista, proporcionando datos valiosos para historiadores y conservadores.

En la ingeniería civil, el GPR se utiliza para identificar daños estructurales y localizar infraestructuras ocultas como alcantarillas y tuberías, como se ejemplifica en la Figura II.2. Esto es especialmente importante cuando los registros de estas estructuras son imprecisos o inexistentes. La detección de minas es otra aplicación crítica del GPR, pues muchos explosivos modernos no pueden ser detectados por métodos convencionales como los detectores de metales. El GPR puede determinar la posición, tamaño y forma de estos objetos enterrados, mejorando la seguridad en operaciones de desminado. Además, el GPR es utilizado en la monitorización de asfalto para identificar subsidencias o daños antes de que se conviertan en peligros para los conductores y

peatones, siendo particularmente útil en regiones con ciclos de congelación y deshielo [19].



Figura II.2: Representación de la operación del georradar [26].

En minería, el GPR ayuda a identificar vetas superficiales de minerales y a evaluar la estabilidad de estructuras mineras, detectando fracturas y filtraciones de agua que podrían comprometer la seguridad. También es utilizado en prospecciones en hielo polar, proporcionando información sobre la historia geológica y los cambios climáticos. En cuerpos de agua dulce, el GPR se aplica en estudios de sedimentología del fondo de lagos y ríos [19]. En agricultura industrial, el GPR evalúa las características electromagnéticas de las capas superficiales del suelo, ayudando a optimizar la distribución del agua. Incluso en la exploración espacial, el GPR se utiliza en Marte para buscar agua y signos de vida pasada o presente. Otras aplicaciones incluyen la búsqueda forense de cuerpos y armas enterradas y la prospección en pozos perforados. La versatilidad y precisión del GPR lo convierten en una herramienta indispensable en múltiples disciplinas.

## 2.2. Radio-Definida por Software (SDR)

El Radio Definido por Software (SDR, por sus siglas en inglés) es una tecnología que permite que algunas o todas las funciones de la capa física de un sistema de radio sean implementadas mediante software. En lugar de utilizar componentes de hardware específicos para cada función de la radio, el SDR emplea software ejecutado en un procesador programable para llevar a cabo tareas de transmisión y recepción de señales. Esta capacidad de definir y controlar funciones de radio mediante software proporciona una gran flexibilidad y adaptabilidad en el diseño y operación de sistemas

de comunicación inalámbrica [27].

### 2.2.1. Características

- **Flexibilidad:** Los SDR pueden ser reconfigurados para admitir múltiples estándares de comunicación, frecuencias y modos de operación mediante actualizaciones de software, sin necesidad de modificar el hardware.
- **Actualización de software:** Los sistemas SDR pueden ser mejorados y adaptados a nuevas necesidades mediante actualizaciones de software, lo que facilita la implementación de nuevas tecnologías y estándares sin reemplazar el hardware.
- **Reutilización de Hardware:** Un solo dispositivo de radio puede ser utilizado para múltiples aplicaciones, reduciendo los costos y la complejidad de tener diferentes equipos para diferentes propósitos.
- **Adaptabilidad:** Los SDR pueden adaptarse rápidamente a cambios en el entorno de comunicación, como variaciones en la calidad de la señal o la congestión del espectro, ajustando dinámicamente sus parámetros de operación.

Al igual que múltiples otros sistemas, al momento del análisis, el SDR tiene sus ventajas (Tabla II.1) y desventajas (II.2), y en base a la teoría revisada para el desarrollo de este proyecto, a continuación, se enumeran unas cuantas, de las cuales se consideran relevantes.

Tabla II.1: Ventajas del SDR

Ventajas	Descripción
Eficiencia de costos	Al reducir la necesidad de múltiples dispositivos de hardware y permitir actualizaciones a través de software, los costos de implementación y mantenimiento se reducen significativamente.
Compatibilidad con Múltiples Estándares	Los SDR pueden soportar una amplia gama de protocolos y estándares de comunicación, facilitando la interoperatividad entre diferentes sistemas y redes.
Rápida Implementación de Nuevas Tecnologías	Las nuevas funciones y mejoras tecnológicas pueden ser implementadas rápidamente mediante actualizaciones de software, acelerando el tiempo de despliegue en el mercado.
Mejora Gestión del Espectro	Los SDR pueden ajustar dinámicamente su uso del espectro, optimizando la utilización de este y reduciendo la interferencia entre sistemas.

Tabla II.2: Desventajas del SDR

<b>Desventajas</b>	<b>Descripción</b>
Consumo de energía	Los procesos intensivos en software pueden requerir más energía que las soluciones basadas en hardware, lo que puede ser un desafío en dispositivos móviles o alimentados por baterías.
Complejidad de Diseño	El diseño y desarrollo de sistemas SDR puede ser más complejo debido a la necesidad de integrar software y hardware de manera efectiva.
Requisitos de Procesamiento	Los SDR necesitan procesadores potentes para manejar las tareas de procesamiento de señales en tiempo real, lo que puede aumentar los costos y el consumo de energía.
Seguridad y Vulnerabilidades	Al depender del software, los SDR pueden ser más susceptibles a vulnerabilidades de seguridad como ataques de malware o hackeos, requiriendo medidas adicionales de seguridad.

## 2.2.2. Aplicaciones SDR

Los Radios Definidos por Software representan una revolución en múltiples campos, desde las comunicaciones militares hasta las redes comerciales, la investigación y el mundo de los radioaficionados. Su capacidad para adaptarse rápidamente a nuevas necesidades, actualizarse mediante software y proporcionar una plataforma flexible para la experimentación y el desarrollo, asegura que los SDR continuarán siendo una tecnología clave en la evolución de las comunicaciones inalámbricas [27]. A medida que las demandas de comunicación continúan creciendo y evolucionando, los SDR estarán a la vanguardia, proporcionando soluciones innovadoras y adaptables para los desafíos del futuro. De las aplicaciones más destacadas que se pueden rescatar son:

### Comunicaciones Militares

Los Radios Definidos por Software (SDR) juegan un papel crucial en las comunicaciones militares debido a su capacidad para asegurar la interoperatividad entre diversos sistemas de comunicación. En entornos militares, donde la situación puede cambiar rápidamente, es esencial que los sistemas de comunicación sean adaptables. Los SDR permiten ajustar dinámicamente las frecuencias, modos de operación y protocolos de comunicación, asegurando que las unidades militares puedan comunicarse de manera efectiva, sin importar el equipo que utilicen. Además, la capacidad de los SDR para actualizarse mediante software significa que pueden integrar nuevas tecnologías y estándares de manera rápida, manteniéndose al día con los avances tecnológicos sin la necesidad de reemplazar el hardware.

## **Redes de Comunicación Comercial**

En el ámbito de las redes de comunicación comercial, las operadoras de telecomunicaciones utilizan los SDR para facilitar la transición entre diferentes estándares de comunicación, como el cambio de 4G a 5G. Esta flexibilidad es crucial para la implementación de nuevas tecnologías de manera eficiente y económica. Los SDR permiten a las operadoras actualizar sus redes con nuevas capacidades sin necesidad de un cambio completo de infraestructura, lo que reduce costos y tiempo de implementación. Además, los SDR pueden adaptarse a diferentes bandas de frecuencia y tecnologías, lo que es especialmente útil en entornos con múltiples estándares de comunicación coexistentes.

## **Investigación y Desarrollo**

Los SDR son herramientas valiosas en investigación y desarrollo, permitiendo a los investigadores y desarrolladores probar y evaluar nuevas ideas y tecnologías de comunicación de manera eficiente y flexible. Gracias a su naturaleza reconfigurable, los SDR pueden ser programados para emular diferentes sistemas de comunicación, facilitando el desarrollo y prueba de nuevas aplicaciones y estándares. Esta capacidad es especialmente útil en el desarrollo de tecnologías emergentes, como las comunicaciones de baja latencia y las redes definidas por software (SDN). Los SDR también permiten a los investigadores realizar experimentos y pruebas de campo con mayor rapidez y menor coste, acelerando el proceso de innovación.

## **Radiocomunicación**

En el mundo de la radiocomunicación, los SDR han abierto nuevas posibilidades para la experimentación y el aprendizaje. Los radio aficionados utilizan SDR para explorar y experimentar con diferentes modos de transmisión y recepción, aprovechando la flexibilidad y capacidad de re-configuración que ofrecen estos sistemas. Los SDR permiten a los radio aficionados recibir y transmitir en una amplia gama de frecuencias y modos, desde las bandas de onda corta hasta las de VHF y UHF, y experimentar con modos digitales avanzados. Esta versatilidad hace que los SDR sean una herramienta invaluable para aquellos interesados en la radiocomunicación, fomentando la innovación y el descubrimiento en el campo.

## **2.3. Espectrograma**

Un espectrograma es una representación gráfica que muestra cómo el contenido en el dominio de la frecuencia de una señal cambia o progresa a lo largo del tiempo. Esta herramienta es esencial en el análisis de señales de radiofrecuencia (RF), ya que permite visualizar tanto las características estáticas como las dinámicas y transitorias

de la actividad espectral. En esta sección se exploran los conceptos y clasificación de los espectrogramas con el objetivo de poder analizar su principio de funcionamiento.

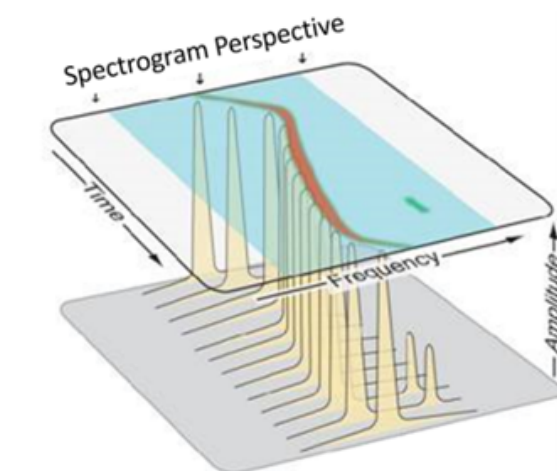


Figura II.3: Representación de un espectrograma [28].

### 2.3.1. Definición

Un espectrograma se compone de una colección de trazas de espectro que se procesan y apilan a lo largo del tiempo. Cada traza individual del espectro representa la variación de amplitud o magnitud a través del ancho de banda de la frecuencia [29]. Estas trazas se colocan una al lado de la otra para formar una imagen completa, donde el eje horizontal representa el ancho de banda de frecuencia y el eje vertical representa el tiempo (Figura II.3). Los colores en el espectrograma indican la magnitud de la señal en cada punto de la traza del espectro, permitiendo observar fácilmente la actividad espectral a lo largo del tiempo.

### 2.3.2. Procesamiento Básico del Espectro

La mayoría de los espectrogramas se basan en trazas de espectro obtenidas de datos crudos recogidos a lo largo del tiempo y calculados mediante alguna forma de Transformada de Fourier Discreta, como la Transformada Rápida de Fourier (FFT) o la Transformada Chirp-Z (CZT). El tiempo de adquisición de datos utilizado para cada FFT/CZT se denomina “tiempo de espectro”, el cual es inversamente proporcional a la resolución del Ancho de Banda (RBW). Configuraciones de RBW más estrechas requieren tiempos de espectro más largos. Por ejemplo, una traza de espectro con un RBW de 100 kHz puede requerir un tiempo de espectro de 22.3  $\mu$ s, mientras que un RBW de 10 kHz podría necesitar un tiempo de espectro de 223  $\mu$ s. Este concepto es

fundamental para entender cómo se construyen los espectrogramas y la relación entre la resolución de frecuencia y el tiempo de adquisición [29].

Al hablar de señales discretas, es de gran uso la Transformada de Fourier de Tiempo Discreto y se calcula usando la Transformada Rápida de Fourier. A continuación, se presenta un desarrollo matemático básico que llevará a la interpretación de un espectrograma.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (\text{II.1})$$

En caso de análisis de espectros se basa en la Transformada de Fourier de Corto Plazo (STFT por sus siglas en ingles), la cual se encarga de dividir la señal en segmentos temporales y aplica la FFT a cada uno de los segmentos de la señal original. La STFT proporciona una función  $X(t,f)$  que muestra cómo la amplitud de las componentes de frecuencia varía a lo largo del tiempo. El resultado es un espectrograma que se visualiza en un gráfico de tiempo-frecuencia con colores que indican la magnitud de las componentes de frecuencia. A continuación, en la ecuación II.2 se muestra cómo se define matemáticamente la STFT:

$$X(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot w(\tau - t) \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (\text{II.2})$$

Donde:

- $w(\tau - t)$  representa una ventana que se aplica a la señal en el tiempo  $t$  para analizar una posición específica de la señal.
- $f$  es la frecuencia para la que se calcula la transformada.

La potencia de la señal en el dominio de la frecuencia se calcula usando la transformada de Fourier y se relaciona con el cuadrado de la amplitud de las componentes de frecuencia:

$$P(f) = |X(f)|^2 \quad (\text{II.3})$$

donde  $X(f)$  es la transformada de Fourier de la señal. En cuanto a la **Relacion Señal Ruido(SNR)** cuantifica cuán fuerte es la señal en comparación con el ruido de fondo y se define como:

$$SNR = \frac{P_{señal}}{P_{ruido}} \quad (\text{II.4})$$

donde  $P_{señal}$  y  $P_{ruido}$  representan las potencias de la señal y del ruido, respectivamente. En el espectrograma, cada segmento temporal se pasa por la FFT, lo que

produce un conjunto de espectros que se muestran en una escala de colores. Las áreas más cálidas indican alta magnitud de frecuencia.

### 2.3.3. Tipos de Espectrograma

#### Discontinuos

En este tipo, las trazas del espectro se agregan una a la vez, con cada “rebanada” proveniente de una nueva adquisición de datos. Este método puede ser descrito como un registro de gráfico de tira de la historia espectral, donde habrá intervalos de tiempo entre cada traza del espectro. Los espectrogramas discontinuos son ideales para observar tendencias y cambios a largo plazo en la actividad espectral.

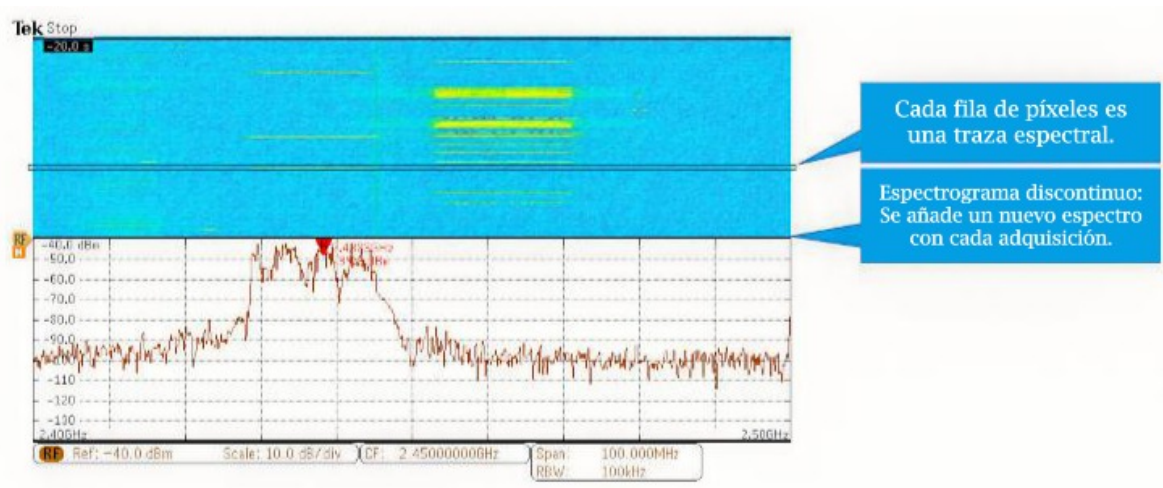


Figura II.4: Espectrograma discontinuo [30].

#### Continuos

Estos se construyen a partir de un único registro de adquisición sin interrupciones en lugar de múltiples adquisiciones consecutivas. Una vez que se cumple la condición de que la longitud de adquisición exceda el tiempo de espectro, las trazas del espectro se generan moviendo el tiempo de espectro FFT a través del registro de adquisición sin interrupciones. Esto permite obtener una vista continua del espectro a lo largo del tiempo, con un alto grado de detalle y precisión temporal.

Los espectrogramas RF son herramientas poderosas y versátiles para el análisis de señales de radiofrecuencia. Su capacidad para mostrar cómo cambia el contenido espectral de una señal a lo largo del tiempo permite a los ingenieros y científicos observar y analizar tanto comportamientos estáticos como dinámicos en las señales.

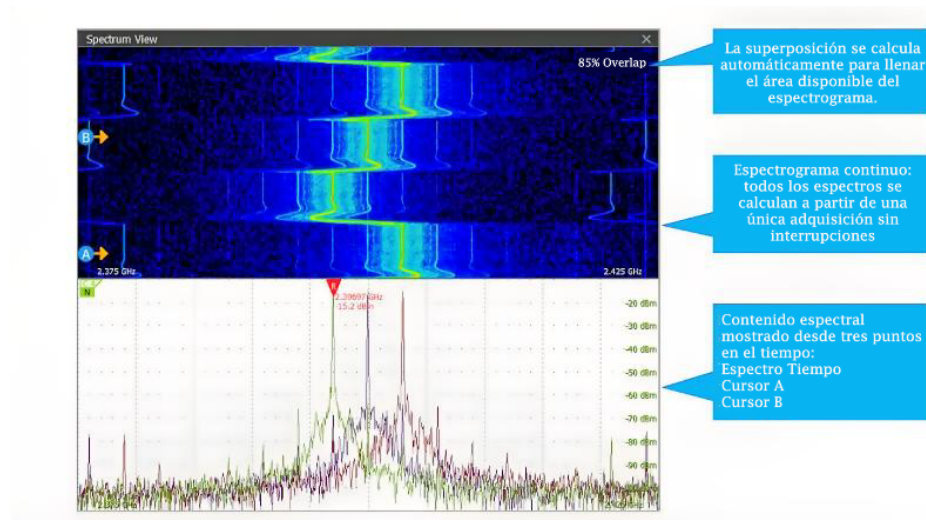


Figura II.5: Espectrograma continuo [30].

Ya sea en aplicaciones discontinuas para monitoreo a largo plazo o en aplicaciones continuas para análisis detallado y preciso, los espectrogramas proporcionan información crítica para el desarrollo y la optimización de sistemas de comunicación y otros dispositivos electrónicos. La comprensión y el uso eficaz de los espectrogramas RF son esenciales para aprovechar al máximo las capacidades de los modernos sistemas de análisis de señales.

## 2.4. Antenas

El concepto de antenas en el área de telecomunicaciones se refiere a un dispositivo con capacidad conductiva de manera que este sea capaz de irradiar y recibir ondas de radio, el cual funciona como un conducto o canal entre el espacio libre y una línea de transmisión que puede ser tanto una línea coaxial como una guía de ondas.

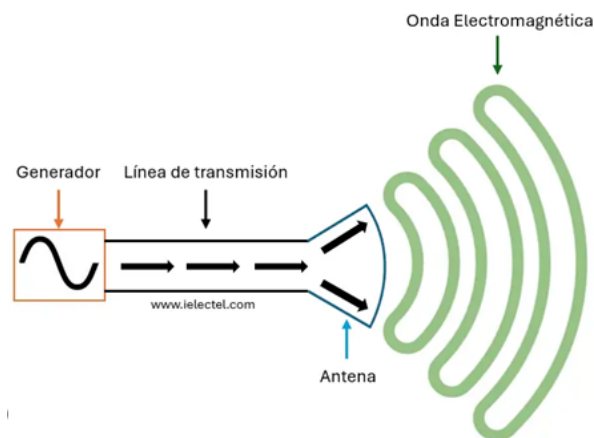


Figura II.6: Diagrama que muestra la antena y sus fases de operación [31].

Es primordial para entender el funcionamiento y comportamiento de una antena, conocer sobre la representación Thevenin de las antenas en modo de transmisión, pues este modelo permite entender cómo la energía proporcionada desde una fuente pasa hacia la antena para que esta pueda ser radiada de manera eficaz a través del espacio libre, así que bajo este análisis la antena será modelada como una carga  $Z_A$  representada en la ecuación II.5 [32].

$$Z_A = (R_L + R_r + jX_A) \quad (\text{II.5})$$

En donde:

- **Resistencia de radiación  $R_r$ :** Este término es por el cual se determina la efectividad de la transmisión en el espacio libre, cuando más energía reciba  $R_r$ , mayor es la cantidad de energía irradiada al espacio de transmisión o espacio libre.
- **Resistencia de pérdida  $R_L$ :** Tanto la conducción a través del material, como el dieléctrico componen la antena, representan pérdidas que deben ser tomadas en cuenta al momento del análisis de la transmisión. Esto contribuye negativamente a la eficiencia de la antena ya que sugiere que la energía proveniente de la fuente se pierde en forma de calor en lugar de radiarse.
- **Reactancia  $X_A$ :** está relacionada a la parte imaginaria de la impedancia de la antena y es el factor indicador de la manera que se almacena temporalmente la energía de la antena antes de la transmisión, es un factor de alta prioridad a considerar ya que permite la resonancia a una frecuencia específica.

### 2.4.1. Tipos de Antenas

Existen varios tipos de antenas y a pesar de que a lo largo de este proyecto se elaborará una antena tipo parche, se ve necesario elaborar una breve revisión de algunos tipos de antenas, detalladas a continuación:

#### Antenas de Hilo

Están diseñadas con dispositivos metálicos, los cuales generalmente son en forma de varilla o cable, que conectan y permiten el paso de las señales de frecuencia de radio a ondas electromagnéticas de tal manera que se pueda cumplir la transmisión y recepción [32].

Tabla II.3: Variaciones de antenas de hilo [33]

Tipo de Antena	Características
Dipolo de Media Longitud de Onda (Dipolo $\lambda/2$ )	Longitud de $\lambda/2$ . Impedancia de radiación $\sim 73 \Omega$ . Patrón de radiación omnidireccional en el plano perpendicular. Polarización lineal.
Monopolo de Cuarto de Longitud de Onda (Monopolo $\lambda/4$ )	Longitud de $\lambda/4$ . Montado en un plano conductor. Patrón de radiación omnidireccional en el plano horizontal. Utilizado en sistemas de comunicación móvil.
Antena de Bucle (Loop)	Consiste en un alambre en forma de bucle cerrado. Puede tener forma circular o rectangular. Patrón de radiación direccional. Ideal para frecuencias bajas
Antena Hélice	Polarización circular en modo axial. Alta directividad en comunicaciones satelitales. Modo normal y modo axial. Utilizado en comunicaciones de largo alcance

### Antenas de apertura

Este tipo de antenas son capaces de trabajar en bandas de ultra alta frecuencia y ondas milimétricas como las redes 5G actualmente, debido a su alta ganancia. Recibe su nombre porque su estructura cuenta con una apertura o también llamada ventana, a través de las cuales emiten o reciben las ondas electromagnéticas, siendo una mera viable de dirigir la energía. La principal ventaja que presenta este tipo de antena es la facilidad en la que se puede adaptar a las estructuras, por tal motivo, son de gran uso en la industria aeroespacial y aeronáutica, en donde se debe priorizar la efectividad en la transmisión de datos [34].



Figura II.7: Variante de lazo de una antena tipo hilo.

Actualmente existen alternativas modernas, una de ellas son las antenas de apertura adaptativa, las cuales se fabrican de materiales piezoeléctricos. Esto con el fin de facilitar la dinámica de la antena en tiempo real sin necesidad de moverla físicamente, es decir, que se puede obtener una mayor adaptabilidad a los entornos físicos con la implementación de esta antena [35].

### Antenas de Array

Las antenas de arreglo son sistemas avanzados que combinan múltiples elementos radiantes (como dipolos, ranuras, espirales o parches) para trabajar juntos y formar un haz de radiación que puede ajustarse con precisión. Cada uno de estos elementos, que por sí solo podría actuar como una pequeña antena, se sincroniza para dirigir, enfocar y controlar el haz de radiación en una dirección específica. Gracias a esta configuración, las antenas de arreglo pueden ofrecer una mayor ganancia y una precisión de directividad que sería difícil de lograr con una antena simple [32].

Existen varios tipos de antenas de arreglo. Algunas, como los arreglos de fase ajustable, permiten controlar en tiempo real la dirección del haz sin necesidad de mover físicamente la antena, algo especialmente útil en aplicaciones como los radares de seguimiento. Otras, como los arreglos de ultra-banda ancha (UWB), están diseñadas para operar en un rango muy amplio de frecuencias, lo cual es clave en redes de telecomunicación de última generación (como 5G y 6G) y en la observación astronómica [36].

Una de las capacidades más destacadas de estas antenas es el direccionamiento de haz (beam steering), que permite ajustar la dirección del haz de radiación sin mover la antena física. Esto es especialmente útil en aplicaciones que requieren cambios rápidos de dirección o un enfoque preciso de la señal, como en sistemas de rastreo y telecomunicaciones móviles. Gracias a esta flexibilidad, las antenas de arreglo son piezas clave en muchas tecnologías actuales, ya que pueden adaptarse a condiciones cambiantes, ofrecer un control detallado sobre el patrón de radiación y operar de manera eficiente en frecuencias muy altas [36].



Figura II.8: Modelo de arreglo de antenas [37].

### 2.4.2. Antenas de Microstrip o Parche

Las antenas de microstrip o parche están diseñadas con el propósito de ser antenas compactas y de fácil integración en sistemas de transmisión y recepción. Este tipo de antena está típicamente compuesto por un parche conductor, usualmente fabricado de cobre o aluminio, y un sustrato dieléctrico cuyo propósito es separar el parche del plano de tierra.

El principio de operación de estas antenas consiste en aplicar una señal de radio-frecuencia a través de un canal del parche. Esta señal se propaga hacia los bordes del mismo, los cuales actúan como estructuras emisoras del patrón de radiación [38].

Para el diseño de las antenas de parche, se emplea el modelo de línea de transmisión, descrito a continuación.

#### Modelo de Línea de Transmisión

Este modelo simplifica la antena de parche como una línea de transmisión resonante cuyos extremos funcionan como bordes radiantes. Se considera que la corriente se propaga a lo largo del parche. A continuación, se presentan las expresiones matemáticas correspondientes.

La frecuencia resonante se determina con:

$$f_r = \frac{c}{2L\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \quad (\text{II.6})$$

donde:

- $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,
- $L$  es la longitud del parche,
- $\varepsilon_{\text{eff}}$  es la permitividad efectiva del sustrato.

La permitividad efectiva se calcula considerando los efectos de fringing:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{II.7})$$

donde:

- $\varepsilon_r$  es la permitividad relativa del sustrato,
- $h$  es la altura del sustrato,
- $W$  es el ancho del parche.

### Ancho del Parche

El ancho  $W$  afecta la conductividad y radiación de la antena y se calcula mediante:

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (\text{II.8})$$

### Longitud Efectiva del Parche

La longitud efectiva del parche  $L_{\text{eff}}$  se ajusta para tener en cuenta el fringing:

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L \quad (\text{II.9})$$

donde  $\Delta L$  es la extensión adicional de longitud debido al fringing:

$$\Delta L = 0.412h \cdot \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (\text{II.10})$$

### Impedancia de Entrada y Adaptación

La impedancia de entrada  $Z_{\text{in}}$  de una antena de parche varía según el punto de alimentación. Para una alimentación en el borde, se usa:

$$Z_{\text{in}} = \frac{90\epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_r - 1} \cdot \frac{L}{W} \quad (\text{II.11})$$

La antena radia eficientemente a la frecuencia resonante calculada en la ecuación (II.6).

## 2.5. Modulación y Procesamiento de la Señal

Para comprender las arquitecturas modernas, es instructivo analizar primero la estructura de un transmisor de radar de pulsos clásico, que sirve como un modelo de referencia fundamental. Un sistema de este tipo se puede descomponer en una serie de bloques funcionales interconectados, cada uno con un propósito específico en la generación y emisión de la señal de RF [39]. Una arquitectura genérica de radar de pulsos incluye los siguientes componentes clave [39]:

**Sincronizador (Synchronizer):** Genera todas las marcas de tiempo, pulsos de disparo y compuertas de conmutación que orquestan el funcionamiento coordinado de todos los demás módulos. El pulso de disparo del transmisor, en particular, define el instante preciso en que comienza la emisión de energía, estableciendo la referencia para la medición del tiempo de vuelo de la señal.

**Generador de Forma de Onda (Waveform Generator):** En los radares modernos, este bloque es responsable de generar la señal de transmisión compleja, a menudo en una frecuencia intermedia (IF). Define las características de la forma de onda, como la duración del pulso y cualquier modulación interna (intra-pulso). En sistemas más antiguos y simples, esta función estaba integrada en el modulador a través de una red de conformación de pulso (pulse forming network).

**Modulador (Modulator):** Su función es imprimir la forma de onda generada sobre la portadora de RF. En sistemas modernos, esto implica una conversión ascendente de frecuencia (up-conversion) de la señal IF a la frecuencia de transmisión final. En radares más antiguos que utilizaban tubos auto-oscilantes como el magnetrón, el modulador simplemente generaba un pulso de alto voltaje de duración definida para alimentar el tubo.

### 2.5.1. Modulación por Cuadratura (I/Q)

Mientras que la modulación de amplitud simple es suficiente para crear un pulso básico, los sistemas de comunicación y radar modernos requieren formas de onda mucho más complejas que codifican información en la fase y la frecuencia de la portadora, además de su amplitud. La Modulación por Cuadratura, comúnmente conocida como modulación I/Q, es la técnica dominante para lograr este objetivo.

#### Componentes en Fase (I) y en Cuadratura (Q)

La modulación I/Q se basa en la propiedad matemática de que cualquier señal de paso de banda puede ser representada de forma única por dos componentes en banda base (baja frecuencia). Estos componentes se denominan "en fase" (In-phase, I) y "en cuadratura" (Quadrature, Q) [40]. El principio de funcionamiento consiste en modular dos ondas portadoras que tienen la misma frecuencia, pero están desfasadas 90 grados entre sí (es decir, están en cuadratura, como un coseno y un seno). La componente I modula la portadora en fase ( $\cos(2\pi fct)$ ), y la componente Q modula la portadora en cuadratura ( $\sin(2\pi fct)$ ). Las dos señales moduladas resultantes se suman para crear la señal de RF final [41].

El propósito fundamental de la modulación I/Q es permitir el control simultáneo e independiente de la amplitud y la fase de la señal portadora [41]. Al variar las amplitudes de las señales de banda base  $I(t)$  y  $Q(t)$ , es posible generar cualquier punto en el plano complejo, lo que se traduce en una señal de RF con una amplitud y fase específicas. Esta capacidad de modular en dos grados de libertad (amplitud y fase) permite una eficiencia espectral mucho mayor, lo que significa que se pueden transmitir

más bits de información por hertz de ancho de banda del canal en comparación con las técnicas que solo modulan la amplitud o la fase [41].

### Procesamiento de Señales I/Q y el Desbalance de Cuadratura

La implementación práctica de la modulación I/Q, aunque conceptualmente elegante, presenta desafíos significativos. El principal problema es el desbalance de cuadratura (I/Q imbalance). Este fenómeno surge de las inevitables imperfecciones en el hardware analógico del front-end del transmisor [42]. Idealmente, las dos rutas de señal para I y Q deberían tener ganancias de amplitud idénticas y un desfase exacto de 90.0 grados. En la práctica, las tolerancias de fabricación, las variaciones de temperatura y las dependencias de la frecuencia introducen desajustes de amplitud y errores de fase entre las dos ramas [42].

Este desbalance rompe la ortogonalidad perfecta entre las componentes I y Q, lo que resulta en una interferencia autoinducida. Específicamente, una parte de la señal de la banda lateral no deseada (la "señal imagen") no se cancela por completo y se filtra en la banda de la señal deseada, degradando la calidad de la señal transmitida [43]. El rendimiento del sistema, medido por métricas como la relación de rechazo de imagen (Image Rejection Ratio, IRR) o la magnitud del vector de error (Error Vector Magnitude, EVM), se ve seriamente afectado [44].

La existencia del desbalance de I/Q ilustra una relación simbiótica y a la vez desafiante entre los dominios digital y analógico. La elección de la modulación I/Q es una decisión de diseño digital, motivada por la búsqueda de eficiencia espectral. Sin embargo, su implementación depende de un hardware analógico que es inherentemente imperfecto. Estas imperfecciones físicas corrompen la señal definida digitalmente. Para solucionar este problema, los ingenieros deben volver al dominio digital para implementar algoritmos de compensación. Técnicas como la pre-distorsión digital o los algoritmos de separación ciega de señales (Blind Signal Separation, BSS) se utilizan para "deformar" deliberadamente las señales I/Q digitales antes de que lleguen al convertidor digital-analógico [42]. Esta pre-deformación se calcula para ser la inversa de la distorsión esperada en el hardware analógico, de modo que cuando la señal pre-distorsionada pasa a través del front-end imperfecto, las distorsiones se cancelan mutuamente, resultando en una señal de RF de salida más limpia.

Este ciclo de diseño revela que un transmisor moderno no es una simple cadena lineal "digital-luego-analógico". Es un sistema de co-diseño de bucle cerrado, donde la unidad de procesamiento digital debe poseer un modelo implícito o explícito de las imperfecciones del front-end analógico para funcionar correctamente. El diseño de los algoritmos de DSP y el del circuito integrado de RF (RFIC) ya no son tareas independientes, sino que están intrínsecamente acopladas.



# III. Arquitectura de SDR para Aplicación de Georradar

## 3.1. Capacitación y Manejo de las Tecnologías Asociadas

### 3.1.1. Instalación del sistema operativo KUIPER de LINUX en la tarjeta de desarrollo ZEDBoard

En esta parte se aborda la instalación del software proporcionado por el fabricante:

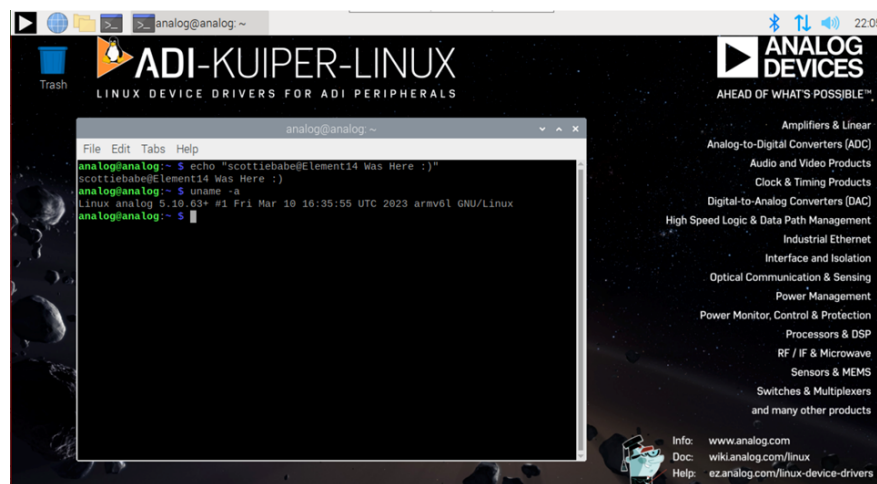


Figura III.1: Vista del sistema operativo LINUX.

1. Como primer paso, está la creación de una imagen ISO para el sistema de arranque de la tarjeta de desarrollo, teniendo en cuenta que debe ser el sistema adecuado dependiendo del modelo de transceptor que se vaya a ocupar en el desarrollo del proyecto.
2. Luego, mediante las terminales y comandos en la terminal de Linux, se configura el disco de arranque que se ocupara en la tarjeta ZEDBOARD.
3. Se instala el sistema operativo Kuiper de Linux en la tarjeta de desarrollo Zed-board y el módulo transceptor AD-FMCOMM.

## 3.2. Evaluación del Prototipo a Escala 4 de Desarrollo Tecnológico

El nivel 4 de TRL representa el primer paso en la implementación de la invención en un entorno práctico, dado que los niveles previos del uno al tres hacen énfasis en la función teórica, análisis conceptual y validaciones elementales. En el marco de la evaluación de un prototipo de nivel 4, se requiere que los componentes clave de la tecnología a evaluar se integren y demuestren funcionalidad en entornos controlados de laboratorio, los cuales deben simular condiciones fundamentales del contexto operativo previsto para el dispositivo. Según el planteamiento de la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación, para que una invención pueda ser considerada de nivel 4 de TRL debe cumplir los parámetros que se describen en los apartados desde la Sección 3.2.1 hasta la 3.2.8.

### 3.2.1. Integrar los componentes principales de la invención tecnológica

En la Figura III.2 se encuentra descrito de manera gráfica el diseño de la arquitectura propuesta, detallando así la integración de componentes y su distribución en el prototipo.

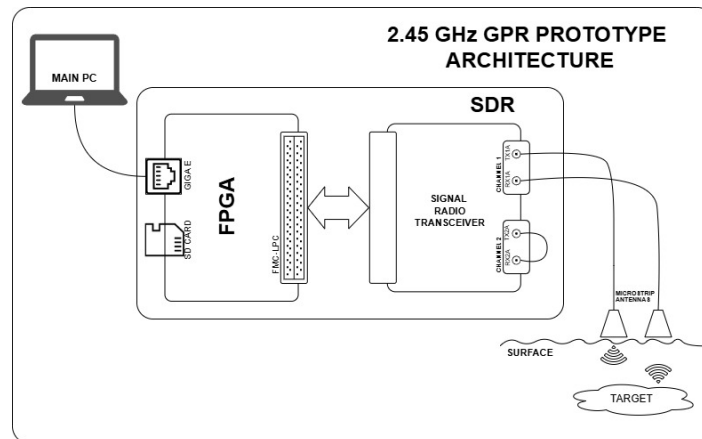


Figura III.2: Diagrama de bloques de la arquitectura planteada para el prototipo.

A continuación, una breve descripción de los componentes principales de este prototipo, la cual es proporcionada por el fabricante de cada uno. En este paso es necesario comprender acerca del uso de hardware y software que el proyecto requiere para cumplir con los objetivos planteados.

## Revisión técnica de la tarjeta de desarrollo ZEDBoard ZYNQ-7000 AES-Z7EV-7Z020-G y el módulo transceptor AD-FMCOMMS2- EBZ

Usando herramientas en línea, proporcionadas por el fabricante ANALOG DEVICES, se revisa acerca de la información que permita vincular la tarjeta de desarrollo FPGA y el módulo transceptor; muy aparte, se revisan las características técnicas de manera individual para cada elemento de hardware (ZEDBoard ZYNQ-7000 AES-Z7EV-7Z020-G) que se observa en la Tabla III.1 y en la Tabla III.2 (AD-FMCOMMS2-EBZ).

### Enlace de tarjeta Zedboard, módulo transceptor y Matlab

En esta sección se describe el procedimiento necesario para establecer la conectividad funcional entre el hardware (ZedBoard + módulo transceptor AD9361) y el entorno de desarrollo MATLAB/Simulink, a fin de permitir la ejecución de algoritmos de transmisión y recepción en tiempo real. Este paso es fundamental para la correcta operación del sistema SDR, ya que permite realizar pruebas sobre señales reales captadas o transmitidas mediante interfaces programables de alto nivel.

El enlace entre los elementos de hardware y software garantiza que el flujo de datos entre la FPGA, el transceptor de RF y las rutinas de procesamiento digital de señales en Simulink se realice sin interrupciones ni pérdidas. Para ello, es indispensable cumplir una serie de pasos que involucran tanto la instalación de toolboxes y paquetes de soporte como la correcta configuración de red, almacenamiento y pruebas funcionales de subsistemas.

Tabla III.1: Características de la Zynq-7000

Características	Descripción
<b>Zynq®-7000 All Programmable SoC</b>	XC7Z020-CLG484-1
<b>Memoria</b>	
512 MB DDR3	Memoria RAM
256 Mb Quad-SPI Flash	Memoria Flash
Tarjeta SD de 4 GB	Almacenamiento en tarjeta SD
<b>Programación y Comunicación</b>	
Programación USB-JTAG integrada	Programación y depuración con USB-JTAG
Ethernet 10/100/1000	Conectividad Ethernet
USB OTG 2.0 y USB-UART	Comunicación USB OTG 2.0 y USB-UART
<b>Expansión de I/O</b>	
Expansión de E/S PS y PL	Compatible con FMC, <sup>TM</sup> Pmod, XADC
<b>Pantallas Múltiples</b>	
HDMI 1080p, VGA de 8 bits, OLED de 128 x 32	Soporte de pantallas
<b>Aplicaciones Objetivo</b>	
Procesamiento de video	Control de motores
Aceleración de software	Desarrollo con Linux/Android/RTOS
Procesamiento embebido ARM®	Prototipado general con Zynq®-7000 AP SoC

Tabla III.2: Características del AD9361.

Funcionalidad	Descripción
Recepción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soporta hasta 2 canales de RF de conversión directa</li> <li>• Sintetizadores totalmente integrados (incluyendo filtro de lazo)</li> <li>• Ruta de datos compuesta por LNA, Demodulador, LPF, ADC y filtros digitales</li> <li>• AGC, calibración de cuadratura y calibración de offset DC</li> <li>• ADC: Sigma-delta de tiempo continuo, 640 MSPS</li> <li>• Filtros digitales: 128 taps complejos, decimación entre 2 y 48</li> <li>• Ganancia: pasos de 1 dB, rango analógico de 80 dB, rango digital de 30 dB (post escalado ADC)</li> </ul>
Transmisión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soporta hasta 2 canales de RF de conversión directa</li> <li>• Sintetizadores totalmente integrados (incluyendo filtro de lazo)</li> <li>• Ruta de datos compuesta por filtros digitales, DAC y moduladores</li> <li>• Filtros digitales: 128 taps complejos, interpolación entre 2 y 48</li> <li>• Ganancia: pasos de 0.25 dB, rango de 86 dB</li> <li>• DAC: 320 MSPS</li> </ul>
Temporizadores	Los temporizadores son gestionados por el dispositivo y son programables por software. La placa proporciona un cristal de 40 MHz para el AD9361. Consulte la hoja de datos para los diferentes relojes dentro del dispositivo.
SPI	Las señales SPI se conectan directamente al conector FMC.
Control/ Monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control en tiempo real a través de pines dedicados, que incluyen control de ganancia, sincronización, control de máquina de estados, etc.</li> <li>• Monitoreo en tiempo real de señales internas a través de una matriz de pines dedicados, multiplexadas y conectadas al conector FMC.</li> </ul>

En el diagrama de flujo de la Figura III.3 se ilustran de manera ordenada y secuencial los pasos requeridos para completar esta configuración:

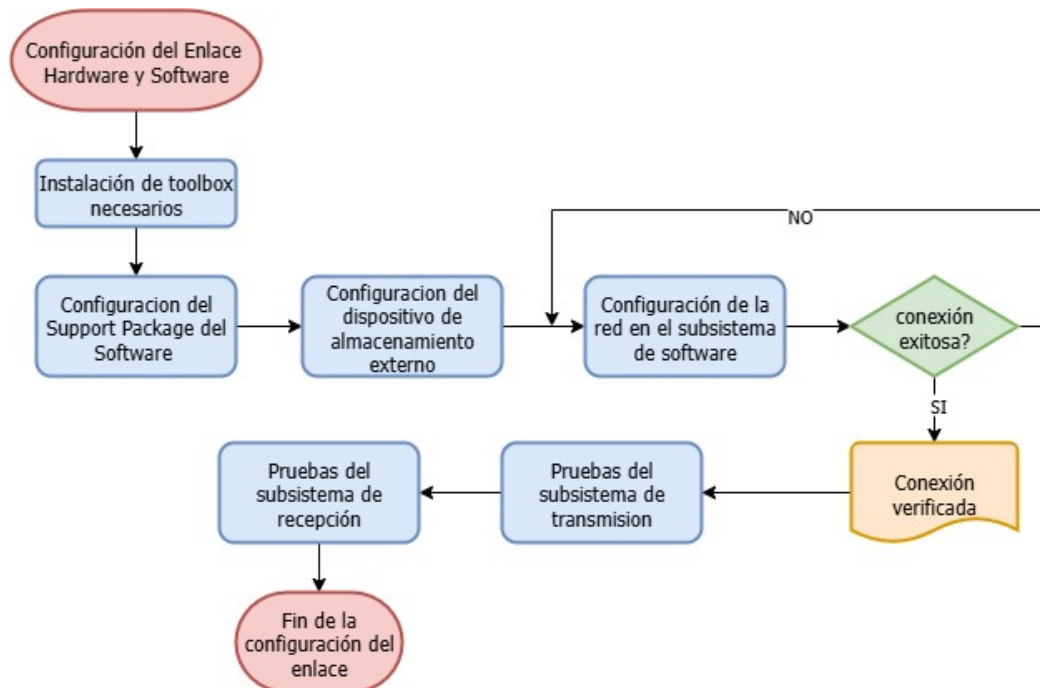


Figura III.3: Diagrama de flujo de enlace entre subsistemas.

### 3.2.2. Realizar pruebas de validación de efectividad de la intervención en laboratorio

Para el cumplimiento de este requerimiento, se realizó la evaluación por partes de cada componente del sistema, los cuales se describen a continuación de manera detallada cómo fueron diseñadas sus pruebas.

#### Módulo de Software

Para el desarrollo de esta etapa y ya comprendiendo el funcionamiento de un espectrograma, se realiza una simulación usando el software Simulink, el diagrama de bloque se presenta a continuación en la Figura III.4. Como se ve en el diagrama, únicamente se ingresa una señal sinusoidal, a la cual se le aplica una perturbación para poder observar el comportamiento en el espectrograma.

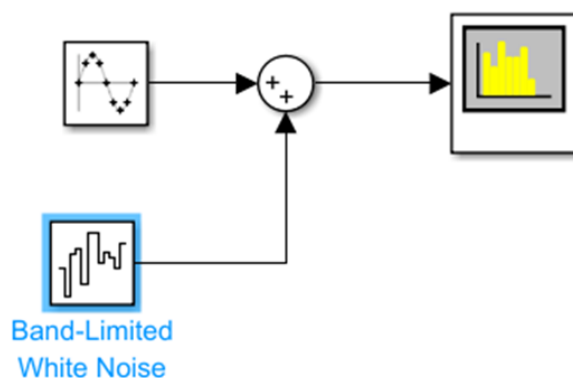


Figura III.4: Diagrama de bloques para prueba de espectrograma.

Tabla III.3: Parámetros de la señal seno.

Parámetro	Valor / Descripción
Amplitud	$A = 2$ V
Frecuencia	Está definida indirectamente por el número de muestras por periodo.
Fase	$\phi = 0$ rad
Tiempo de muestreo	$T_s = 0.01$ s
Potencia de ruido	$P_n = 0.1$ mW
Tiempo de muestreo del ruido	$T_n = 0.1$ s

**Modelado señal seno:** Con los parámetros observados en la Tabla III.3, se desarrolla el modelado de la señal.

$$s(t) = 2 \sin(2\pi f_0 t) \quad (\text{III.1})$$

Luego se define el parámetro de frecuencia:

$$f_0 = \frac{1}{\text{Muestras por período} \times T_s} \quad (\text{III.2})$$

$$f_0 = \frac{1}{1 \times 0.01} = 100 \text{ Hz} \quad (\text{III.3})$$

Por lo tanto, la señal seno quedaría dada por la siguiente expresión:

$$s(t) = 2 \sin(2\pi \cdot 100 \cdot t) \quad (\text{III.4})$$

**Transformada de Fourier de la Señal Seno:** La Transformada de Fourier de una señal seno pura  $s(t) = A \sin(2\pi f_0 t)$  se representa en el dominio de la frecuencia como dos picos, uno en  $+f_0$  y otro en  $-f_0$ , con amplitudes proporcionales a  $A/2$ :

$$S(f) = \frac{A}{2} [\delta(f - f_0) - \delta(f + f_0)] \quad (\text{III.5})$$

Para la señal dada:

$$S(f) = \delta(f - 100) - \delta(f + 100) \quad (\text{III.6})$$

Para calcular la relación señal-ruido (SNR) en el dominio de la frecuencia, se utilizan las ecuaciones vistas en el Capítulo II, Ecs. III.7 y III.10:

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{señal}}}{P_{\text{ruido}}} \quad (\text{III.7})$$

La potencia de la señal sinusoidal  $P_{\text{señal}}$  es:

$$P_{\text{señal}} = \frac{A^2}{2} = \frac{2^2}{2} = 2 \text{ mW} \quad (\text{III.8})$$

Se requiere realizar la conversión de ambas potencias a decibelios-milivatios (dBm). Primero, para la señal:

$$P_{\text{señal}}^{(\text{dBm})} = 10 \cdot \log_{10}(2) \approx 3.01 \text{ dBm} \quad (\text{III.9})$$

Luego, para la potencia del ruido  $P_{\text{ruido}} = 0.1 \text{ mW}$ :

$$P_{\text{ruido}}^{(\text{dBm})} = 10 \cdot \log_{10}(0.1) \approx -10 \text{ dBm} \quad (\text{III.10})$$

Finalmente, la relación señal-ruido en decibelios es:

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = P_{\text{señal}}^{(\text{dBm})} - P_{\text{ruido}}^{(\text{dBm})} = 3.01 - (-10) = 13.01 \text{ dB} \quad (\text{III.11})$$

### Módulo de Transmisión y Recepción

En este caso se desarrolló la implementación de un algoritmo de la Figura para generar una transmisión a través del entorno SDR.

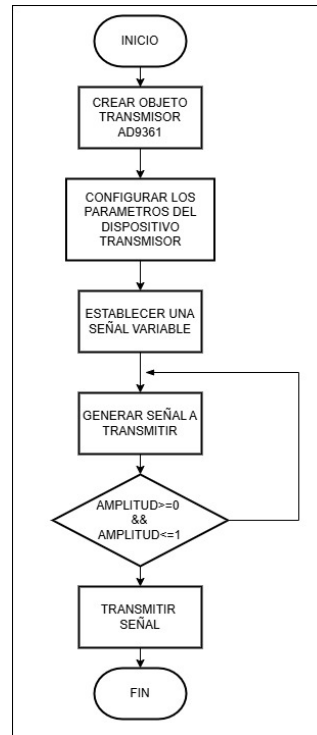


Figura III.5: Algoritmo generado para la transmisión.

Mediante el software de Matlab, se programó una frecuencia de operación de 2.45 GHz, junto con una señal IQ base, para posteriormente enviarla por el canal de transmisión, la cual será analizada en un instrumento de análisis espectral, como se puede observar en la Figura III.6.

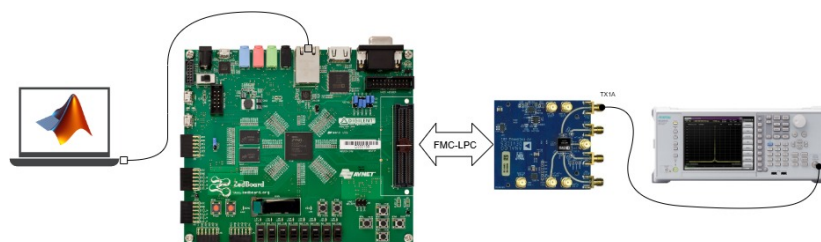


Figura III.6: Esquema de conexión entre el módulo de hardware y el analizador de espectros.

Con el propósito de hacer una evaluación previa sobre el comportamiento del canal de recepción y considerando que el canal de transmisión ya opera como un generador de señal, se desarrolló un algoritmo para cumplir con esta finalidad, el cual se presenta en la Figura III.7

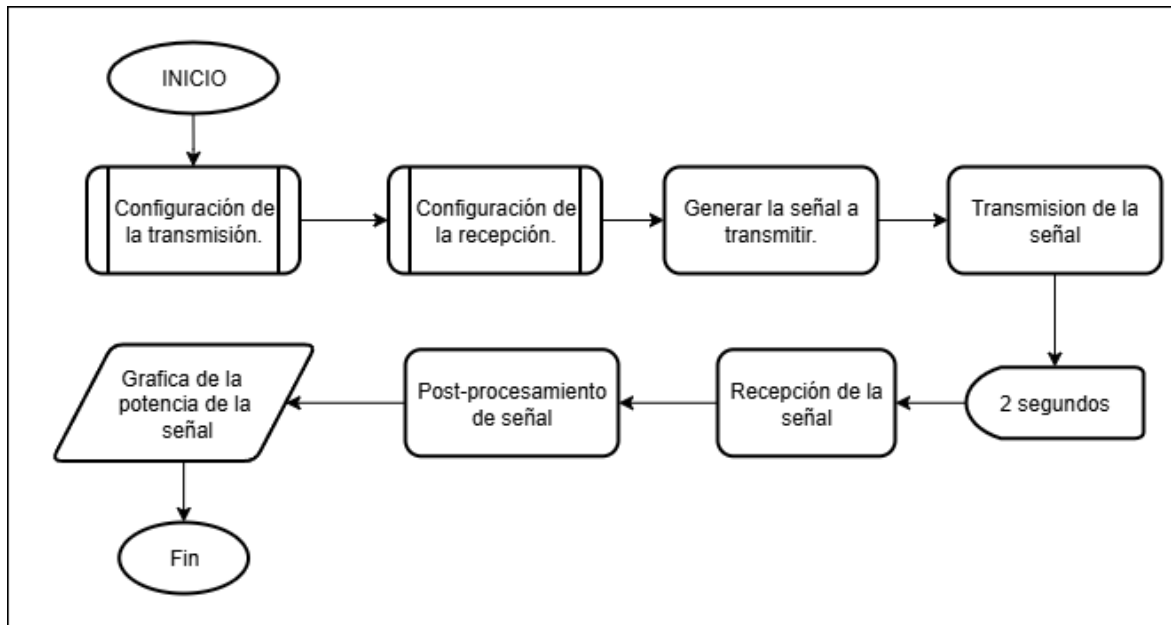


Figura III.7: Diagrama de flujo para algoritmo de transmisión y recepción SDR.

El diagrama de flujo representa un sistema completo de comunicación digital basado en radiofrecuencia, donde se integran procesos de transmisión, recepción y análisis espectral de señales. Técnicamente, el flujo se inicia con la configuración del transmisor y del receptor, donde se definen parámetros esenciales como frecuencia central, tasa de muestreo y ganancia. Posteriormente, se procede a la generación de la señal base, usualmente una señal compleja IQ o una portadora modulada, que es enviada al canal mediante la etapa de transmisión.

Tras un retardo controlado de 2 segundos, destinado a estabilizar el sistema o sincronizar la recepción, se inicia la captura de la señal, la cual es adquirida por el front-end del receptor. Esta señal es entonces procesada mediante técnicas de procesamiento digital de señales, que pueden incluir transformadas rápidas de Fourier (FFT) y normalización espectral. Finalmente, el resultado se representa en un gráfico de potencia espectral, proporcionando una visualización en frecuencia del contenido energético recibido. Este diagrama resume un flujo típico de un sistema SDR (Software-Defined Radio) implementado con los dispositivos AD-FMCOMMS2-EBZ sobre plataformas FPGA como ZedBoard. La implementación de los componentes de hardware se describe visualmente en la Figura III.8.

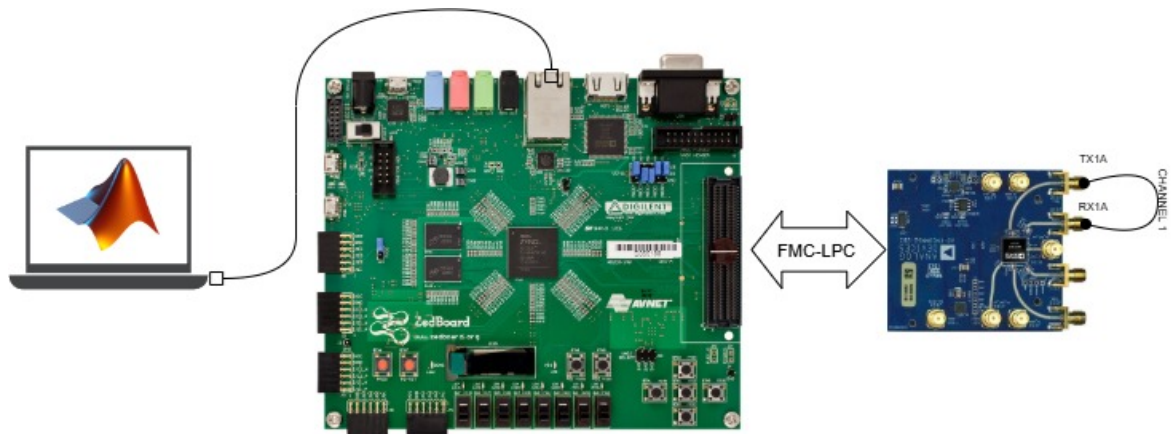


Figura III.8: Esquema de conexión desde transmisión y recepción en el módulo Transceptor.

### Módulo de Antena

Para el desarrollo de una antena parche existen consideraciones indispensables para lograr un diseño eficaz: entre las cosas que se tienen que tomar en cuenta están la frecuencia de operación, la constante dieléctrica del sustrato y la altura del sustrato. Estos dos últimos valores, por lo general, los da el fabricante del material; en este caso se usará el sustrato de la corporación ROGERS CORPORATION R04003C.

A continuación, se presentará el proceso que llevó a concluir este objetivo para obtener el sistema radiante, partiendo desde el diseño de la antena hasta su evaluación.

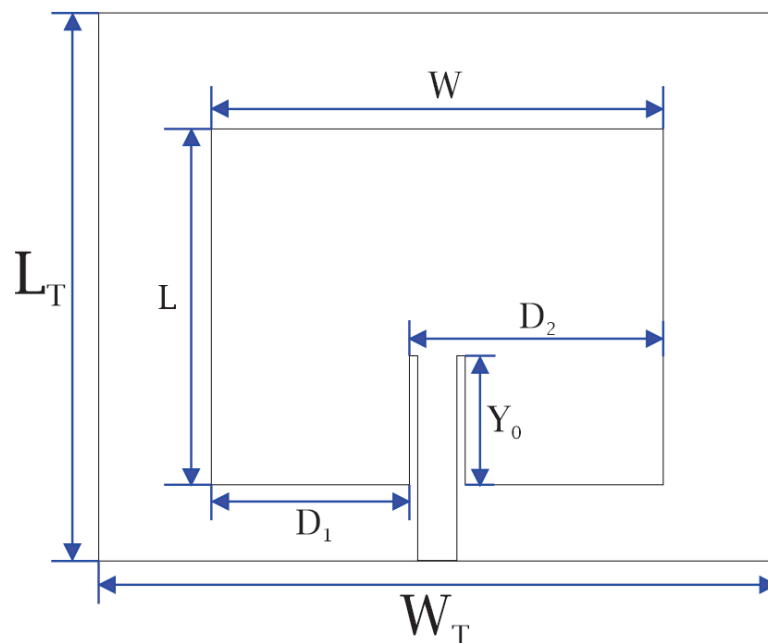


Figura III.9: Bosquejo de la antena parche a diseñar.

## 1. Diseño matemático

 Tabla III.4: Parámetros iniciales para diseño de antena a 2.45 GHz.

Parámetro	Valor
$f_o$ (Frecuencia de Operación)	2.45 GHz
$\epsilon_r$ (Permitividad Relativa)	3.38
$h$ (Altura del substrato)	1.52 mm

 Tabla III.5: Tabla Compuesta de Parámetros de Antena Calculados

Parámetro	Ecuación	Resultado
Ancho del Parche ( $W$ )	$W = \frac{c}{2f_o \sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}}}$	41.37 mm
Constante Dieléctrica Efectiva ( $\epsilon_{eff}$ )	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W}\right]^{-\frac{1}{2}}$	$\approx 3.1813$
Efecto de Franja ( $\Delta L$ )	$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff}+0.3)(\frac{W}{h}+0.264)}{(\epsilon_{eff}-0.258)(\frac{W}{h}+0.8)}$	716.0269 $\mu\text{m}$
Longitud Efectiva ( $L_{eff}$ )	$L_{eff} = \frac{c}{2f_o \sqrt{\epsilon_{eff}}}$	0.0343 m
Longitud del Parche ( $L$ )	$L = L_{eff} - 2\Delta L$	32.86 mm
Impedancia ( $Z_a$ )	$Z_a = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r-1} \left(\frac{L}{W}\right)^2$	272.5605 $\Omega$
Distancia ( $Y_0$ )	$Z_a = Z'_a \cdot \cos^2\left(\frac{\pi Y_0}{L}\right)$	11.80 mm
Ancho Total ( $W_T$ )	$W_T = W + \frac{W}{2}$	62.055 mm
Largo Total ( $L_T$ )	$L_T = \frac{W}{4} + (L - Y_0) + 18.73$	50.13 mm
Distancia ( $D_1$ )	$2D_1 + 2(0.76) + 3.59 = 41.37$	18.13 mm

Nota: Se usan las ecuaciones vistas en la sección 2.4.2, se presenta el diseño de la antena. Se usa la velocidad de la luz en las ecuaciones II.8 y II.6, debido a que un modelo aproximado que considera la distribución electromagnética entre el substrato y el medio.

**2. Implementación en el entorno de simulación:** Con el objetivo de poder realizar una impresión física de las antenas de transmisión y recepción, es necesario evaluar los parámetros calculados en el diseño matemático a nivel de simulación. Para alcanzar este objetivo se lo realiza con el software de simulación para entornos electromagnéticos ANSYS HFSS.

- a) *Trazar las superficies de la antena:* En base a los cálculos obtenidos en la Tabla III.5.

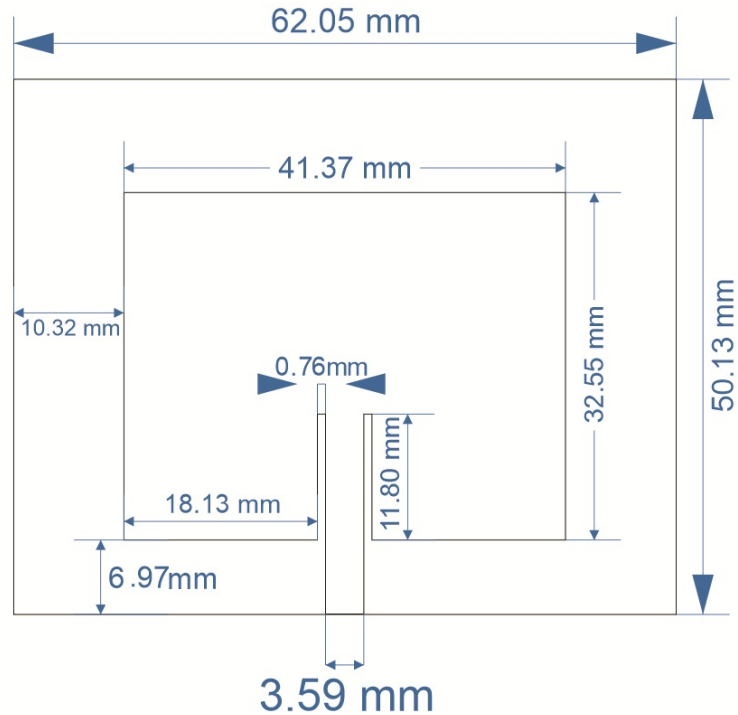


Figura III.10: Modelo y dimensión de la antena parche.

- b) *Asignar las propiedades electromagnéticas:* En base a la información proporcionada por el fabricante se asignan las propiedades dieléctricas en el sustrato, las cuales se describen en la Figura III.11

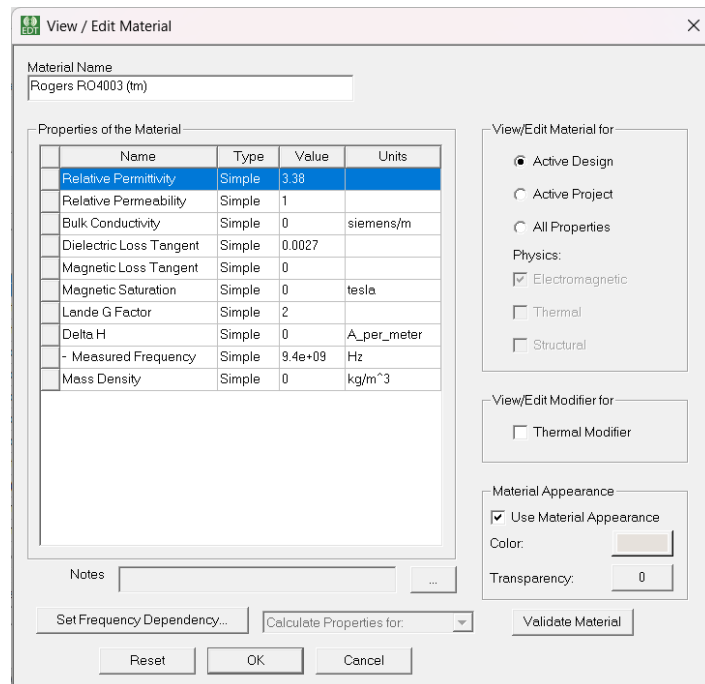


Figura III.11: Parámetros asignados al sustrato dieléctrico.

También se asignan las capas que representan el material conductor de cobre, asignando como un conductor perfecto:

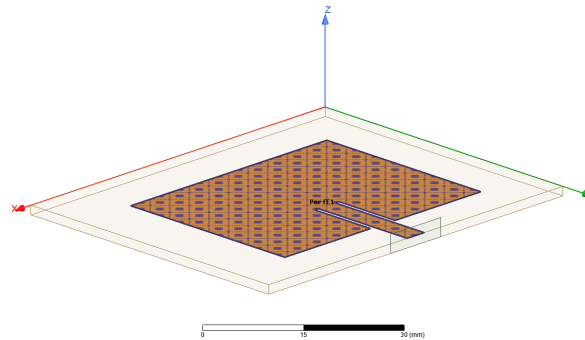


Figura III.12: Asignación de la capa conductora.

3. **Evaluación de la antena en el entorno físico** Para la evaluación de la antena en el entorno físico, lo primero que se verifica es el comportamiento de la antena que sea congruente con lo visto en la simulación generada por el entorno desarrollado en el software HFSS. Concluido eso y a la espera de resultados favorables en base a las dimensiones antes calculadas, se procede a caracterizar el patrón de radiación en el medio físico, para lo cual seguimos el esquema de conexión que se puede observar en la Figura III.13 entre una antena de banda ancha para mediciones de campos electromagnéticos y la antena diseñada e impresa en sustrato de cobre.

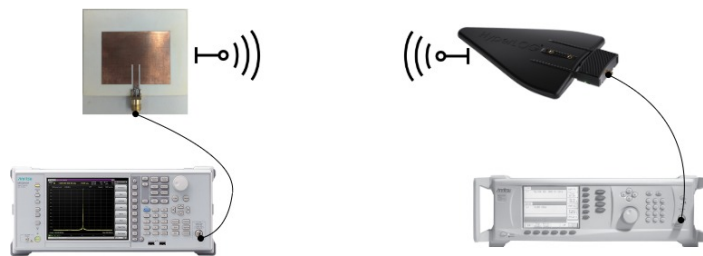


Figura III.13: Esquema visual de conexión para evaluar el patrón de radiación

- a) *Patrón de radiación:* Para esta sección realizaremos una configuración de hardware en el que la antena diseñada se conecta a un analizador de señal, mientras que, para modificar las amplitudes y la frecuencia de operación, tenemos a la antena de banda ancha conectada a un generador vectorial de señal.

Siguiendo el diagrama de conexión observado en la III.13 se colocaron los instrumentos y el hardware como se ven en las Figuras III.14 y III.15, para poder identificar el patrón de radiación.



Figura III.14: Posicionamiento de la antena de banda ancha para la transmisión.

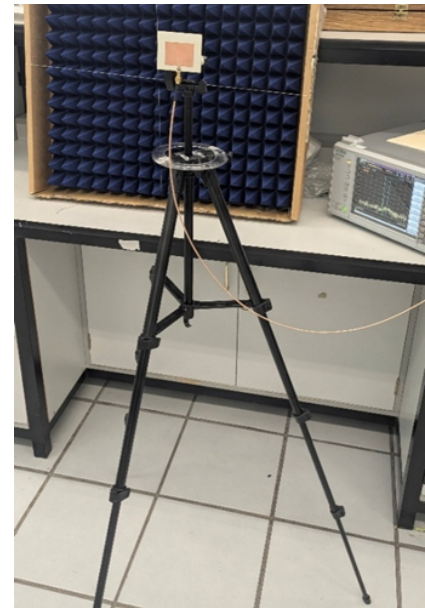


Figura III.15: Posicionamiento de la antena diseñada para la recepción.

- b) *Evaluación de los parámetros de Scattering*: Los parámetros scattering o parámetros de dispersión, son los coeficientes que en análisis de redes describen el comportamiento eléctrico de las redes lineales de frecuencia. A grandes rasgos, describen cuánta parte de una señal de radiofrecuencia es reflejada o transmitida, basándose en la interacción de los puertos de un dispositivo o circuito, a la interacción de ondas incidentes y reflejadas de potencia en cada puerto antes mencionado.

Cabe recalcar que luego de la evaluación que se ocupan dos antenas para la implementación de este proyecto. Se realizaron dos antenas semejantes en las cuales una se verá involucrada en la transmisión y otra en la recepción.

**Parámetro  $S_{11}$**  Es el coeficiente de reflexión de entrada, el cual indica la proporción de la señal que ingresa por el puerto 1 y es reflejada de vuelta a ese mismo puerto. Como respuesta, después de evaluarlo, obtenemos cuánta señal de entrada se devuelve por desadaptación de impedancias en la entrada [45]. Un  $|S_{11}|$  menor implica mejor adaptación (menos reflexión).

- c) *Relación de Parámetros  $S_{21}$  y  $S_{11}$*  El parámetro  $S_{21}$  representa el coeficiente de transmisión directa teniendo en cuenta una señal que entra por el puerto 1 y es transmitida al puerto 2 que, por lo general, es la salida. Este representa la eficiencia con la que el dispositivo transfiere la señal de entrada

hacia la salida [45]. Basado en pruebas a diferentes distancias, se tomó en cuenta para este proyecto que una buena adaptación se registra a los 3 cm el cual se ha seleccionado con base en criterios electromagnéticos, geométricos y funcionales que garantizan un adecuado compromiso entre sensibilidad, rechazo de acoplamiento mutuo y resolución superficial.

**Consideraciones electromagnéticas: campo cercano y acoplamiento**

La proximidad entre antenas puede inducir acoplamiento reactivo, lo que se traduce en interferencia directa y distorsión de la señal recibida. Este fenómeno ocurre en la región denominada *campo cercano*, cuya extensión puede estimarse mediante la expresión:

$$R_{NF} \approx 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda_0}} \tag{III.12}$$

donde  $D$  es la dimensión dominante de la antena (en este caso, aproximadamente  $0.5\lambda_0$ ) y  $\lambda_0 = 12.24\text{cm}$  es la longitud de onda en el aire a 2.45 GHz. Para esta frecuencia, se obtiene un campo cercano de aproximadamente 2.6 cm. Por tanto, una separación de 3 cm asegura que ambas antenas operen fuera del campo reactivo dominante, reduciendo el acoplamiento directo y preservando la integridad de la señal reflejada.

**Consideraciones geométricas: cobertura y solapamiento** Desde una perspectiva geométrica, la separación de 3 cm permite un adecuado solapamiento entre la zona irradiada por la antena transmisora y el volumen de detección de la antena receptora, condición necesaria para observar reflejos de blancos someros. Al mismo tiempo, evita que el acoplamiento directo vía aire o superficie sature la entrada del receptor.

**Consideraciones funcionales: detección de blancos superficiales** Para la detección de estructuras enterradas a pocos centímetros de profundidad, es crucial que la separación entre antenas no exceda el área de sensibilidad conjunta del sistema. La distancia de 3 cm, equivalente a aproximadamente  $\lambda_0/4$ , garantiza un compromiso óptimo entre resolución espacial y rechazo de interferencias directas. Además, al evitar alineamientos exactos (como  $\lambda_0$  o  $n\lambda_0/2$ ), se reduce la posibilidad de formación de lóbulos de fuga directa por interferencia constructiva.

**Sustento analítico: modelo de fuga directa** La fuga directa entre antenas puede modelarse como un campo plano de onda directa, cuya amplitud decae inversamente con la distancia  $L$ :

$$E_{\text{leak}}(L) = \frac{E_0}{L} \cdot e^{-jk_0L} \quad (\text{III.13})$$

Donde  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$  es el número de onda. Al incrementar ligeramente  $L$ , se obtiene un desplazamiento de fase que, en combinación con reflexiones desde el suelo, puede inducir cancelaciones parciales del acoplamiento, mejorando la relación señal-ruido.

**Evidencia experimental y bibliográfica** La configuración con separación de 3 cm ha sido empleada y modelada en trabajos previos como el de Lambot [46], donde se estudian configuraciones biestáticas off-ground en radares SFCW, demostrando mejoras en la detección de blancos someros y en el control del acoplamiento antena-antena.

Con el fin de experimentalmente obtener referencia en cuanto a la separación ideal de las antenas, se dispuso la configuración observada en la Figura III.16, en la que se realizaron pruebas a distintas distancias partiendo desde los 0 cm hasta los 10 cm con la ayuda de un Analizador Vectorial de Redes (VNA) y poder justificar los enunciados antes mencionados.

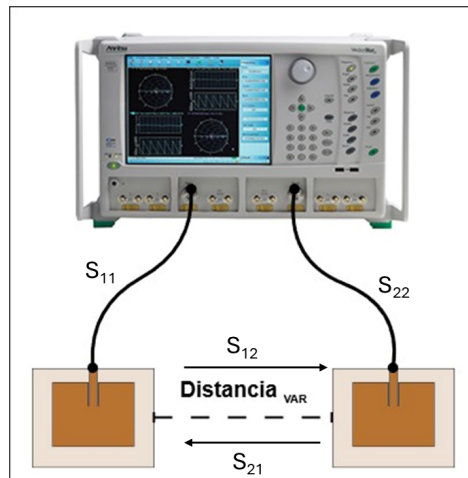


Figura III.16: Diagrama ilustrado de la conexión de dos antenas a un Analizador Vectorial de Redes.

### 3.2.3. Explorar con mayor profundidad aspectos o certificaciones de manufacturabilidad relacionados con el desarrollo de su invención tecnológica

**Sistema Electrónico Digital:** Este sistema está descrito en la plataforma de procesamiento embebido de una FPGA Zedboard con procesador ARM Cortex-A9,

la cual es la encargada de controlar la sincronización, adquisición de datos en tiempo real y manejo de periféricos de comunicación.

**Sistema de radiofrecuencia:** Es el sistema que integra en el módulo transceptor AD9361, en el que se desarrollan los sistemas transmisores y receptores en el caso de este proyecto en la banda de 2.45 GHz. Este sistema es totalmente compatible con el Radio-Definido por Software ya que permite realizar una reconfigurabilidad dinámica de diferentes parámetros como: frecuencia de operación, amplitud de señal y tasa de muestreo.

**Sistema de antenas:** Es un sistema radiador conformado por dos antenas una para transmisión y recepción, diseñado para operar en la banda de los 2.45 GHz con el modelo matemático observado en la 3.2.2. Estas antenas poseen alta resolución vertical, lo cual es de gran utilidad para el prototipo de georradar, de tal manera que no existan interferencias.

**Sistema de Visualización e Interfaz de Usuario:** Esta etapa del prototipo consta de una etapa en la que permite al usuario final interactuar directamente con los parámetros del sistema radiofrecuencia, además de permitir la visualización de los distintos espectros de potencia en función de la frecuencia y el espectrograma de potencia basado en mapa de colores.

### 3.2.4. Alcanzar la validación de mercado referente a la invención con entrevistas con usuarios potenciales y estudios de mercado

Con el objetivo de realizar un estudio de mercado enfocado en las áreas de interés o similares, se aplicó una encuesta a un público que comprende entre las principales áreas:

- Arquitectura
- Ingeniería Civil
- Arqueología
- Entre otras

En la encuesta aplicada se tomaron en cuenta las preguntas observadas en el ANEXO 1.3

### 3.2.5. La invención tecnológica debe funcionar a nivel de laboratorio

#### Implementación en Simulink para el subsistema de transmisión

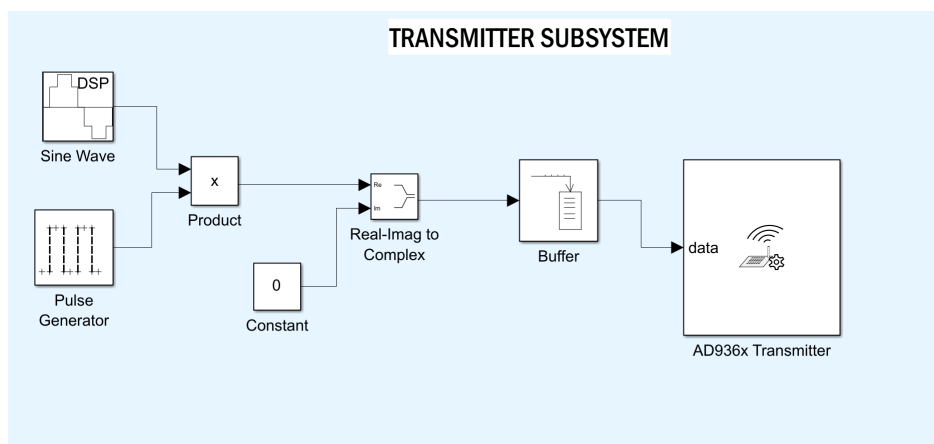


Figura III.17: Subsistema de transmisión de georradar diseñado

#### Onda sinusoidal

La onda senoidal discreta generada por este bloque se define matemáticamente como:

$$x[n] = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot n \cdot T_s + \phi)$$

Donde:

Tabla III.6: Parámetros de la señal de onda discreta.

Parámetro	Símbolo	Valor
Amplitud de la onda	$A$	1 V
Frecuencia de la onda	$f$	100 KHz
Desfase inicial	$\phi$	0 rad
Periodo de muestreo	$T_s$	1 $\mu$ s
Índice discreto de tiempo	$n$	0, 1, 2, ...

#### Frecuencia angular discreta

$$\omega = 2\pi f T_s = 2\pi \cdot 100 \times 10^3 \cdot 1 \times 10^{-6} = 0.6283 \quad (\text{rad/muestra})$$

Esto significa que la onda completa un ciclo cada:

$$N = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{0.6283} \approx 10 \quad \text{muestras por ciclo}$$

### Generadores de pulso

Este bloque genera una señal cuadrada periódica (de tipo pulso) de acuerdo con los parámetros definidos.

Dado un tiempo  $t$ , la salida del bloque  $y(t)$  se define como:

$$y(t) = \begin{cases} A, & \text{si } \text{mód}(t - \phi, T) < \left(\frac{W}{100} \cdot T\right) \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Donde:

Tabla III.7: Parámetros de la función de generación de pulsos.

Símbolo	Valor	Descripción
$A$	1	Amplitud
$T$	4096 s	Periodo total de la señal
$W$	5 %	Ancho del pulso (Duty Cycle)
$\phi$	0	Retardo de fase
mod		Función módulo (residuo)

Tabla III.8: Características del tren de pulsos generado.

Parámetro	Cálculo	Valor
Tiempo en alto ( $T_{on}$ )	$0.05 \cdot 4096$	204.8 s
Tiempo en bajo ( $T_{off}$ )	$4096 - 204.8$	3891.2 s

### Implementación en Simulink para el Subsistema de recepción

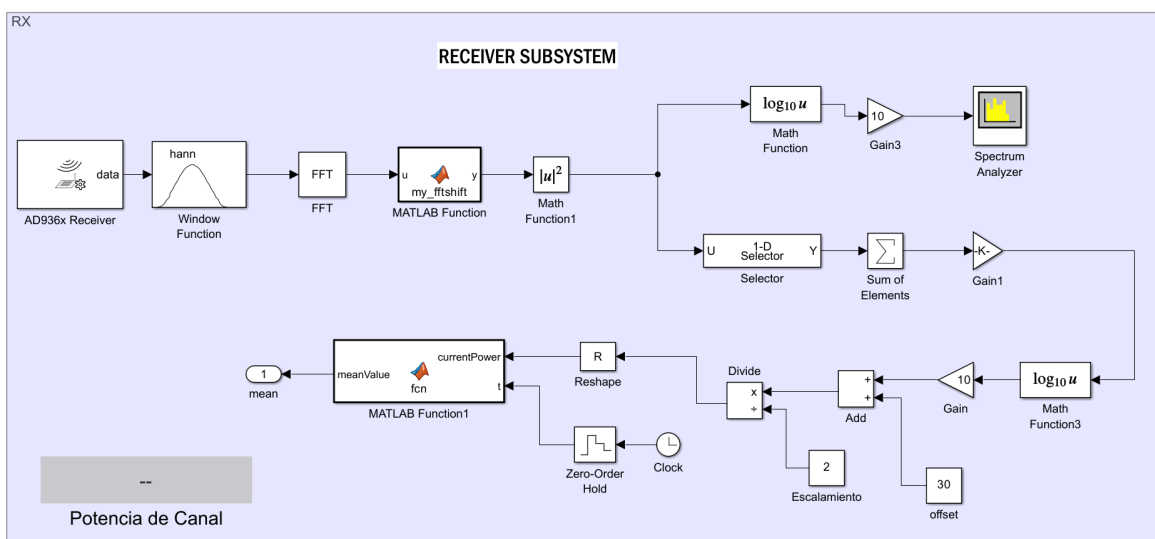


Figura III.18: Subsistema de transmisión de georradar diseñado

Aquí se observan múltiples bloques que cumplen con el propósito de realizar el postprocesamiento de la señal, ya sea esta para su visualización o análisis matemático.

El primer bloque, AD936x Receiver, simula un receptor de radio definido por software (SDR). Su función es capturar una señal inalámbrica, convertirla a una frecuencia de banda base y digitalizarla. El bloque emite una secuencia de muestras complejas (I/Q) que representan la señal en el dominio del tiempo.

La señal de salida es una secuencia discreta  $x[n]$ , donde cada muestra es un número complejo:

$$x[n] = I[n] + jQ[n] \quad (\text{III.14})$$

Aquí,  $I[n]$  y  $Q[n]$  son las componentes en fase y en cuadratura, respectivamente, las cuales encapsulan tanto la amplitud como la fase de la señal de radio original.

**Window Function (Ventana Hann):** La señal digitalizada  $x[n]$  se procesa con una función de ventana, específicamente una ventana de Hann. Este paso es esencial para minimizar el fenómeno de fuga espectral (spectral leakage) que ocurre al aplicar una FFT a un bloque de señal de longitud finita. La ventana suaviza la amplitud de la señal en los bordes del bloque de muestras, reduciéndola a cero, lo que disminuye las discontinuidades artificiales y mejora la precisión de la estimación espectral.

La señal de entrada se multiplica, muestra por muestra, por la función de ventana de Hann,  $w[n]$ . Para un tamaño de FFT de  $N = 8192$ , la ventana se define como:

$$w[n] = 0.5 \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi n}{N-1} \right) \right), \quad \text{para } n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{III.15})$$

La señal resultante,  $x_w[n]$ , se obtiene mediante:

$$x_w[n] = x[n] \cdot w[n] \quad (\text{III.16})$$

**FFT (Transformada Rápida de Fourier):** El bloque FFT implementa la Transformada Rápida de Fourier, un algoritmo que calcula eficientemente la Transformada Discreta de Fourier (DFT). Esta operación transforma la representación de la señal del dominio del tiempo ( $x_w[n]$ ) al dominio de la frecuencia. La salida consiste en un vector de números complejos, donde cada uno indica la magnitud y fase de una componente de frecuencia específica presente en la señal.

La FFT calcula  $X[k]$  según la fórmula de la DFT, con  $N = 8192$ :

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x_w[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad \text{para } k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{III.17})$$

Cada índice  $k$  corresponde a una frecuencia analógica  $f_k = k \cdot (f_s/N)$ , siendo  $f_s$  la frecuencia de muestreo del sistema.

**Procesamiento Espectral:** La salida nativa de una FFT ordena las frecuencias desde 0 Hz hasta la frecuencia de muestreo. La función `fftshift` reordena este vector para que la frecuencia de 0 Hz (componente DC) se sitúe en el centro. Esto produce un espectro más intuitivo, con frecuencias negativas a la izquierda y positivas a la derecha del centro.

**Análisis y Visualización del Espectro:** La rama Superior que está relacionada directamente al analizador de espectros acondiciona la señal de potencia para su visualización.

1. **Conversión a Decibeles (dB):** Los bloques `log10` u y `Gain3` (10) convierten la potencia de una escala lineal a una escala logarítmica en decibeles (dB), estándar en el análisis de espectro.

$$P_{dB}[k] = 10 \log_{10}(P[k]) \quad (\text{III.18})$$

2. **Promediado (`mean2`):** Este bloque promedia múltiples espectros de potencia calculados a lo largo del tiempo. El promediado reduce la varianza y el ruido, produciendo una estimación del espectro más estable.
3. **Spectrum Analyzer:** Este bloque gráfica la potencia promediada en dB ( $P_{dB}[k]$ ) en función de la frecuencia, proporcionando una representación visual del espectro de la señal.

En cuanto a la rama inferior, se encarga de calcular la potencia total dentro de una banda de interés y la convierte a un valor calibrado.

1. **Cálculo de Potencia en Banda:** El bloque `Selector` aísla un rango de índices de frecuencia, desde  $k_{start}$  hasta  $k_{end}$ . El bloque `Sum of Elements` suma los valores de potencia  $P[k]$  para esos índices.

$$P_{band} = \sum_{k=k_{start}}^{k_{end}} P[k] \quad (\text{III.19})$$

2. **Circuito de Calibración:** La rama inferior ajusta el valor crudo  $P_{band}$ . Las operaciones de división, suma y ganancia (`R`, `Escalamiento`, `offset`) actúan como factores de calibración para compensar las características del

hardware. La fórmula general para el valor de potencia calibrado es:

$$P_{\text{calibrado}} = 10 \log_{10} \left( \left( \frac{P_{\text{band}}}{R} \right) \cdot \text{Gain}_{\text{esc}} + \text{Offset}_{\text{final}} \right) \quad (\text{III.20})$$

Este valor final representa una medida de potencia en unidades estándar, como dBm (decibeles-miliwatt).

### 3.2.6. Identificar los riesgos tecnológicos de mercado y financieros con un plan de mitigación para los mismos

Como parte de los requerimientos establecidos para alcanzar el Nivel 4 de Madurez Tecnológica (TRL 4), se llevó a cabo un análisis integral de los riesgos potenciales que podrían comprometer la viabilidad técnica, la adopción por parte del mercado y la sostenibilidad financiera del prototipo desarrollado. Estos riesgos se agrupan en tres categorías principales: tecnológicos, de mercado y financieros, y fueron identificados a partir de la experiencia experimental, retroalimentación esperada en encuestas a usuarios potenciales, y la evaluación crítica del entorno operativo y de desarrollo. A cada riesgo identificado se le ha asociado un plan de mitigación específico, el cual busca reducir su impacto y probabilidad de ocurrencia, y garantizar la continuidad del proyecto a futuro conforme avance hacia niveles superiores de madurez tecnológica.

Tabla III.9: Tabla de Gestión de Riesgos

Tipo de Riesgo	Descripción	Plan de Mitigación
Tecnológico	1. Falta de compatibilidad o de soporte a los dispositivos de hardware con los algoritmos desarrollados.	1. Revisión continua y análisis de nuevos modelos, con el objetivo de actualizar el algoritmo a las nuevas librerías.
	2. Pérdida de información relacionada con el Sistema Operativo del módulo SDR, almacenada en el dispositivo de almacenamiento extraíble SD.	2. Respaldo programado en un dispositivo de almacenamiento extra compatible con el módulo de hardware.
	3. Desgaste de la película conductora del sistema radiante, lo que dificulta la resolución vertical en favor de la detección de objetos.	3. Recubrimiento aislante dieléctrico con propiedades de permitividad relativa aproximada a cero.

Tabla III.9 – continuación

<b>Tipo de Riesgo</b>	<b>Análisis del Riesgo (Descripción)</b>	<b>Plan de Mitigación</b>
	4. Dificultad presente al momento de establecer conexión por primera vez.	4. Guía detallada sobre la configuración y conectividad del dispositivo de hardware con la herramienta de software.
<b>De Mercado</b>	1. Baja adopción por desconocimiento de la tecnología GPR.	1. Desarrollar guías interactivas sobre la funcionalidad de la tecnología GPR con SDR, las guías pueden ser literarias o audiovisuales.
	2. Incertidumbre ante la fiabilidad y precisión de los resultados proporcionados por el prototipo.	2. Producir videos que permitan al usuario ver cómo opera el dispositivo radar bajo distintas condiciones de uso, demostrando así su efectividad en distintos entornos.
	3. Dificultad de uso percibida por el usuario en las herramientas de visualización de software.	3. Realizar videotutoriales y manuales de usuario para que orienten al usuario en la interpretación de resultados y manejo de la interfaz de software.
<b>Financiero</b>	1. Costos relativamente elevados en los componentes de hardware.	1. Buscar alternativas de financiación como: otros dispositivos con puente conector FMC/LPC, financiamiento por parte de terceros como investigación o mantenerse con las versiones previas que por lo general son más económicas que las versiones más actuales en el mercado.
	2. Costos elevados de las licencias de software Matlab.	2. Trabajar con licencias institucionales o como alternativa migrar el algoritmo a plataformas de código abierto compatibles con SDR.

### 3.2.7. Actualizar el estudio de patentes nacionales e internacionales y responder si se cuenta con una estrategia de gestión de la propiedad intelectual

Se realizó una búsqueda de patentes relacionadas con sistemas GPR basados en radio definida por software (SDR), identificando desarrollos centrados en arquitecturas FMCW, configuraciones multiestáticas e integración con redes neuronales para mejora de resolución. En contraste, el presente trabajo propone una solución diferenciada, basada en transmisión de pulsos en banda ISM de 2.45 GHz, con procesamiento en tiempo real en FPGA y visualización espectral, orientada a entornos educativos y sociales.

Tabla III.10: Análisis de patentes actualizadas al momento de empezar pruebas de laboratorio.

Patente	Características Principales
<b>PH1/2021/050604</b> <i>A SOFTWARE-DEFINED RADIO BASED GROUND PENETRATING RADAR</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliza GPR basado en FMCW (onda continua modulada en frecuencia) con un SDR de bajo ancho de banda.</li> <li>• Emplea una red neuronal convolucional (CNN) para mejorar la resolución de rango.</li> <li>• Incorpora antenas fractales de tipo pajarita con blindaje de RF (estaño + carburo de silicio).</li> <li>• Incluye una interfaz gráfica de usuario (GUI) para control y visualización.</li> </ul>
<b>US20250277444 A1</b> <i>System and Method for Deep Earth Penetrating Multi-Static Ground Mapping Radar</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es un sistema GPR multiestático (múltiples transmisores y receptores) para mapeo profundo.</li> <li>• Aplica métodos de interferometría radar para crear mapas del subsuelo.</li> <li>• Diseñado para penetración profunda y alta resolución lateral.</li> <li>• Incluye algoritmos de procesamiento espacial y está enfocado en uso geológico y cartografía avanzada.</li> </ul>

### 3.2.8. Plan de licenciamiento de tecnología a terceros

Para la futura implementación del prototipo, se propone un modelo de transferencia tecnológica basado en el licenciamiento no exclusivo, dirigido a instituciones académicas, centros de investigación y organismos de protección civil que requieran soluciones de radar de bajo costo. El objetivo de esta estrategia es fomentar la adopción tecnológica sin fines de lucro, lo cual es consistente con el enfoque social y académico del proyecto. Adicionalmente, se analiza la protección de componentes clave del sistema (tales como los algoritmos de procesamiento y la configuración del SDR) mediante el

registro de propiedad intelectual, con el fin de facilitar su uso a través de esquemas de colaboración técnica o modelos de licenciamiento comercial de bajo impacto.

## IV. Resultados y Análisis

Los procedimientos descritos en la sección anterior, correspondientes al desarrollo, dieron lugar a los resultados presentados en este capítulo. Estos resultados permiten emitir conclusiones parciales en cada etapa del proyecto, contribuyendo al cumplimiento de los objetivos planteados desde el inicio.

### 4.1. Resultados de la Evaluación del Prototipo a Escala 4 de Desarrollo Tecnológico

En esta sección se expone los resultados obtenidos durante la evaluación del prototipo bajo los criterios establecidos para el Nivel 4 TRL. En donde se requiere demostrar que los componentes clave del sistema han sido integrados y validados en un entorno controlado de laboratorio, lo cual implica pruebas funcionales, análisis de riesgos, verificación de subsistemas, revisión normativa y exploración preliminar del mercado.

El enfoque adoptado en esta evaluación abarcó tanto aspectos técnicos como estratégicos: se documentó la integración entre hardware y software, se ejecutaron pruebas de transmisión y recepción utilizando el sistema embebido con arquitectura SDR, y se analizaron indicadores de desempeño del sistema en distintos escenarios de prueba. Asimismo, se identificaron riesgos tecnológicos, de mercado y financieros, proponiendo planes de mitigación pertinentes. Finalmente, se realizó una revisión de propiedad intelectual y se estableció un plan inicial de licenciamiento para futuros escenarios de transferencia tecnológica.

A continuación, se presentan los resultados desglosados según cada uno de los requerimientos establecidos para este nivel de madurez.

#### 4.1.1. Integrar los componentes principales de la invención tecnológica

Esta sección presenta la validación experimental del sistema de georradar (GPR) en un entorno de laboratorio controlado con blindaje electromagnético (cámara de Faraday) para minimizar interferencias externas y acoplamientos no deseados. Las pruebas se realizaron sobre un recipiente de  $30 \times 20 \times 15$  cm con una capa de tierra de jardín de 8 cm de espesor. La configuración de antenas fue biestática off-ground, con separación Tx-Rx de 3 cm y una altura de 5 cm respecto a la superficie del suelo, para equilibrar la eficiencia de acoplo al medio y la reducción de fugas por acoplamiento directo. El

prototipo armado a nivel de laboratorio se puede observar en la imagen de la Figura IV.1

#### 4.1.2. Realizar pruebas de validación de efectividad de dicha invención de laboratorio

##### Módulo de Software

Los resultados sugeridos en la sección 3.2.2 indican una relación señal-ruido de 13.01 dB, lo cual significa que la señal es claramente distinguible sobre el ruido en el espectrograma, observado en la Figura IV.2, el cual presenta, en la parte superior, el espectro de magnitud de la señal y su comportamiento respecto al barrido de frecuencias. En la parte inferior, se visualiza la potencia de la señal proporcionada por el espectrógrafo, en función del cambio de la potencia de la señal.

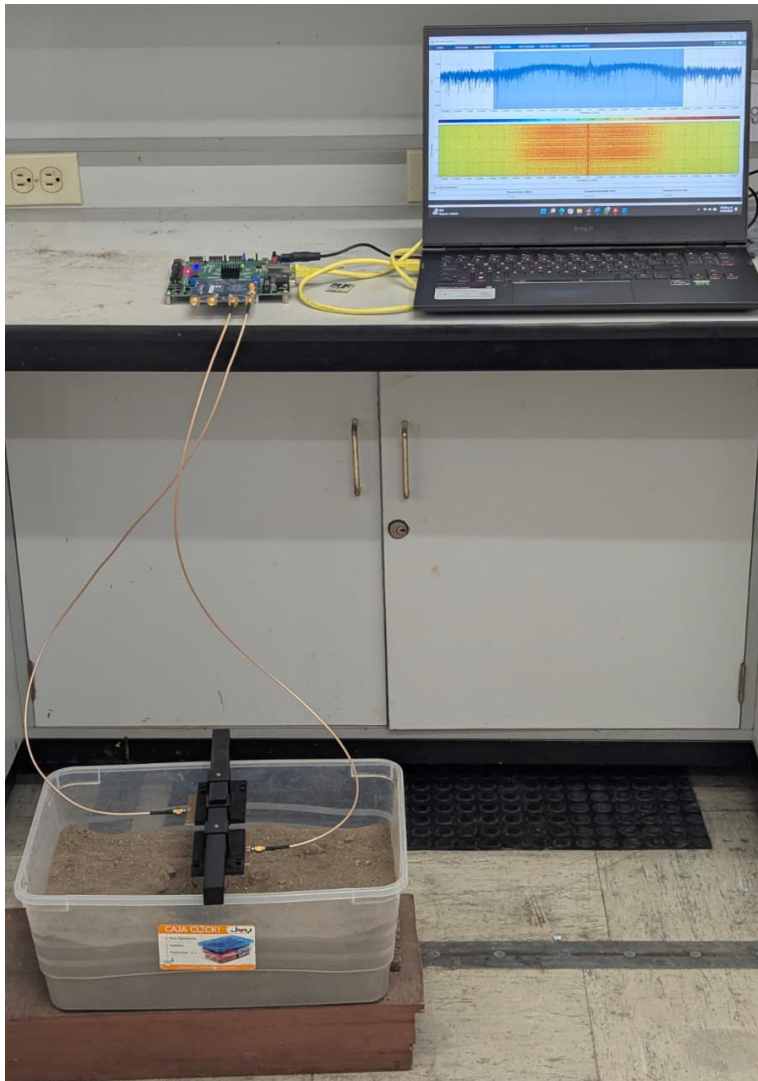


Figura IV.1: Implementación física del prototipo para pruebas a nivel de laboratorio.

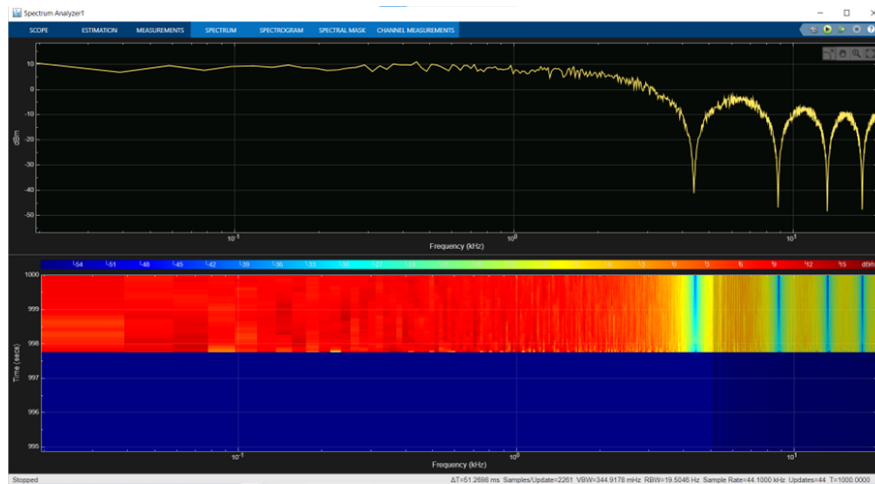


Figura IV.2: Espectrograma correspondiente al diagrama de bloques mostrada en la Figura III.4

### Módulo de Transmisión y Recepción

Como se puede observar en la Figura IV.3, es el espectro generado como resultado de ejecutar el código de transmisión usando el software Matlab y las librerías de Analog Devices registrado mediante un analizador de espectros. Esta última, mediante comandos, podemos configurar varios parámetros como: la amplitud, frecuencia, ganancia, etc.

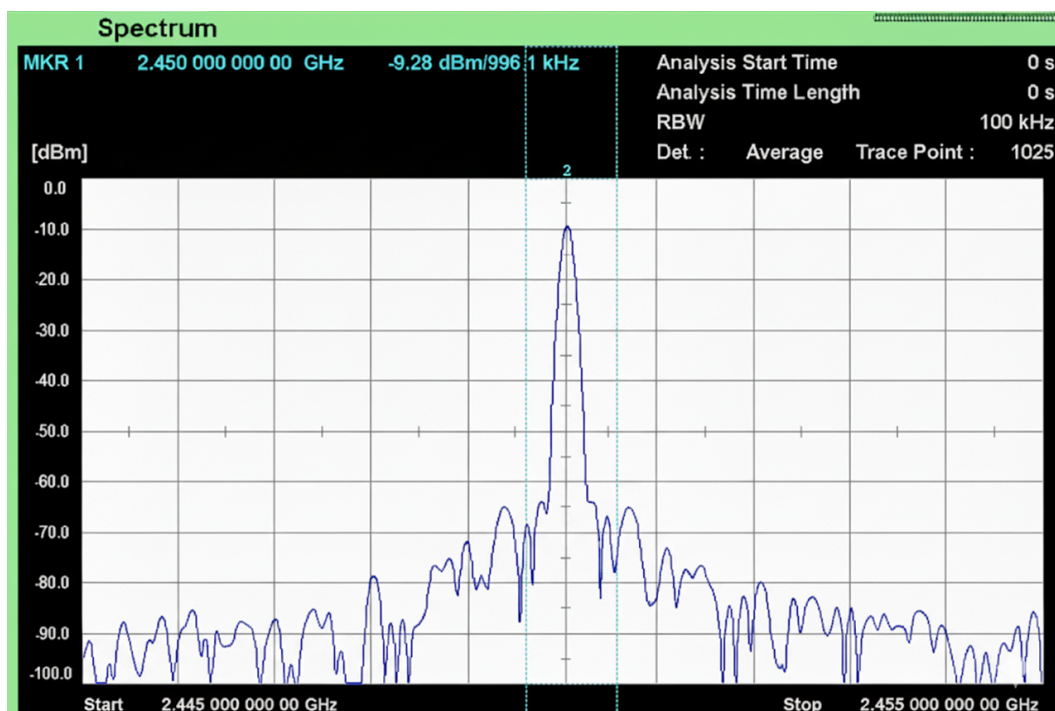


Figura IV.3: Espectro generado a través del enlace de 2.45 GHz visto desde un analizador de espectros.

Además, en la Figura IV.4, así mismo con el software Matlab, podemos ver el resultado en cuanto a la recepción ya en el ordenador. Observando que los resultados no se alejan de lo observado en el analizador de espectros.

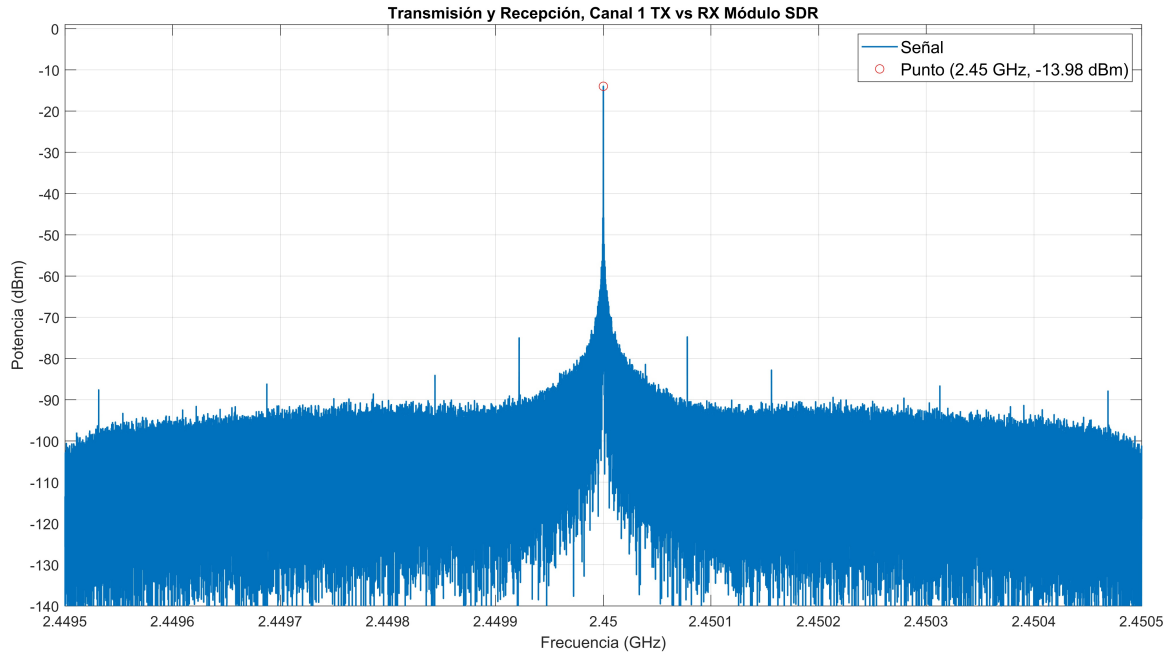


Figura IV.4: Espectro generado a través del enlace de 2.45 GHz visto desde Matlab.

Tabla IV.1: Resumen estadístico para diferentes niveles de atenuación.

Atenuación	Media aritmética	Desviación estándar	Error estándar de la medida	Coefficiente de variación
-1	-2.1338	0.00835	0.003734	0.39 %
-10	-9.1082	0.0106	0.00475	0.12 %
-20	-16.9642	0.04536	0.0203	0.27 %
-30	-23.4028	0.085057	0.03804	0.36 %
-40	-38.2538	0.124011	0.055459	0.32 %
-50	-54.0094	4.0953	1.8314	7.58 %

Una vez implementado el algoritmo observado en la sección anterior, se procedió a realizar la evaluación de los resultados con el uso de un analizador de espectros, identificando el punto máximo de las medidas, para lo cual se realizaron múltiples mediciones con distintos rangos de amplitud. Para esto se realizaron varias muestras para distintos niveles de atenuación en el canal TX, cuyos resultados arrojaron el

resumen presentado en la Tabla IV.1, en donde se pueden ver los valores obtenidos a consecuencia de realizar 5 muestras para cada nivel de atenuación, considerando:

**Media Aritmética** Promedio de los valores medidos.

**Desviación Estándar** Cuantifica la dispersión de las mediciones individuales respecto al promedio, evidenciando una alta repetibilidad del sistema, especialmente en niveles bajos de atenuación.

**Error Estándar de la Media** Estima la precisión del promedio obtenido, confirmando que el número de muestras, para obtener estimaciones consistentes de potencia medida.

**Coefficiente de Variación** Relación porcentual entre la desviación estándar y el valor absoluto de la media; indica la variabilidad relativa de los datos respecto a su valor promedio.

Para este proyecto se tomó en cuenta para la señal de transmisión una atenuación de -10 dB debido a su bajo coeficiente de variación, el cual demuestra estabilidad del sistema en dicho nivel, y en su representación se puede observar en la Figura IV.5.

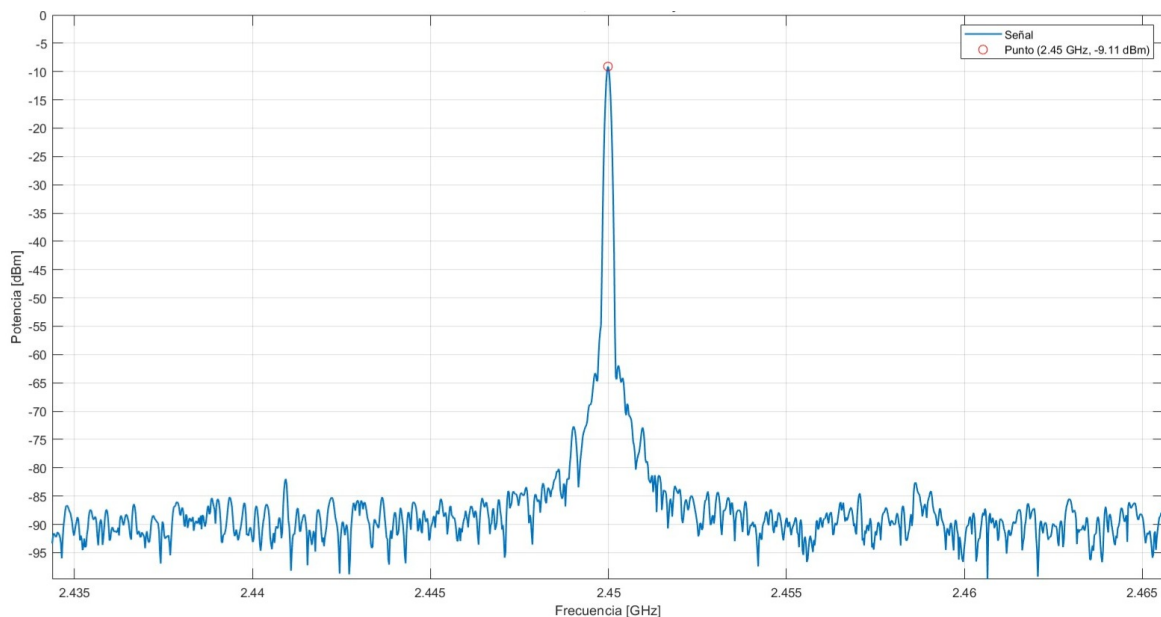


Figura IV.5: Transmisión con atenuación a -10 dBm.

### Módulo de Antenas

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con el prototipo. Los datos se muestran a través de gráficas y espectros de radar para validar el rendimiento y la eficacia del sistema.

1. **Implementación en el entorno de simulación:** Como primer resultado de simular la antena parche en el entorno de simulación electromagnético ANSYS HFSS con los parámetros obtenidos en la Tabla III.5.

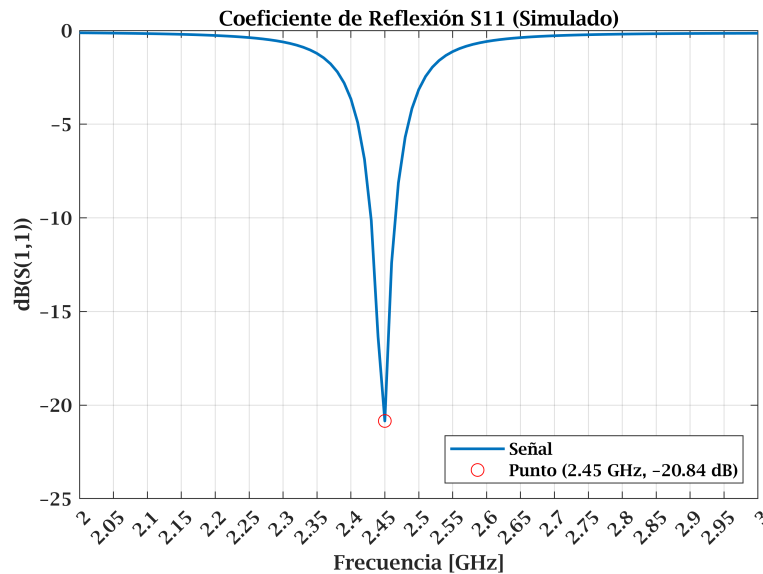


Figura IV.6: Respuesta en frecuencia de las antenas diseñadas mediante simulación computacional.

Se puede observar que la antena tiene una excelente respuesta en la banda de frecuencia de 2.45 GHz y que su ancho de banda es reducido, alcanzando un coeficiente de reflexión superior a los 20 dB.

2. **Fabricación de la antena:** La fabricación del sistema radiante se llevó a cabo mediante un proceso manual de fotograbado simplificado. Inicialmente, se procedió a cortar el sustrato dieléctrico a las dimensiones calculadas, utilizando como material base una lámina de cobre laminada sobre un sustrato de características específicas ( $\epsilon_r$ ,  $h$ ,  $\tan(\delta)$ ). Posteriormente, se aplicó un patrón de corte elaborado en vinil adhesivo, el cual actuó como máscara protectora para definir las zonas activas del parche y la línea de transmisión. Una vez adherido el patrón, el sustrato fue sumergido en una solución de cloruro férrico ( $FeCl_3$ ), que permitió eliminar las áreas de cobre expuestas fuera del diseño, dejando así únicamente las partes conductoras deseadas. Finalmente, la antena fue limpiada cuidadosamente con alcohol isopropílico para remover residuos del grabado y mejorar la adherencia, y se procedió a soldar el conector coaxial en el extremo de la línea de transmisión para su integración con el módulo de radiofrecuencia. Los resultados obtenidos en cada una de las antenas diseñadas son:

- a) *Antena diseñada para transmisión:* En este caso, como se observa en la Figu-

ra IV.7, que existe una excelente adaptación de impedancia en la frecuencia de operación (2.45 GHz), es decir, que cuando está por debajo de los -20dBm, la antena presenta una resonancia eficaz en esa banda de frecuencia.

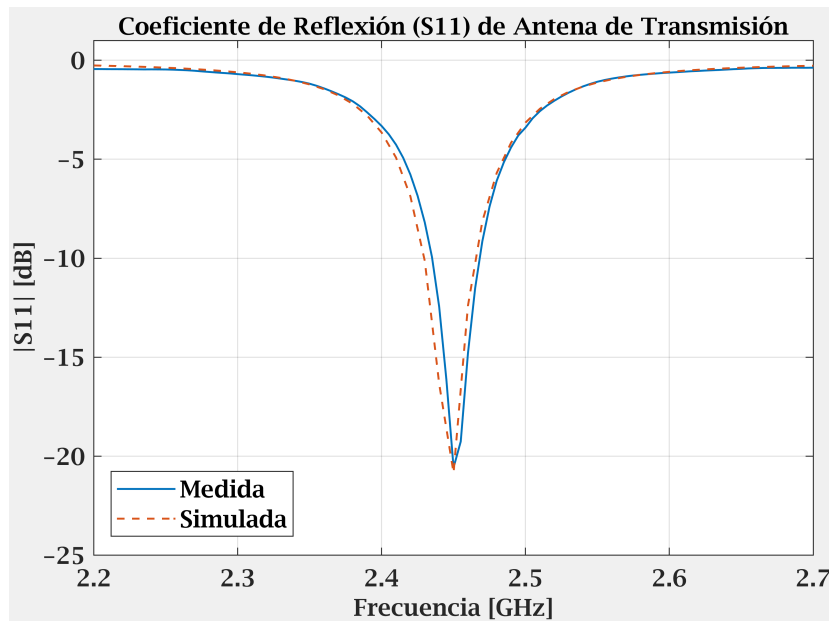


Figura IV.7: Coeficiente de reflexión de la antena de transmisión.

- b) *Antena diseñada para recepción:* En la Figura IV.8 se observa que, aunque la frecuencia de resonancia se encuentra ligeramente desplazada hacia los 2.46 GHz, la antena mantiene una excelente adaptación dentro de la banda de interés en 2.45 GHz.

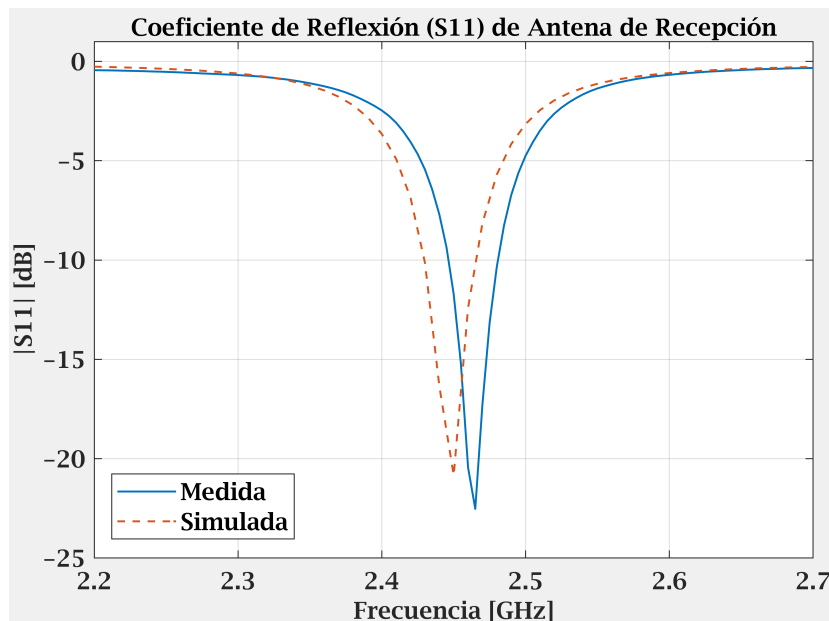


Figura IV.8: Coeficiente de reflexión de la antena de recepción.

Este pequeño desplazamiento no representa un riesgo significativo para el desempeño del sistema, ya que el parámetro S11 permanece por debajo de  $-10$  dB en dicho rango, lo cual garantiza que la antena sigue operando eficientemente dentro de la banda objetivo.

3. *Patrón de radiación:* De acuerdo al entorno de simulación, el patrón de radiación, marcado por la línea azul de la Figura IV.9, en comparación con los resultados experimentales denotados por el trazo de color rojo, su relación comprende un patrón direccional, con una ganancia máxima centrada en el eje frontal, es decir, los  $0^\circ$ .

Esto indica que la mayor parte de la energía es radiada en dirección frontal, mientras que se observa una atenuación significativa hacia los lados, especialmente a partir de los  $\pm 60^\circ$ , donde la ganancia cae por debajo de  $-20$  dB.

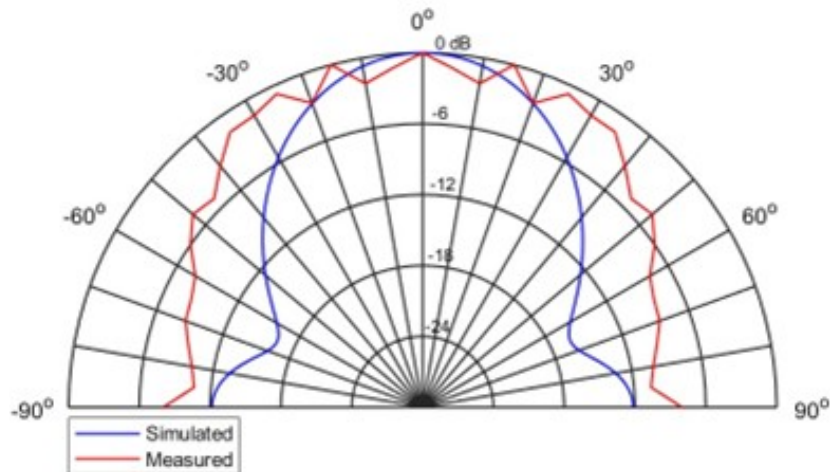


Figura IV.9: Patrón de radiación medido y simulado para la antena diseñada.

4. *Separación entre antenas:* Los resultados de los parámetros de dispersión con el objetivo de identificar las interferencias de señal que se pueden generar entre ambas antenas con distintos nivel de separación, y sustentarlo por vía experimental.

Tabla IV.2: Parámetros S medidos a 2.45 GHz según la separación de antenas.

Separación	Reflexión S11 (aprox.)	Transmisión S21 (aprox.)
0 cm (sin separación)	-20 dB	-22 dB
1 cm	-22 dB	-23 dB
3 cm	-23 dB	-30 dB
5 cm	-22 dB	-35 dB
10 cm	-22 dB	-37 dB
15 cm	-23 dB	-40 dB

Una vez sustentada la separación ideal entre antenas, se realizó un acoplamiento para las antenas. Y se efectuó el análisis de la señal en el Analizador Vectorial de Redes. En la Figura IV.10 se observa la evaluación de los parámetros de las antenas colocadas a una distancia de 3 cm en la que el acoplamiento  $S_{21}$  se reduce a aproximadamente -30 dB, indicando una mejora en el aislamiento. La transferencia de señal directa disminuye, lo que favorece la separación funcional entre transmisor y receptor.

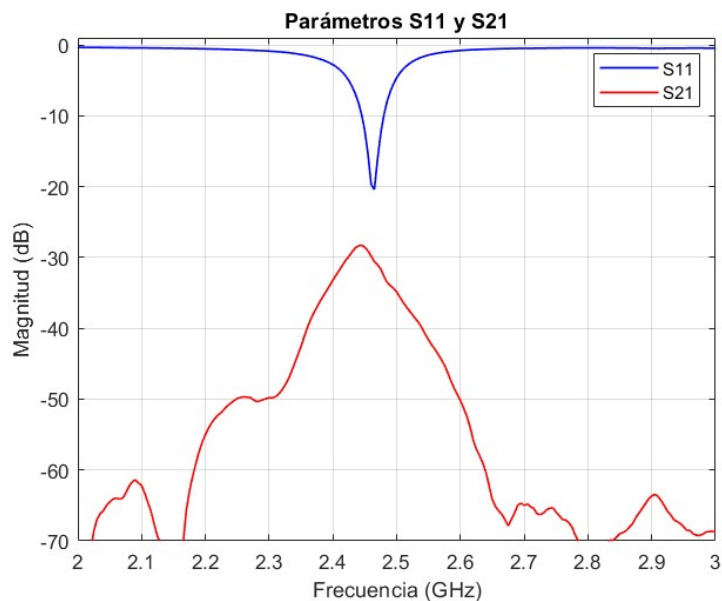


Figura IV.10: Parámetros S21 y S11 de dos antenas para transmisión y recepción con 3cm de separación.

### 4.1.3. Explorar con mayor profundidad aspectos o certificaciones de manufacturabilidad relacionados con el desarrollo de su invención tecnológica

Siguiendo con el proceso de validación para alcanzar el nivel 4 de TRL, se realizó un análisis normativo orientado a la manufactura del prototipo. El objetivo es asegurar que los componentes, evaluados en un entorno de laboratorio, cumplan con los estándares requeridos para su futuro escalamiento.

La Tabla IV.3 presenta el resultado de dicho análisis, desglosando cada subsistema tecnológico y las normas y estándares específicos que rigen su diseño, seguridad y calidad de fabricación. Esta correspondencia normativa es un requisito indispensable para demostrar la viabilidad del prototipo más allá del laboratorio.

Tabla IV.3: Normatividad Aplicable por Sistema Tecnológico

Sistema Tecnológico	Normas y Estándares	Uso
Sistema Electrónico (FPGA, alimentación, módulo transceptor)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISO 9001 (Gestión de calidad) [47]</li> <li>• IPC-A-610 (Aplicado a ensamblajes electrónicos) [48]</li> <li>• IPC J-STD-001 (Sistemas de soldadura) [49]</li> <li>• NOM-003-SCFI-2014 (Seguridad en productos eléctricos) [50]</li> </ul>	Aplica a los procesos de ensamblaje y calidad en el armado de PCBs, soldadura de componentes, conexiones seguras y alimentación regulada de los módulos SDR/FPGA.
Sistema de Radiofrecuencia (AD9631 / transceptor SDR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NMX-J-610-4-6-ANCE-2018 (Compatibilidad electromagnética) [51]</li> <li>• IFT-015 (Compatibilidad electromagnética para equipos terminales) [52]</li> </ul>	Se consideran normas de inmunidad y emisiones EMC ya que el transceptor opera en banda ISM 2.45 GHz y puede ser fuente de interferencia o vulnerable a ella. Se busca asegurar un entorno de pruebas limpio y reproducible.
Sistema de Antenas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IPC-2221 (Diseño de PCBs para radiofrecuencia) [53]</li> </ul>	Las antenas diseñadas en microstrip requieren precisión en dimensiones, aislamiento dieléctrico y minimización de pérdidas para operar eficientemente en 2.45 GHz.
Sistema de Procesamiento de Señales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISO/IEC 25002:2024 (Calidad de software) [54]</li> <li>• IEEE 829 (Normas para documentación de pruebas de software) [55]</li> </ul>	Las rutinas implementadas deben seguir criterios de calidad de software, validación funcional de algoritmos y trazabilidad de versiones.

Tabla IV.3 – continuación

Sistema Tecnológico	Normas y Estándares	Uso
Sistema de Interfaz Gráfica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISO/IEC 25040 (Calidad de software: usabilidad, eficiencia, mantenibilidad) [56]</li> <li>• IEEE 1028 (Auditorías de software) [57]</li> </ul>	Aunque no se busca certificación formal, se consideran atributos de calidad como la facilidad de uso, la visualización correcta de resultados y la documentación funcional.

#### 4.1.4. Alcanzar la validación de mercado referente a la invención con entrevistas con usuarios potenciales y estudios de mercado

Siguiendo con lo planteado en la sección 3.2.4 se presentan los resultados a cada pregunta de la encuesta realizada, se puede observar que aparte de los grupos de interés definidos inicialmente, hubieron encuestados pertenecientes a otras áreas de ingeniería que mostraron interés en el prototipo.

##### 1. Ocupación / Área profesional

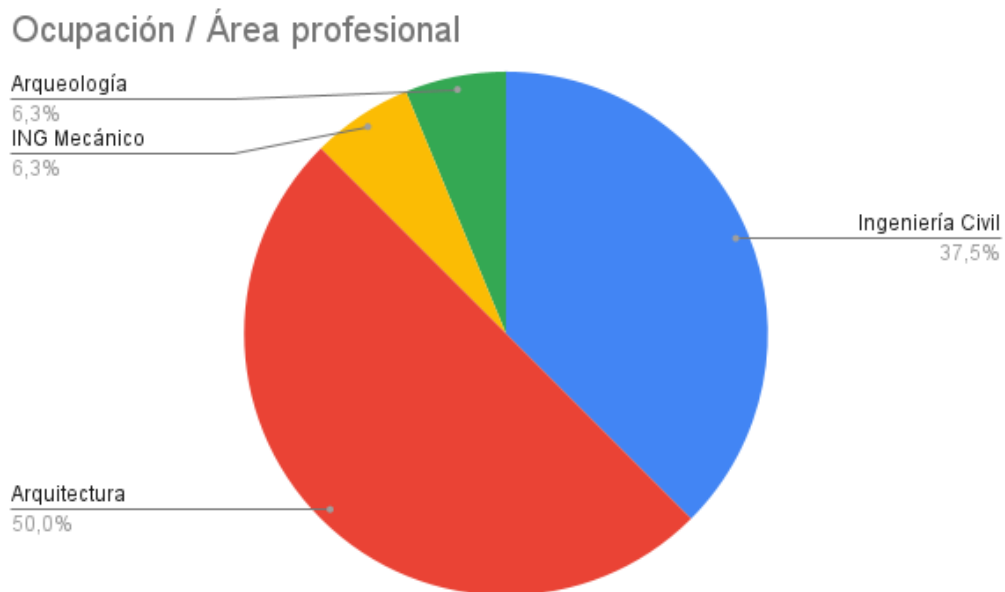


Figura IV.11: Resultados pregunta 1 encuesta.

2. Tiempo de experiencia en el área

Recuento de Tiempo de experiencia en el área

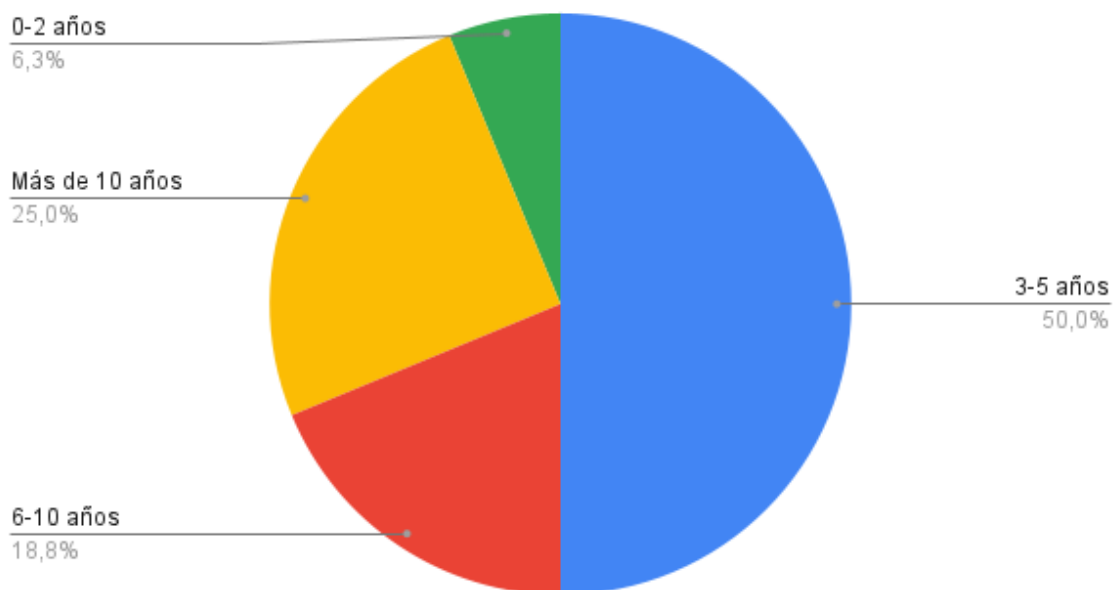


Figura IV.12: Resultados pregunta 2 encuesta.

3. ¿Ha utilizado antes algún tipo de radar de subsuelo o tecnología GPR?

¿Ha utilizado antes algún tipo de radar de subsuelo o tecnología GPR?

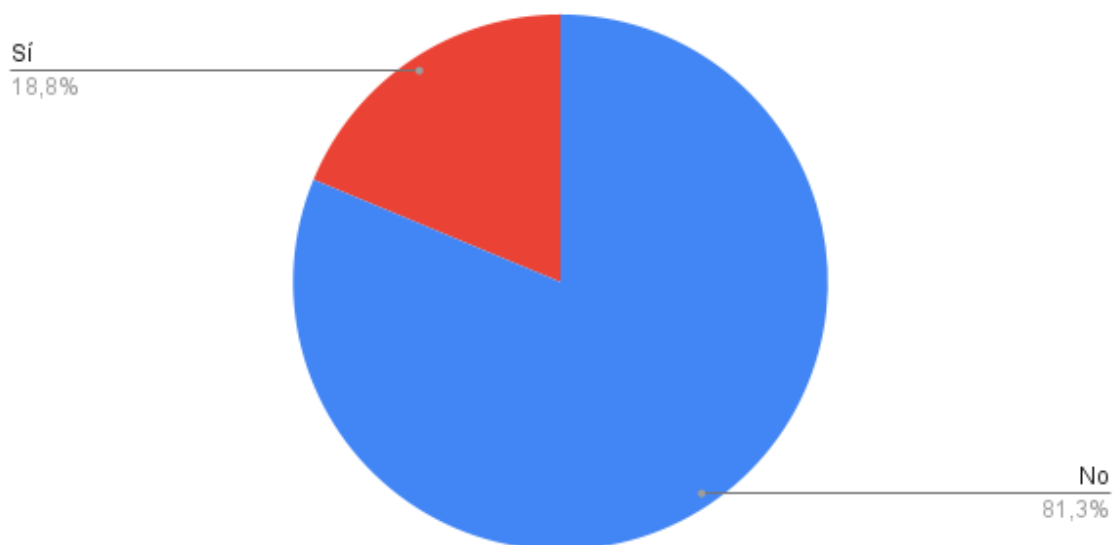


Figura IV.13: Resultados pregunta 3 encuesta.

4. ¿Consideraría útil una herramienta como esta en su campo de trabajo?

¿Consideraría útil una herramienta como esta en su campo de trabajo?

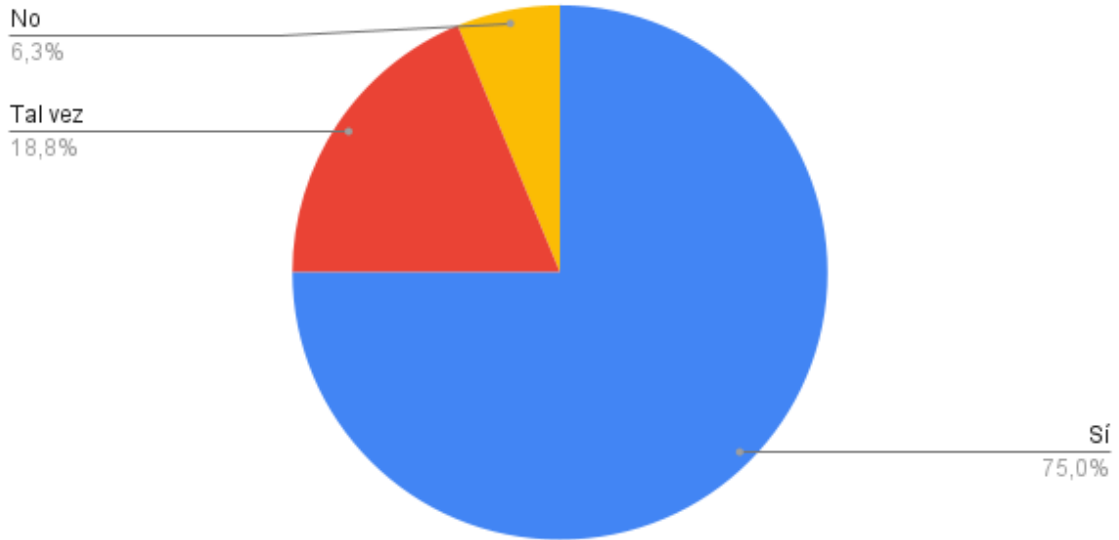


Figura IV.14: Resultados pregunta 4 encuesta.

5. ¿Usaría este sistema si estuviera disponible a un costo accesible?

Recuento de ¿Usaría este sistema si estuviera disponible a un costo accesible?

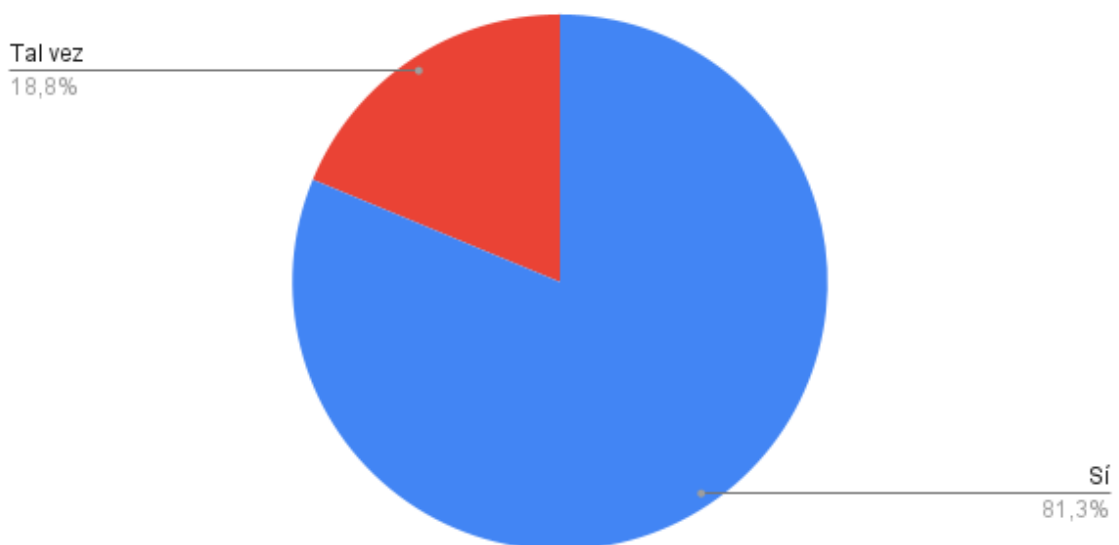


Figura IV.15: Resultados pregunta 5 encuesta.

6. ¿Qué factores considera importantes para el uso de esta herramienta?

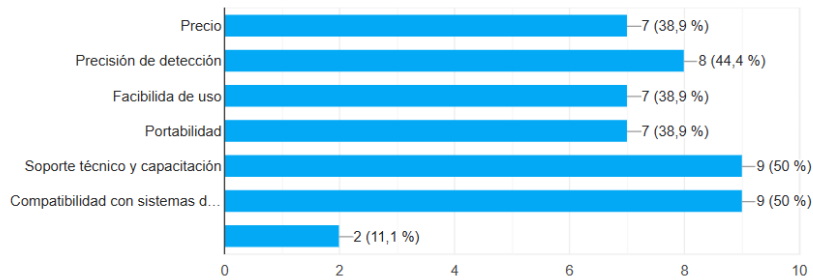


Figura IV.16: Resultados pregunta 6 encuesta.

7. En un futuro, ¿le interesaría recibir más información o participar en pruebas del sistema?

Recuento de En un futuro ¿Le interesaría recibir más información o participar en pruebas del sistema?

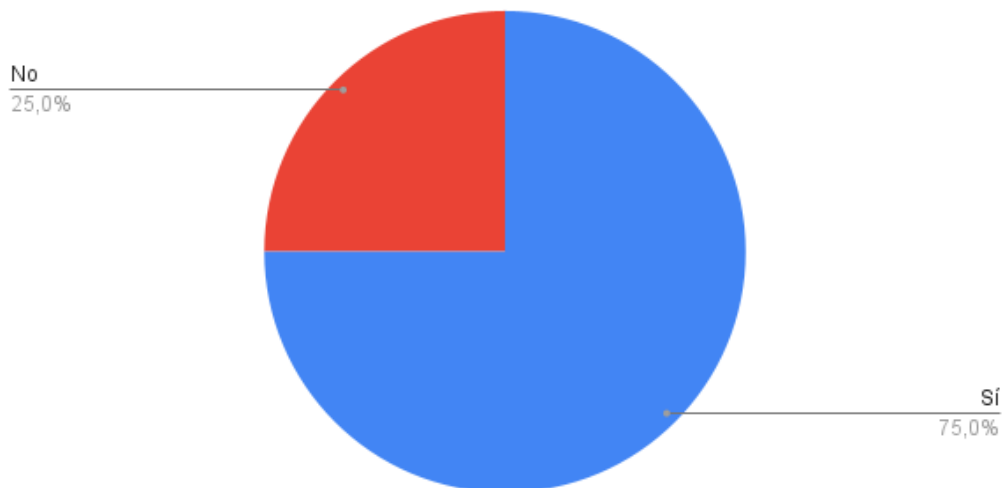


Figura IV.17: Resultados pregunta 7 encuesta.

#### 4.1.5. La invención tecnología debe funcionar a nivel de laboratorio

##### Caracterización de Medios de Transmisión

En esta sección se presenta una prueba clave en el desarrollo de este proyecto, ya que nos permitirá saber la potencia de nuestro subsistema de transmisión y recepción a través de distintos medios con características dieléctricas diferentes. Para esto, se empieza primero realizando una prueba en la que se observa la potencia del sistema

a través del espacio libre, la cual la llamaremos  $P_{ref}$  que es igual a  $-43.14$  y se puede observar en la Figura IV.18.

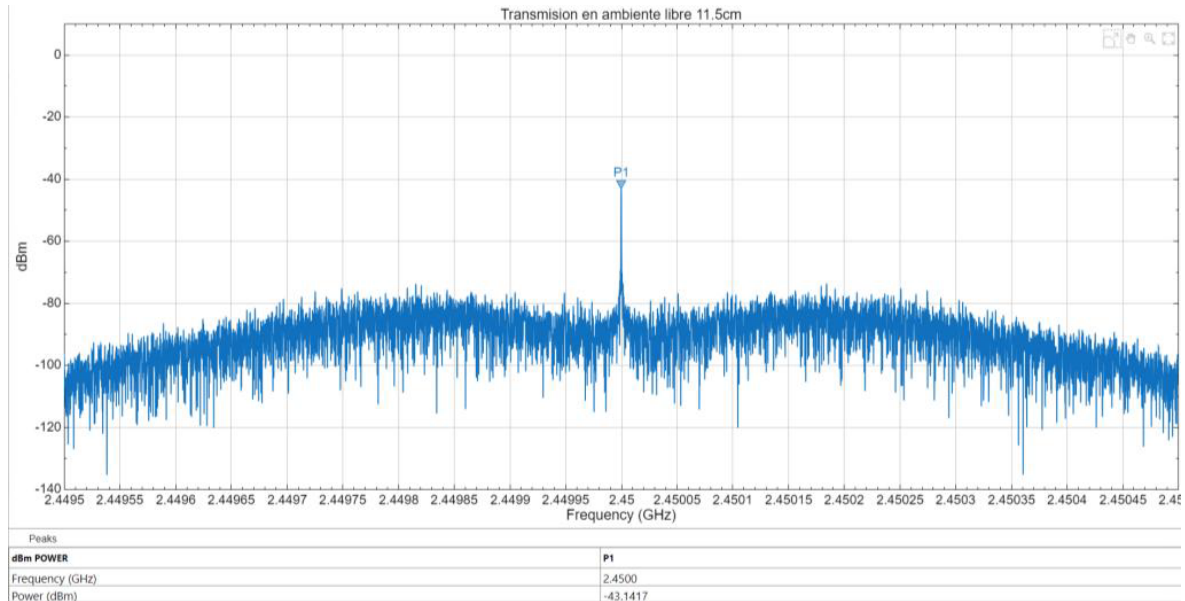


Figura IV.18: Espectro obtenido al medir en el espacio libre (Pref).

A continuación, se midió la potencia de la señal al atravesar las muestras de arena. La Tabla IV.4 resume los resultados numéricos, donde la atenuación se calcula como la diferencia entre la referencia y la potencia medida  $Atenuacion = P_{ref} - P_{media}$ .

Tabla IV.4: Medición de potencia y atenuación para distintos tipos de arena.

Material	Espesor (cm)	Potencia Media Medida (dBm)	Desv. Estándar (dB)	Atenuación Calculada (dB)
Arena de Fundición	11.5	-49.61	2.04	6.47
	10	-44.54	1.45	1.40
	8.5	-48.52	1.06	5.38
	7	-50.59	0.63	7.45
	5.5	-50.24	2.07	7.10
Arena de Playa	11.5	-50.46	1.12	7.32
	10	-54.47	1.59	11.33
	8.5	-53.90	3.32	10.76
	7	-54.35	2.24	11.21
	5.5	-56.53	2.26	13.39

Para una mayor comprensión de los resultados obtenidos, se realizó una representación gráfica, ilustrada en la Figura IV.19 con el objetivo de analizar la tendencia que

sigue la atenuación de la señal con respecto a los distintos niveles de espesor con cada material. se pueden rescatar las siguientes características:

- a) **Tendencia no lineal:** La atenuación no muestra una relación directamente proporcional con el espesor. Se observan fluctuaciones, como la notable disminución de la atenuación para la arena de fundición en el espesor de 10 cm, donde se registró el valor mínimo de 1.40 dB.
- b) **Diferencia entre materiales:** Se manifiesta una tendencia clara donde la arena de playa produce una atenuación consistentemente mayor que la arena de fundición. La atenuación para la arena de playa osciló entre 7.32 dB y 13.39 dB, mientras que para la arena de fundición se mantuvo en un rango más bajo, entre 1.40 dB y 7.45 dB.

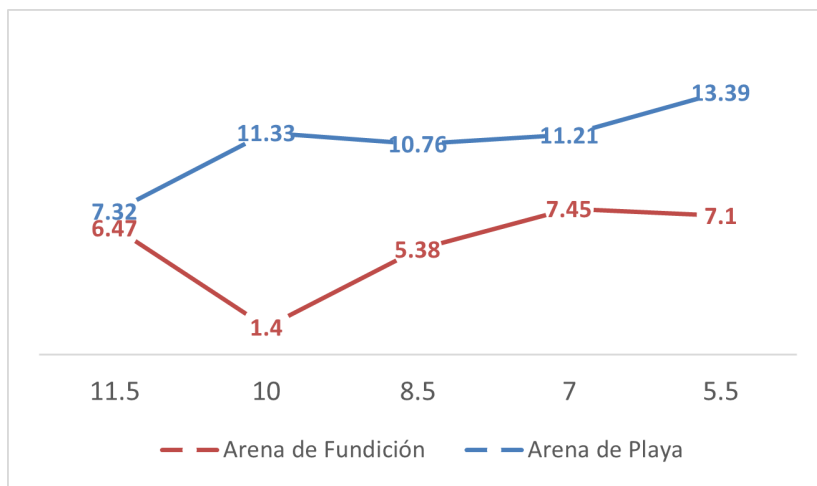


Figura IV.19: Línea de tendencia basadas en las mediciones de atenuación calculada obtenidas en la Tabla IV.4.

### Evaluación de Desempeño del Prototipo de Georradar a nivel de laboratorio

1. **Pruebas con tierra seca:** El protocolo experimental incluyó cuatro condiciones de referencia y contraste: (i) suelo sin objeto (línea base), (ii) placa de cobre, (iii) varilla de acero de  $\varnothing$  2 cm y (iv) hueso de cerdo. Para las tres últimas, se variaron las profundidades de entierro con el objetivo de cuantificar la efectividad de detección en función del material y la distancia al transceptor. La evaluación se centra en métricas clásicas de GPR: amplitud de los ecos en el dominio del tiempo (A-scan), tiempo de vuelo estimado, potencia de canal y densidad espectral de potencia (incluyendo espectrogramas de potencia).

Los resultados se presentan en el siguiente orden: primero, la respuesta del medio sin blancos (caracterización de clutter y fugas); segundo, la comparación

material-dependiente para blancos metálicos y biológicos a distintas profundidades; y, finalmente, un análisis de sensibilidad que relaciona profundidad, material y variación de potencia y tiempo de vuelo. Cuando corresponde, se discuten limitaciones impuestas por la geometría confinada ( $30 \times 20 \times 15$  cm) y el espesor somero de suelo (8 cm), así como consideraciones prácticas para la operación off-ground a la frecuencia de trabajo.

Los resultados obtenidos al aplicar el modelo desarrollado con el subsistema de software y hardware se presentan a continuación, en los cuales se puede observar la potencia que alcanza en el canal dependiendo del objetivo a analizar. Para empezar, en la Figura IV.20, se observa la señal de referencia de un espectrograma obtenida al analizar el terreno sin objetivo, al igual que el análisis previo a esta sección se tomará en cuenta como la señal de referencia. Por lo tanto, se obtiene que  $P_{ref} = -75.46864$  dBm, este y los demás valores que se representarán en la Tabla IV.5 mostrada a continuación, que se obtuvieron luego de tomar un total de 10 muestras para cada variación de profundidad en cada material.

Tabla IV.5: Análisis completo de detección para diferentes objetos en tierra seca.

Objeto	Profundidad [cm]	Potencia media [dBm]	Atenuación [dB]	SNR [dB]
Placa de Cobre	0	-68.16	-7.30	36.84
	2	-72.18	-3.29	32.82
	4	-70.65	-4.82	34.35
	6	-71.79	-3.68	33.21
	8	-75.20	-0.27	29.80
Varilla de Acero	0	-71.04	-4.42	33.96
	2	-71.79	-3.68	33.21
	4	-72.97	-2.50	32.03
	6	-75.43	-0.04	29.57
	8	-77.12	1.65	27.88
Hueso de Cerdo	0	-70.40	-5.07	34.60
	2	-72.45	-3.02	32.55
	4	-74.74	-0.73	30.26
	6	-77.21	1.74	27.79
	8	-78.82	3.35	26.18

Con respecto a los objetos analizados, los resultados muestran que la potencia media en el canal disminuye con la profundidad para todos los blancos, con un rango total  $\approx 10$  dB entre los escenarios más y menos energéticos. La “atenuación

de canal” (respecto a la línea base) es más marcada a poca profundidad y se reduce al aumentar el enterramiento.

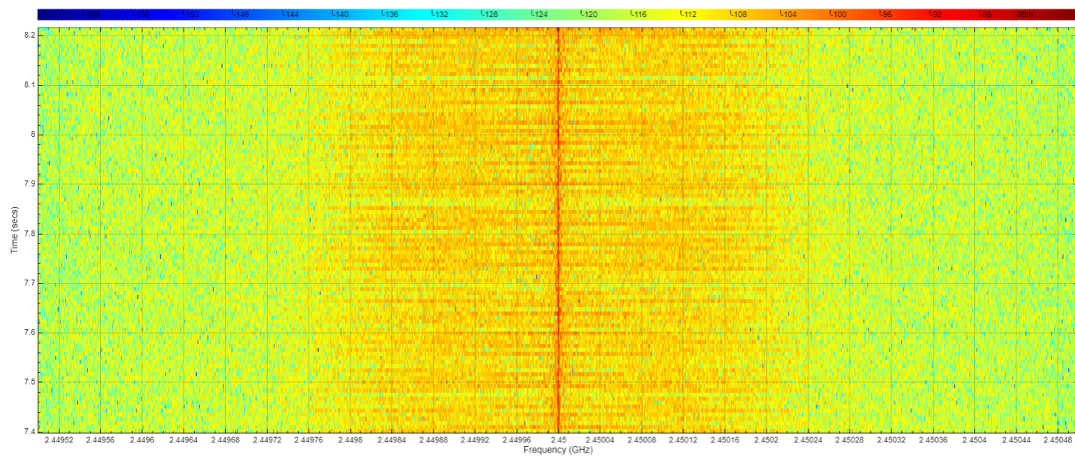


Figura IV.20: Espectrograma resultante de la señal de referencia (sin objetivo).

En cuanto a los blancos metálicos, la placa de cobre, con el espectro observado en la Figura IV.21, mantiene contraste apreciable hasta 6 cm ( $\approx -3.68$  dB). A 8 cm, el contraste cae ( $\approx -0.27$  dB), límite práctico del montaje con 8 cm de suelo. Mientras que en la varilla de acero  $\Phi 2$  cm, con el espectro que se observa en la figura IV.22, el contraste se atenúa más rápido por su menor sección efectiva y geometría alargada; es detectable con claridad hasta 4 cm ( $\approx -2.50$  dB) y se vuelve marginal a 6–8 cm ( $\approx 0$  a  $+1.61$  dB).

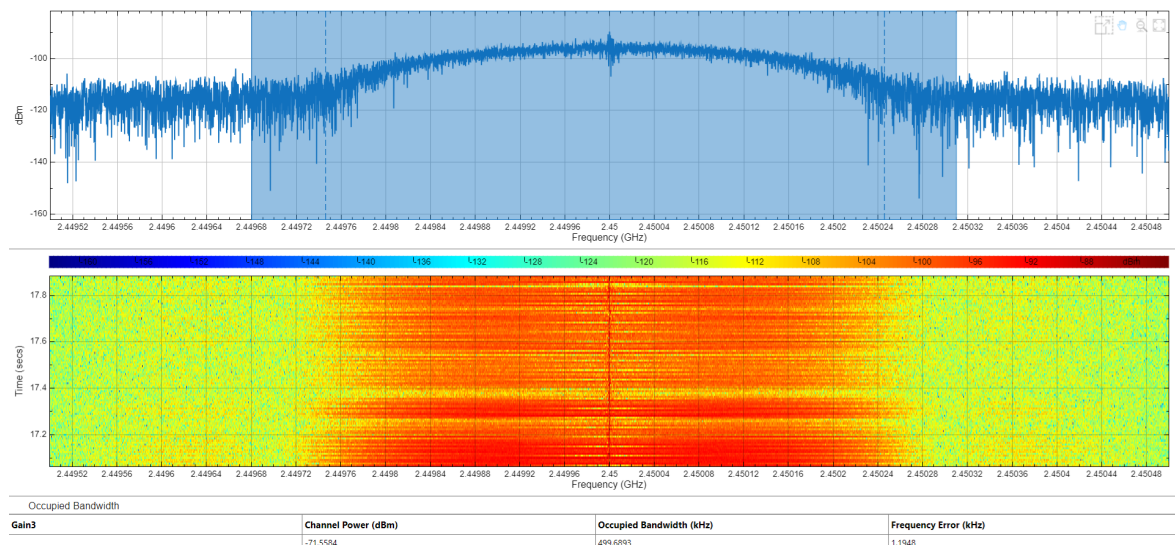


Figura IV.21: Espectrograma y espectro de frecuencia resultante de la señal con una placa de cobre.

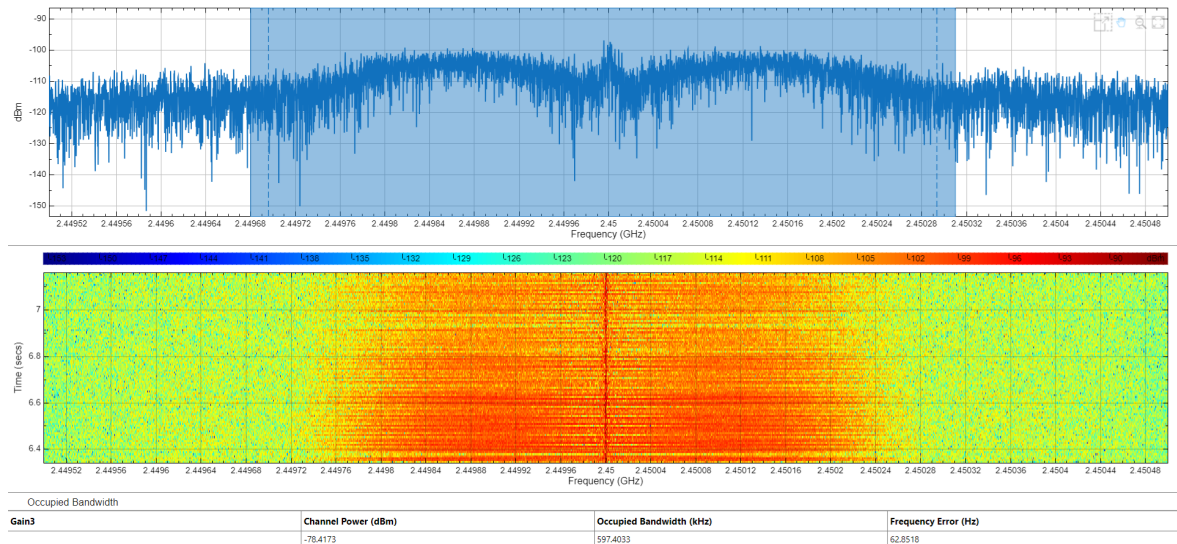


Figura IV.22: Espectrograma y espectro de frecuencia resultante de la señal con una varilla de acero.

Haciendo referencia al objeto biológico analizado por el radar (Figura IV.23, se observa que el contraste dieléctrico frente al suelo es menor que el de los metales. A 2 cm aún se observa atenuación ( $\approx -3.02$  dB), pero a 4–6 cm el contraste cae a valores próximos a 0 o positivos (+1.61 dB a 6 cm), lo que indica detectabilidad limitada en frecuencia en este espesor de suelo.

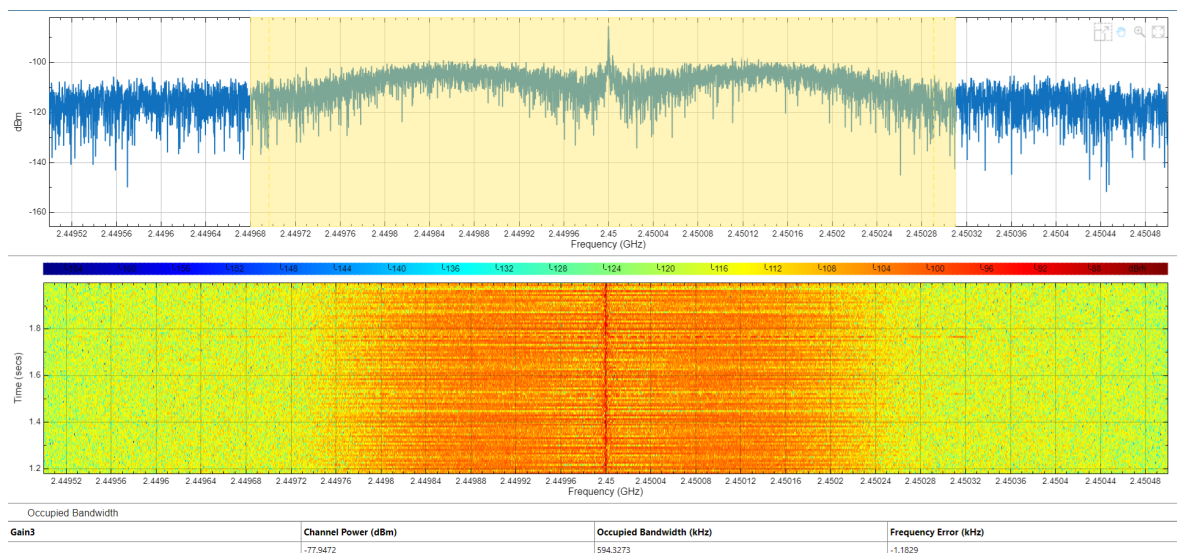


Figura IV.23: Espectrograma y espectro de frecuencia resultante de la señal con un objetivo biológico.

Basado en un análisis técnico de los experimentos realizados sobre tierra seca vistos en la Tabla IV.5 y los espectros de potencia observados de todos los ob-

jetos (Figuras: [IV.20](#),[IV.21](#),[IV.22](#) y [IV.23](#)), se revela una excelente sensibilidad del hardware con coeficientes SNR por encima de los 26 dB, es decir que la señal reflejada en los objetos es muy superior al ruido de piso generado por los canales.

2. **Pruebas en tierra húmeda:** A continuación, en la Tabla [IV.6](#), se detallan los datos obtenidos durante las pruebas de detección de un objetivo metálico (varilla de acero) enterrado en terreno húmedo. El objetivo de este análisis es caracterizar cómo las propiedades del suelo afectan la propagación de la señal. La tabla relaciona la profundidad del objeto con la potencia de la señal recibida por el sensor. Y para concluir con esta prueba también se obtiene el nivel de atenuación, métrica que ayuda a identificar el nivel de pérdida de energía al atravesar el terreno.

Tabla IV.6: Análisis completo de detección para una varilla de acero en tierra húmeda.

Objeto	Profundidad [cm]	Potencia de canal [dBm]	Atenuación [dB]	SNR [dB]
Varilla de Acero	0	-71.00	-4.46	34.00
	2	-72.26	-3.21	32.74
	4	-73.68	-1.79	31.32
	6	-75.02	-0.45	29.98
	8	-79.65	4.18	25.35

El resultado gráfico en un entorno de simulación se presenta en la Figura [IV.24](#), la cual refiere a la colocación de la varilla a una profundidad de 8cm en un terreno húmedo.

Este resultado lo podemos poner en contraste con lo observado en la Figura [IV.22](#), y de manera comparativa se puede concluir que ante terrenos húmedos la detección se ve limitada. Esta limitación se debe principalmente a la alta permitividad dieléctrica del agua presente en el suelo. El agua absorbe una cantidad significativa de la energía de las ondas electromagnéticas, dispersándola rápidamente por todo el medio, de manera que la onda transmisora ya no viaja enfocada verticalmente. En cuanto al comportamiento de la SNR, al principio con una profundidad nula, su coeficiente es elevado. Sin embargo al entrar en mayor profundidad la relación señal ruido se hace más pequeña, demostrando que en un terreno con mayor humedad la energía es absorbida por lo que no permite ejecutar efectivamente la transmisión y recepción.

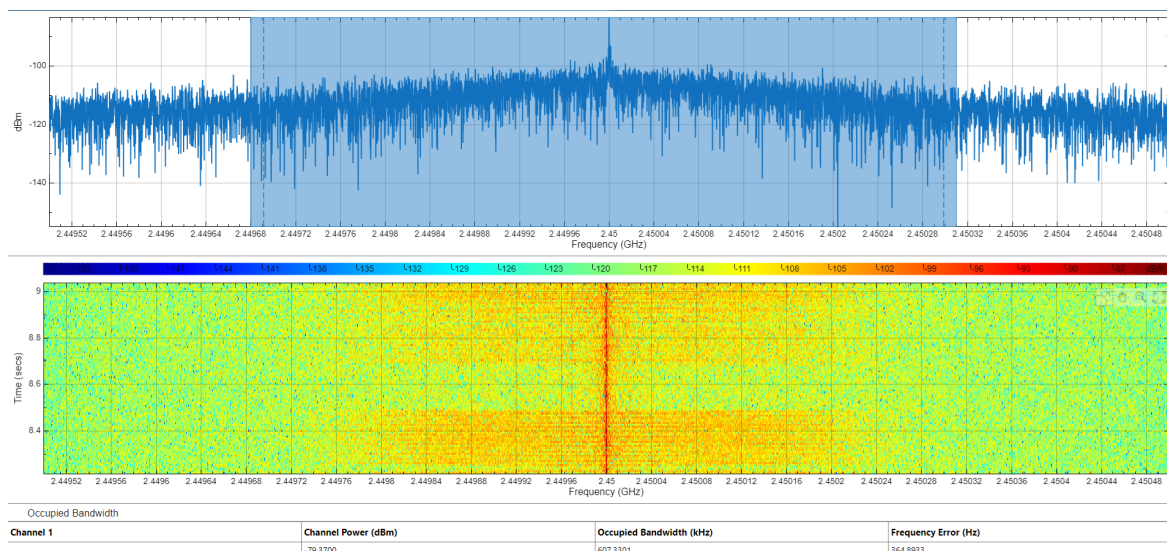


Figura IV.24: Espectrograma y espectro de frecuencia resultante de la señal con una varilla de acero en terreno húmedo.

#### 4.1.6. Identificar los riesgos tecnológicos de mercado y financieros con un plan de mitigación para los mismos

El análisis de riesgos presentado en la Tabla III.9 es importante para la validación del prototipo a nivel 4 de TRL. La identificación de riesgos y la formulación de planes de mitigación concretos cumplen con este requisito al demostrar que se ha alcanzado una comprensión integral del sistema y su entorno.

Los hallazgos clave de este análisis son:

##### Riesgos Tecnológicos Mitigados

Se identificaron desafíos técnicos específicos del prototipo en laboratorio, como la compatibilidad de hardware y el desgaste de componentes. Los planes de mitigación, que incluyen la selección de hardware compatible y el diseño de aislamientos dieléctricos, cuentan con soluciones. Esto valida la robustez del diseño del prototipo en su estado actual.

##### Riesgos de Mercado y Financieros Previstos

La inclusión de riesgos de mercado y financieros demuestra una madurez que trasciende el laboratorio. Al proponer planes como la creación de guías interactivas para facilitar la adopción, y la exploración de licencias institucionales o la migración a código abierto para reducir costos, se prueba que el prototipo no es solo un éxito técnico aislado, sino una tecnología con un plan para ser sostenible y adoptada en el futuro.

### 4.1.7. Actualizar el estudio de patentes nacionales e internacionales y responder si se cuenta con una estrategia de gestión de la propiedad intelectual

La Tabla IV.7 presenta las reivindicaciones que definen el alcance de la invención. Cada reivindicación describe una característica técnica esencial del prototipo, destacando los elementos que se diferencian con respecto al estado del arte.

Tabla IV.7: Tabla comparativa de tecnologías GPR.

Elemento / Criterio	Prototipo 2.45 GHz	GPR-SDR	PH1/2021/050604 (Filipinas)	US20250277444(E.E.UU)
<b>Tipo de radar</b>	Impulso directo (pulsed radar)	(pulsed)	FMCW (modulada en frecuencia)	Multiestático con mapeo profundo
<b>Frecuencia de operación</b>	2.45 GHz (banda ISM)		< 1 GHz (banda baja)	Frecuencias profundas / múltiples bandas
<b>Transceptor SDR</b>	AD9361 (ZedBoard FMC)		No especificado	No especificado
<b>Procesamiento</b>	MATLAB/Simulink + espectrograma 2D		CNN (convolutional neural network)	Interferometría radar + correlación espacial
<b>Antenas</b>	Parche microstrip rectangular		Bowtie	Matriz de múltiples antenas

La principal diferenciación y novedad del trabajo radica en la integración exitosa de un transceptor SDR comercial en la banda ISM de 2.45 GHz. Esto demuestra la viabilidad de construir un sistema GPR funcional y portátil utilizando componentes asequibles y técnicas de procesamiento consolidadas (MATLAB/Simulink). A diferencia de los sistemas de nivel industrial, este prototipo, validado a un TRL 4, no busca competir en máxima profundidad o resolución, sino democratizar el acceso a la tecnología GPR, ofreciendo una plataforma abierta y de bajo costo para la investigación, la enseñanza y el desarrollo rápido de nuevas aplicaciones.

## V. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en las distintas pruebas que se han venido realizando tanto dentro del módulo SDR, como fuera de el, usando instrumentos de medición externos, demuestra ser un sistema viable y eficiente para el objetivo de este proyecto en la implementación de un radar de penetración terrestre. La flexibilidad y facilidad en la configuración de los parámetros de frecuencia central, ganancia y tasa de muestreo, sin necesidad de realizar modificaciones a nivel de hardware. Además, los resultados obtenidos evidencian una excelente estabilidad espectral, una alta relación señal/ruido y una capacidad de respuesta dinámica amplia, incluso ante condiciones de atenuación severa o medios físicamente heterogéneos como la arena.

En cuanto al desarrollo de las antenas, se recomienda un espacio mínimo entre antenas transmisora y receptora para evitar interferencias electromagnéticas directas, ya que en el análisis de los parámetros scattering  $S_{11}$  para diferentes distancias entre antenas, se identificó que una separación de al menos 3 cm permite reducir el acoplamiento directo entre ellas, minimizando efectos de inducción mutua no deseada. Para distancias menores, como 0 o 1 cm, se observó un acoplamiento elevado, el cual puede inducir errores en la interpretación del sistema georradar.

En cuanto al análisis del patrón de radiación de las antenas diseñadas, demuestra una alta directividad en el eje normal, lo cual es favorable para el diseño de sistemas GPR por su geometría y focalización de la energía en dirección específica, ya que mejora la resolución vertical del sistema y reduce la captación de señales no deseadas fuera del eje principal.

Tomando en cuenta las mediciones realizadas bajo distintos niveles de atenuación, muestran que el sistema presenta una respuesta altamente lineal y estable. Incluso con una atenuación de hasta  $-50$  dB, la señal se mantiene claramente detectable, con una SNR superior a 40 dB. Esto evidencia un amplio margen dinámico del sistema, lo cual es crucial para aplicaciones GPR donde las señales reflejadas suelen debilitarse progresivamente con la profundidad. La linealidad también sugiere que el sistema puede ser calibrado con alta precisión para estimar niveles de reflexión o pérdidas en distintos materiales.

Las primeras pruebas realizadas en medios homogéneos, como la arena de fundición y la arena de playa, indican que el comportamiento de la atenuación en función del espesor o profundidad presenta una tendencia logarítmica, especialmente en los primeros centímetros, donde la pérdida de señal es más significativa. Este comportamiento sugiere que es posible modelar la atenuación para estimar la profundidad de objetos

enterrados.

Realizando un análisis con respecto a la señal de referencia, en la última columna de la Tabla IV.5 se observa que incluso con objeto a más profundidad rebasa el umbral de potencia de las mediciones realizadas sin objeto presente, esto se da debido a que las dimensiones de los objetos logran abarcar la onda que viaja desde la antena transmisora debido a las características dieléctricas del objeto; sin embargo, no logran regresar con la suficiente potencia hacia la antena receptora. En cuanto a la relación señal ruido, se puede observar que es lo suficientemente elevada como para poder interpretar de manera efectiva la señal con el prototipo desarrollado.

Al realizar una prueba comparativa de comportamiento usando una varilla de acero en un terreno con mayor presencia de humedad (Tabla IV.6, podemos ver que la detección se ve limitada, ya que la relación directamente proporcional que existe entre el aumento de la humedad y las propiedades dieléctricas del medio.

En el entorno controlado y con 8 cm de suelo, el prototipo GPR discrimina con solidez blancos metálicos y muestra capacidad de detección para blancos de bajo contraste dieléctrico (hueso). El desempeño observado es coherente con la banda de operación, la configuración off-ground y las dimensiones del medio de prueba; mejorar la profundidad útil requerirá incrementar SNR (promedio/ventana) y/o aumentar el espesor de suelo para mitigar reflexiones del fondo, así como optimizar la geometría de antenas y el apantallamiento del acoplo directo.

## 5.1. Trabajos Futuros

El avance logrado en laboratorio (TRL-4) habilita una transición ordenada hacia validación en campo. Primero, se propone alcanzar TRL-5 mediante ensayos en un entorno relevante controlado, con mejoras de robustez mecánica y eléctrica (gabinete sellado, filtrado en DC, baterías con BMS), disparo y temporización comunes para Rx/Tx, y registro confiable de metadatos. Posteriormente, se buscará TRL-6 con una demostración en campo que integre un rig de escaneo con posicionamiento y una interfaz gráfica en tiempo real para B-scans y espectrograma de potencia.

Se pretende caracterizar la funcionalidad del sistema de georradar con distintos grados de humedad, con el objetivo de realizar una tabla comparativa de la atenuación de canal con respecto a los distintos grados de humedad. Los niveles de humedad se medirán con un instrumento dedicado a esta funcionalidad.

Para endurecer el prototipo de cara al despliegue, se espera diseñar un encapsulado resistente a intemperie y blindaje interno; un esquema de trigger y timestamp compartidos a nivel FPGA/GPIO; y una política de datos que escriba directamente a SSD con metadatos.

El protocolo de validación en campo incluirá escenarios sin blanco y con blancos

metálicos y dieléctricos a profundidades escalonadas y distintos niveles de humedad, variando la altura de la antena. Se medirán amplitud pico, tiempo de vuelo, potencia de canal, densidad espectral y SNR, con análisis de repetibilidad.

Aprovechando el SDR, se instrumentarán herramientas complementarias: una reflectometría tipo VNA-lite ( $S_{11}/S_{21}$  con acoplador) para caracterizar suelos y antenas; un monitoreo rápido del entorno RF previo al despliegue; y un sensor de humedad del suelo por microondas basado en variaciones de  $S_{11}/S_{21}$ .



## VI. Lista de Nomenclatura

---

<b>Siglas</b>	<b>Significado</b>
<b>CAGR</b>	Compound Annual Growth Rate
<b>DSP</b>	Digital Signal Processing
<b>DSSS</b>	Direct Sequence Spread Spectrum
<b>FMC</b>	FPGA Mezzanine Card
<b>FPGA</b>	Field-Programmable Gate Array
<b>GPR</b>	Ground Penetrating Radar
<b>LO</b>	Local Oscillator
<b>LPC</b>	Low Pin Count
<b>RF</b>	Radio Frecuencia
<b>RTK</b>	Real Time Kinematic
<b>SDR</b>	Software Defined Radio
<b>SFCW</b>	Stepped Frequency Continuous Wave
<b>SWW</b>	Synthetic Wideband Wave
<b>TRL</b>	Technology Readiness Levels
<b>YOLO</b>	You Only Look Once

---



# Referencias

- [1] *How Ground Penetrating Radar Works | GPRS*, en. visitado 16 de abr. de 2024. dirección: <https://www.gp-radar.com/article/how-ground-penetrating-radar-works-2>.
- [2] Ç. Balkaya, Y. L. Ekinçi, O. Çakmak, M. Blömer, J. Arnkens y M. A. Kaya, “A challenging archaeo-geophysical exploration through GPR and ERT surveys on the Keber Tepe, City Hill of Doliche, Commagene (Gaziantep, SE Turkey),” en, *Journal of Applied Geophysics*, vol. 186, pág. 104272, mar. de 2021, ISSN: 09269851. DOI: [10.1016/j.jappgeo.2021.104272](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104272). visitado 15 de abr. de 2024. dirección: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926985121000197>.
- [3] L. Lijcklama À Nijeholt et al., “Utilizing Drone-Based Ground-Penetrating Radar for Crime Investigations in Localizing and Identifying Clandestine Graves,” en, *Sensors*, vol. 23, n.º 16, pág. 7119, ago. de 2023, ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s23167119](https://doi.org/10.3390/s23167119). visitado 15 de abr. de 2024. dirección: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/16/7119>.
- [4] K. C. P. L. d. Castro, L. S. d. Cunha, A. C. d. A. Sousa, P. V. Nogueira y W. R. Borges, “Influence of the sand-clay ratio of the burial material of forensic targets on ground-penetrating radar (GPR) responses—comparison of dry and rainy season data,” English, *Frontiers in Earth Science*, vol. 12, mar. de 2024, Publisher: Frontiers, ISSN: 2296-6463. DOI: [10.3389/feart.2024.1305496](https://doi.org/10.3389/feart.2024.1305496). visitado 15 de abr. de 2024. dirección: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2024.1305496>.
- [5] M. Solla, V. Pérez-Gracia y S. Fontul, “A Review of GPR Application on Transport Infrastructures: Troubleshooting and Best Practices,” en, *Remote Sensing*, vol. 13, n.º 4, pág. 672, feb. de 2021, ISSN: 2072-4292. DOI: [10.3390/rs13040672](https://doi.org/10.3390/rs13040672). visitado 15 de abr. de 2024. dirección: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/4/672>.
- [6] *Ground Penetrating Radar Market Revenue Trends and Growth Drivers | MarketsandMarkets™*. visitado 11 de abr. de 2024. dirección: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/ground-penetrating-radar-market-74332617.html>.
- [7] S. Li et al., “Detection of concealed cracks from ground penetrating radar images based on deep learning algorithm,” en, *Construction and Building Materials*, vol. 273, pág. 121949, mar. de 2021, ISSN: 09500618. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2021.121949](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.121949).

- [conbuildmat.2020.121949](https://conbuildmat.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820339532). visitado 15 de abr. de 2024. dirección: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820339532>.
- [8] P. Jiang, D. Ergu, F. Liu, Y. Cai y B. Ma, “A Review of Yolo Algorithm Developments,” en, *Procedia Computer Science*, vol. 199, págs. 1066-1073, 2022, ISSN: 18770509. DOI: [10.1016/j.procs.2022.01.135](https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.135). visitado 16 de abr. de 2024. dirección: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050922001363>.
- [9] *Los hallazgos arqueológicos más relevantes de 2023 en México*, es-MX. visitado 11 de abr. de 2024. dirección: <https://www.eleconomista.com.mx/arteseideas/Los-hallazgos-arqueologicos-mas-relevantes-de-2023-en-Mexico-20231231-0020.html>.
- [10] *Mapa de hallazgos de fosas clandestinas*. visitado 11 de abr. de 2024. dirección: <https://hallazgosfosasclandestinas.segob.gob.mx/>.
- [11] H. Liu, X. Huang, F. Han, J. Cui, B. F. Spencer y X. Xie, “Hybrid Polarimetric GPR Calibration and Elongated Object Orientation Estimation,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 12, n.º 7, págs. 2080-2087, jul. de 2019, ISSN: 1939-1404, 2151-1535. DOI: [10.1109/JSTARS.2019.2912339](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2912339). visitado 15 de abr. de 2024. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8718348/>.
- [12] *Cost To Rent Or Buy Utility Locating Equipment | GPRS*, en. visitado 11 de abr. de 2024. dirección: <https://www.gp-radar.com/article/cost-to-rent-or-buy-utility-locating-equipment>.
- [13] K. N. Olan Nuñez, “Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para Aplicaciones del Internet de las Cosas,” es-MX, Tesis doct., INAOE, Santa María Tonantzintla, Puebla, ago. de 2019. dirección: <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/1793/1/OlanNKN.pdf>.
- [14] M. Paun, “Software-defined ground penetrating chirp radar,” en *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies X*, M. Vladescu, I. Cristea y R. D. Tamas, eds., Online Only, Romania: SPIE, dic. de 2020, pág. 13, ISBN: 978-1-5106-4271-3 978-1-5106-4272-0. DOI: [10.1117/12.2570387](https://doi.org/10.1117/12.2570387). visitado 15 de abr. de 2024. dirección: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11718/2570387/Software-defined-ground-penetrating-chirp-radar/10.1117/12.2570387.full>.
- [15] Y. Zhang, D. Huston y T. Xia, “Signal Calibration and Noise Reduction for Software-Defined Radio-Based GPR,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, págs. 1-10, 2023, ISSN: 0018-9456, 1557-9662. DOI:

- 10.1109/TIM.2022.3229719. visitado 15 de abr. de 2024. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9989397/>.
- [16] *AD-FMCOMMS2-EBZ Evaluation Board | Analog Devices*, en. visitado 11 de abr. de 2024. dirección: <https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-ad-fmcomms2.html#eb-overview>.
- [17] L. Popa, *AD-FMCOMMS2/3/4/5-EBZ Zynq and ZED Quick Start Guide [Analog Devices Wiki]*, en, Wiki, jun. de 2021. visitado 16 de abr. de 2024. dirección: <https://wiki.analog.com/resources/eval/user-guides/ad-fmcomms2-ebz/quickstart/zynq>.
- [18] P. KOPECKÝ, “Estudio de georradar de localidades seleccionadas en Říčany,” Checo, Tesis doct., UNIVERSIDAD TÉCNICA CHECA EN PRAGA, Praga, Republica Checa, mayo de 2016. visitado 2 de jun. de 2024. dirección: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66415/F1-DP-2016-Kopecky-Pavel-georadarovy\\_pruzkum.pdf?sequence=-1](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66415/F1-DP-2016-Kopecky-Pavel-georadarovy_pruzkum.pdf?sequence=-1).
- [19] H. M. Jol, *Ground penetrating radar: theory and applications*, eng, 1st ed. Amsterdam, Netherlands Oxford, UK: Elsevier Science, 2009, ISBN: 978-0-444-53348-7.
- [20] J. C. Cook, “Proposed monocycle-pulse very-high-frequency radar for air-borne ice and snow measurement,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*, vol. 79, n.º 5, págs. 588-594, nov. de 1960, ISSN: 0097-2452, 2379-674X. DOI: 10.1109/TCE.1960.6367316. visitado 3 de jun. de 2024. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6367316/>.
- [21] S. Prager, M. Moghaddam y J. Stang, “SOFTWARE DEFINED RADAR,” English, 20 220 120 851, abr. de 2022. visitado 3 de jun. de 2024.
- [22] S. CHOI, J. KIM, C. AHN y H. YANG, “Dispositivo terminal de radio de definición por software de antena inteligente y procedimiento para distribuir e instalar una aplicación de terminal de radio de definición por software,” 2 746 900, mar. de 2020. visitado 3 de jun. de 2024.
- [23] S. Shope, “SURFACE PENETRATING RADAR SYSTEM AND TARGET ZONE INVESTIGATION METHODOLOGY,” English, 20 120 249 356, oct. de 2012. visitado 3 de jun. de 2024.
- [24] C. Davis, M. Maher, J. Bordes P, M. Hegde, O. Schmid y R. Rao, “SOFTWARE DEFINED AUTOMOTIVE RADAR SYSTEMS,” English, 20 190 094 353, mar. de 2019.

- [25] R. Persico, *Introduction to ground penetrating radar: inverse scattering and data processing*, eng. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014, ISBN: 978-1-118-30500-3.
- [26] *Georadar*, en-GB. visitado 6 de nov. de 2024. dirección: <https://artemiseng.gr/services/georadar/>.
- [27] T. F. Collins, R. Getz, D. Pu y A. M. Wyglinski, *Software-defined radio for engineers*, eng. Norwood, MA: Artech House, 2018, OCLC: 1039927183, ISBN: 978-1-63081-459-5.
- [28] *Interference Hunting Application Note - How To*, ja-JP. visitado 6 de nov. de 2024. dirección: <https://www.tek.com/ja/documents/application-note/interference-hunting-application-note>.
- [29] *Understanding RF Spectrograms and Spectrogram Types*, English, feb. de 2022. visitado 5 de jun. de 2024. dirección: <https://www.tek.com/en/documents/technical-brief/understanding-rf-spectrograms-and-spectrogram-types>.
- [30] *Spectrogram Types: The Many Faces of the Spectrogram - element14 Community*, en, mar. de 2024. visitado 6 de nov. de 2024. dirección: <https://community.element14.com/products/manufacturers/tektronix/b/blog/posts/spectrogram-types-the-many-faces-of-the-spectrogram>.
- [31] *¿Qué es una Antena? Tipos - Funcionamiento y Aplicaciones*. visitado 6 de nov. de 2024. dirección: <https://ielectel.com/que-es-una-antena-tipos-funcionamiento-y-aplicaciones/>.
- [32] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2005, ISBN: 978-0-471-66782-7.
- [33] M. Therase, *Antenna Fundamentals and Wire Antennas*, English, Jeppiaar Nagar, India, 2021. dirección: <https://sathyabama.cognibot.in/course/info.php?id=1662>.
- [34] F. E. Asimbaya Pozo y C. S. Campaña López, *Diseño de una antena de apertura con polarizador para la banda de onda milimétrica*, mar. de 2020.
- [35] G. Washington, "Smart aperture antennas," *Smart Materials and Structures*, vol. 5, n.º 6, págs. 801-805, dic. de 1996, ISSN: 0964-1726, 1361-665X. DOI: [10.1088/0964-1726/5/6/010](https://doi.org/10.1088/0964-1726/5/6/010). visitado 6 de nov. de 2024. dirección: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/5/6/010>.
- [36] T. Latha, G. Ram, G. A. Kumar y M. Chakravarthy, "Review on Ultra-Wideband Phased Array Antennas," *IEEE Access*, vol. 9, págs. 129 742-129 755, 2021, ISSN: 2169-3536. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3114344](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3114344). visitado 5 de nov. de 2024. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9541342/>.

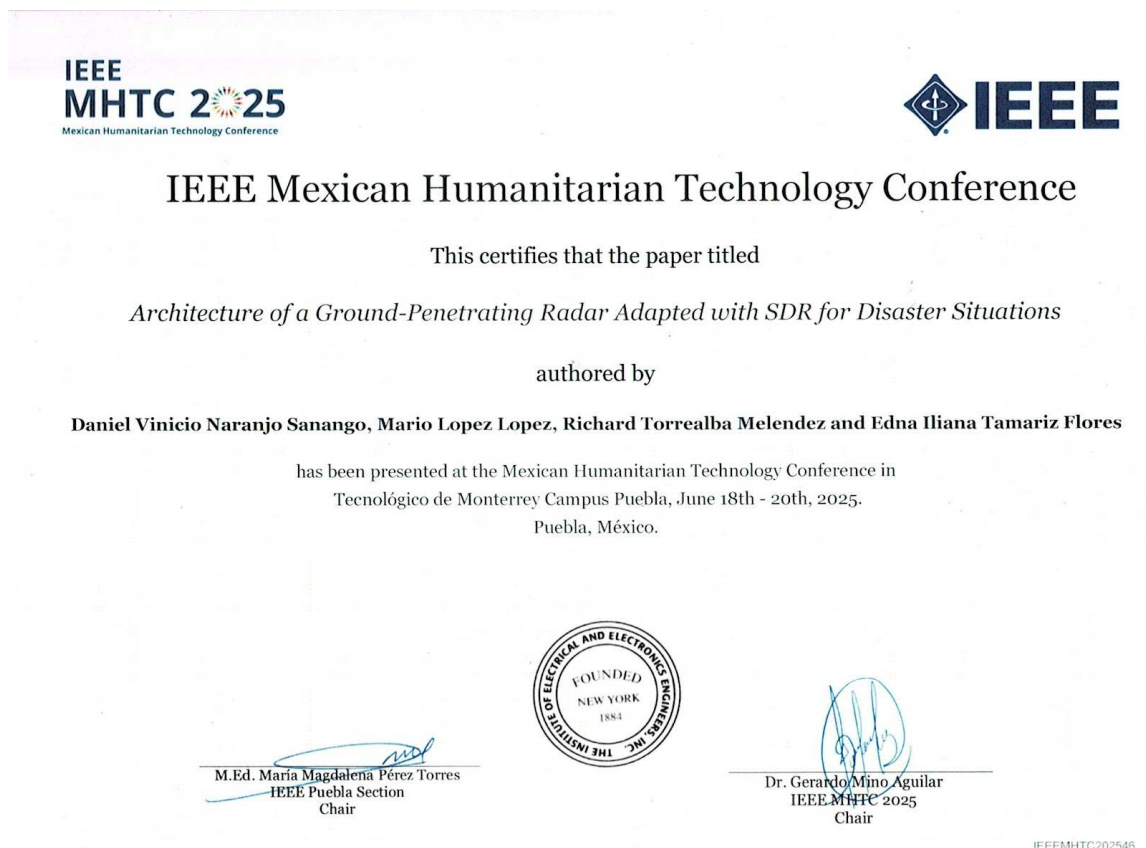
- [37] VLA, es-ES. visitado 6 de nov. de 2024. dirección: <https://nrao.cl/acerca-de-nosotros/vla/>.
- [38] M. Sohel Rana, S. Hossain, S. Biswas Rana y M. Mostafizur Rahman, “Microstrip patch antennas for various applications: a review,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 29, n.º 3, pág. 1511, mar. de 2023, ISSN: 2502-4760, 2502-4752. DOI: [10.11591/ijeecs.v29.i3.pp1511-1519](https://doi.org/10.11591/ijeecs.v29.i3.pp1511-1519). visitado 5 de nov. de 2024. dirección: <https://ijeecs.iaescore.com/index.php/IJECS/article/view/29620>.
- [39] D.-I. ( C. Wolff, *Universal Block Diagram of Pulse Radar - Radartutorial*, en, Publisher: Dipl.-Ing. (FH) Christian Wolff. visitado 12 de sep. de 2025. dirección: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/rb67.en.html>.
- [40] *What are I/Q Signals? - everything RF*. visitado 12 de sep. de 2025. dirección: <https://www.everythingrf.com/community/what-are-i-q-signals>.
- [41] *I/Q Modulation - NI*, en. visitado 12 de sep. de 2025. dirección: <https://www.ni.com/docs>.
- [42] OLLI MYLLÄRI, “DIGITAL TRANSMITTERI/QCALIBRATION:ALGORITHMS AND REAL-TIME PROTOTYPE IMPLEMENTATION,” English, Tesis doct., TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Finlandia, mayo de 2010. dirección: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/6690/myllari.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
- [43] M. Valkama y M. Renfors, “Advanced receiver architectures and I/Q signal processing,” en *First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004.*, Hammamet, Tunisia: IEEE, 2004, págs. 71-74, ISBN: 978-0-7803-8379-1. DOI: [10.1109/ISCCSP.2004.1296221](https://doi.org/10.1109/ISCCSP.2004.1296221). visitado 12 de sep. de 2025. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1296221/>.
- [44] *AN-1039: Correcting Imperfections in IQ Modulators to Improve RF Signal Fidelity | Analog Devices*. visitado 12 de sep. de 2025. dirección: <https://www.analog.com/en/resources/app-notes/an-1039.html>.
- [45] R. bibinitperiod S. International, *Entendiendo los parámetros-S*, es-419. visitado 8 de mayo de 2025. dirección: [https://www.rohde-schwarz.com/lat/productos/prueba-y-medicion/essentials-test-equipment/spectrum-analyzers/entendiendo-los-parametros-s\\_257831.html](https://www.rohde-schwarz.com/lat/productos/prueba-y-medicion/essentials-test-equipment/spectrum-analyzers/entendiendo-los-parametros-s_257831.html).

- [46] S. Lambot, E. Slob, I. van den Bosch, B. Stockbroeckx, B. Scheers y M. Vanclooster, “GPR design and modeling for identifying the shallow subsurface dielectric properties,” en *2nd International Workshop on Advanced GPR*, Delft, The Netherlands, 2003.
- [47] *Sistemas de gestión de la calidad — Requisitos*, ver. Quinta edición, Ginebra, Suiza, 2015. dirección: <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/20/62085.html>.
- [48] *Aceptabilidad de Ensamblados Electrónicos*, ver. Revisión E, Bannockburn, Illinois, abr. de 2010.
- [49] *Requisitos de Ensamblados Eléctricos y Electrónicos Soldados*, ver. Revisión E, Bannockburn, IL, abr. de 2010.
- [50] *Productos eléctricos-Especificaciones de seguridad*, México, D.F., 2014.
- [51] *Compatibilidad electromagnética (EMC)-Parte 4-6: Técnicas de prueba y medición-Inmunidad a las perturbaciones conducidas, inducidas por campos de radio frecuencia*, Ciudad de México, 2018.
- [52] *Especificaciones técnicas de los equipos transmisores destinados al servicio móvil de radiocomunicación especializada de flotillas*, Ciudad de México, 2018. dirección: <http://www.ift.org.mx/tramites>.
- [53] *Generic Standard on Printed Board Design*, ver. Revisión A (Supersedes IPC-2221 February 1998), Northbrook, IL, mayo de 2003. dirección: [www.ipc.org](http://www.ipc.org).
- [54] *Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - Quality model overview and usage*. Ver. First edition. Ginebra, Suiza, mar. de 2024. dirección: [www.iso.org](http://www.iso.org).
- [55] *IEEE Standard for Software and System Test Documentation*, 18 de jul. de 2008. dirección: <https://standards.ieee.org/ieee/829/3787/>.
- [56] *Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - Quality evaluation framework*, ver. 2, sep. de 2024.
- [57] *IEEE Standard for Software Reviews and Audits*, ver. 2008, ISBN: 9780738157689, 15 de ago. de 2008. DOI: [10.1109/IEEESTD.2008.4601584](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2008.4601584). visitado 8 de oct. de 2025. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4601584/>.

# A. Anexos

## 1.1. Desarrollo de artículo científico

- Se presento un artículo científico en la IEEE MHTC 2025 MEXICAN HUMANITARIAN TECHNOLOGY CONFERENCE.



- Se desarrollo un artículo científico el cual fue aceptado para la conferencia SOMI ICAT 38



---

## Resultado de arbitraje. SOMI XXXVIII Congreso de Instrumentación

---

**Desde** Notificación ICAT <noreply@icat.unam.mx>

**Fecha** Lun 30/06/2025 14:47

**Para** DANIEL VINICIO NARANJO SANANGO <ns223470455@alm.buap.mx>

Estimado(a): Daniel Vinicio Naranjo Sanango

Me permito informarle que como resultado del proceso de arbitraje llevado a cabo por el Comité Científico-Técnico del SOMI XXXVIII Congreso de Instrumentación, el trabajo cuyo título es "RADAR BI-ESTÁTICO CON BASE EN UN RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE PARA ANALIZAR ATENUACIONES EN DIFERENTES TIPOS DE SUBSUELOS A 2.45 GHZ", ha sido aceptado con algunos comentarios, los cuales se presentan al final de este mensaje.

El día y la hora de su presentación se podrán consultar próximamente en nuestro sitio Web. Las instrucciones para el envío del trabajo en extenso están disponibles en nuestro sitio web.

Cualquier duda puede consultarnos, escribiendo a la dirección [somi@icat.unam.mx](mailto:somi@icat.unam.mx).

Le envía un cordial saludo, el Comité Científico-Técnico de SOMI XXXVIII Congreso de Instrumentación.

Comentarios:

El resumen sometido presenta una contribución significativa al campo de la instrumentación electrónica al desarrollar una plataforma experimental de radar bi-estático basada en radio definido por software (SDR) para analizar atenuaciones en distintos tipos de subsuelos a 2.45 GHz. La integración de un sistema SDR con antenas de microcinta y procesamiento en MATLAB/SIMULINK demuestra una solución versátil, reconfigurable y de bajo costo para la caracterización electromagnética de medios dieléctricos. Esta propuesta valida el potencial del SDR en aplicaciones GPR y abre nuevas posibilidades en el diseño de sensores activos aplicables a diversas áreas del conocimiento. La propuesta metodológica y el enfoque experimental de los subsistemas descritos justifican su aceptación, al aportar avances concretos en la instrumentación aplicada a medios complejos.

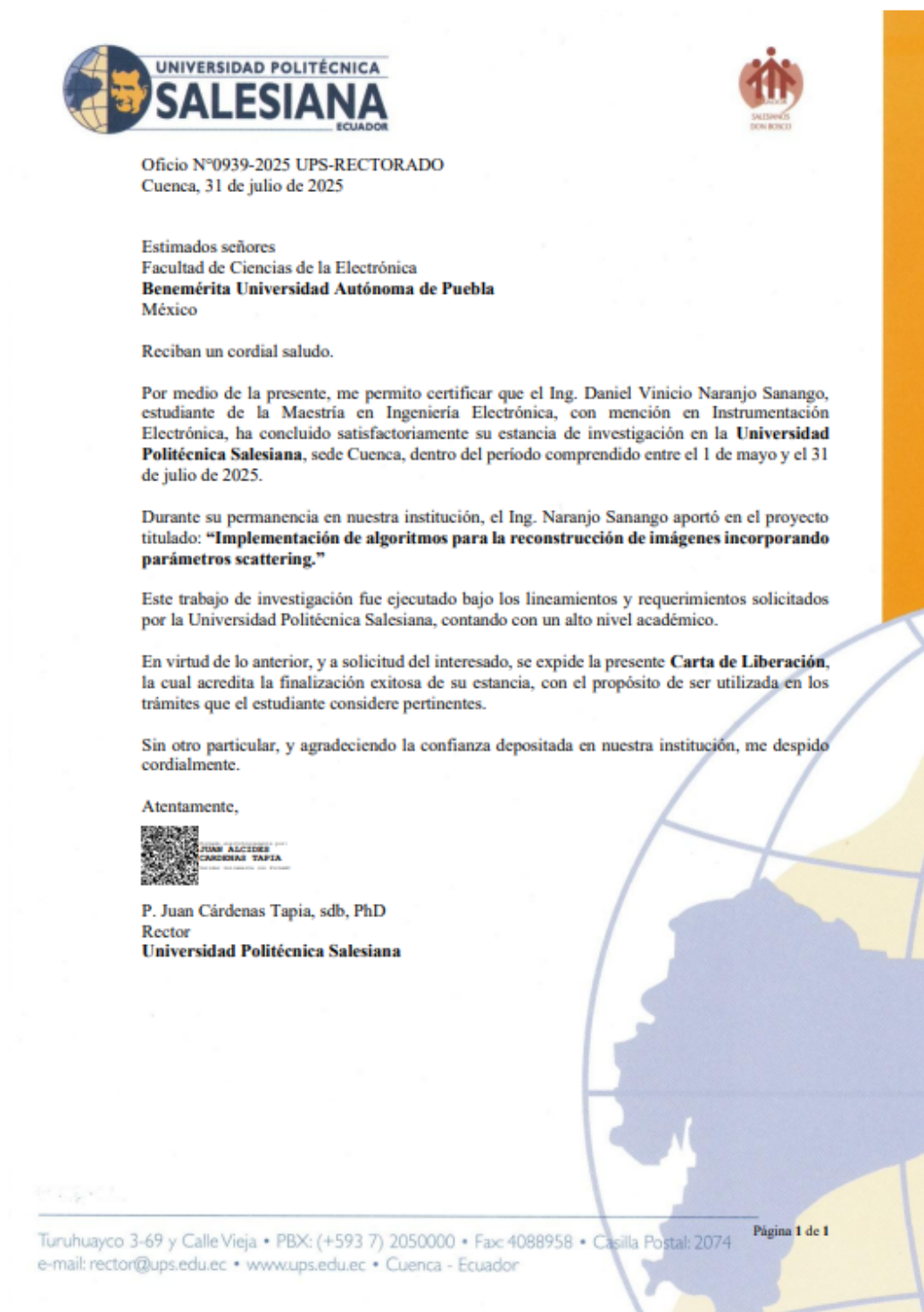
La información contenida en este correo se dirige exclusivamente a su destinatario; puede contener *INFORMACIÓN CONFIDENCIAL* cuya divulgación está prohibida por la ley. Si recibió este mensaje por error, evite su utilización, reproducción, o difusión, debiendo eliminarlo de su computadora o cualquier dispositivo electrónico y comunicarlo inmediatamente por esta vía a su emisor.

La información de este correo, así como la contenida en los documentos que se adjuntan, pueden ser objeto de solicitudes de acceso a la información, sin perjuicio de las limitantes legales al derecho de acceso a la información.

Puede consultar los avisos de privacidad para el tratamiento de datos personales con diversas finalidades en <https://transparencia.buap.mx>.

## 1.2. Estancia Universitaria

- Se desarrollo con exito el proyecto de estancia universitaria en la UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA



- Como parte de la estancia se brindó una charla magistral: ANTENAS PATCH: TECNOLOGÍA APLICADA EN BENEFICIO DE LA SOCIEDAD.



### 1.3. Encuesta de Validación de Mercado

#### *Sistema portátil de georradar basado en Radio Definida por Software (SDR)*

La Facultad de Ciencias de la Electrónica, perteneciente a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, presenta este cuestionario como parte de un estudio de validación de mercado para un prototipo de radar portátil de penetración terrestre (GPR), desarrollado con tecnología de radio definida por software (SDR).

A diferencia de los sistemas comerciales tradicionales, este prototipo está diseñado como una herramienta de bajo costo, portátil y flexible, dirigida a profesionales como ingenieros civiles, arquitectos, arqueólogos o especialistas del sector automotriz que requieran inspeccionar o analizar estructuras bajo la superficie.

Sus aplicaciones potenciales incluyen:

- Detección de ductos, tuberías, cables o cimentaciones ocultas.
- Evaluación de estructuras antiguas sin dañar su superficie.
- Identificación de restos u objetos en zonas arqueológicas.
- Apoyo en peritajes estructurales o revisión de suelos en obra.

La siguiente encuesta tiene como objetivo recopilar su opinión sobre la utilidad y viabilidad de implementar este tipo de tecnología en su campo laboral.

---

#### Datos generales

*\* Indica que la pregunta es obligatoria*

##### 1. Ocupación / Área profesional \*

- Ingeniería Civil
- Arquitectura
- Arqueología
- Otro: \_\_\_\_\_

##### 2. Tiempo de experiencia en el área \*

- 0-2 años
- 3-5 años

- 6-10 años
- Más de 10 años

**3. ¿Ha utilizado antes algún tipo de radar de subsuelo o tecnología GPR? \***

- Sí
- No

### Percepción y utilidad del prototipo

**4. ¿Consideraría útil una herramienta como esta en su campo de trabajo? \***

- Sí
- No
- Tal vez

**5. ¿Usaría este sistema si estuviera disponible a un costo accesible? \***

- Sí
- No
- Tal vez

**6. ¿Qué factores considera importantes para el uso de esta herramienta?**

*Selecciona todos los que correspondan.*

- Precio
- Precisión de detección
- Facilidad de uso
- Portabilidad
- Soporte técnico y capacitación
- Compatibilidad con sistemas de software
- Otro: \_\_\_\_\_

**7. En un futuro, ¿le interesaría recibir más información o participar en pruebas del sistema?**

- Sí
- No