UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"PROTOTIPO DE UNA CÁMARA ANECOICA PARA LA CARRERA DE TELECOMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Rony David Quelal Villarreal

DIRECTOR:

Msc. Hernán Mauricio Domínguez Limaico

Ibarra - Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003804422		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Quelal Villarreal Rony David		
DIRECCIÓN:	Pimampiro, Calle Bolívar y Rio tornillos		
EMAIL:	rdquelalv@utn.edu.ec / ronnydaviid21@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:		**TELÉFONO MÓVIL:**	0978626932

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	PROTOTIPO DE UNA CÁMARA ANECOICA PARA LA CARRERA DE TELECOMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
AUTOR (ES):	QUELAL VILLARREAL RONY DAVID
FECHA: DD/MM/AAAA	04/02/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	
PROGRAMA:	■ **GRADO** ☐ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
DIRECTOR:	MSC. HERNÁN MAURICIO DOMÍNGUEZ LIMAICO
ASESOR:	MSC. EDGAR ALBERTO MAYA OLALLA

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 4 días del mes de febrero del 2026.

EL AUTOR:

Rony David Quelal Villarreal

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 04 de febrero del 2026

MSC. HERNÁN MAURICIO DOMÍNGUEZ LIMAICO

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Firmado electrónicamente por:
HERNAN MAURICIO
DOMINGUEZ LIMAICO
Validar únicamente con FirmaEC

(f)……

Msc. Hernán Mauricio Domínguez Limaico

C.C.: 1002379301

DEDICATORIA

En este duro camino, cuando empecé a construir el sueño que tanto anhelaba, mi familia me enseñó que, con lo que se tiene, cuando se suma esfuerzo, dedicación y mucho corazón, es posible lograr cosas verdaderamente extraordinarias.

A Dios, por haberme dado salud, vida y la fortaleza necesaria para llegar hasta aquí.

A mis padres, Ramiro y Mercy, por su gran amor incondicional, por su apoyo incansable y por ser mi mayor inspiración, incluso en los momentos en que pensé rendirme.

A mis hermanos, Maykel y Christian, por estar ahí en cada paso, ayudándome y animándome siempre que lo necesité. A toda mi familia, que con cariño y preocupación me impulsaron a no detenerme hasta cumplir este sueño.

Durante esta etapa universitaria, no solo crecí profesionalmente, sino que también conocí a personas increíbles que con el tiempo se convirtieron en grandes amigos. A cada uno de ellos, gracias por sus consejos, por estar presentes y por motivarme a seguir adelante, incluso cuando las fuerzas parecían acabarse. Gracias por compartir conmigo risas, aprendizajes y momentos que quedarán por siempre en mi memoria.

Con todo mi cariño y gratitud.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer profundamente a Dios, por haber sido mi guía, por cuidarme y bendecirme en todo este gran recorrido. Estoy inmensamente agradecido por haberme permitido ver cumplido este logro acompañado de mis abuelitos, un anhelo que siempre llevaré en mi corazón.

A mis padres, Ramiro y Mercy, gracias por confiar siempre en mí, por no dejarme solo en ningún momento y por ser mi ejemplo constante. Sus palabras, su amor y sus consejos me acompañarán por siempre.

A mis hermanos, mi más sincero agradecimiento. Ser su ejemplo es un honor que me impulsa a seguir superándome día a día.

A mis amigos, gracias por su amistad sincera, por su apoyo incondicional y por tener la paciencia de ayudarme a comprender cuando algo no entendía.

Expreso un agradecimiento muy especial al Msc. Mauricio Domínguez, por brindarme su valioso tiempo y acompañarme en este proceso. Su constante asesoría, paciencia y motivación fueron claves para culminar este trabajo. A pesar de mis errores, nunca me soltó la mano y siempre me impulsó a dar lo mejor de mí.

Al Msc. Edgar Maya, gracias por sus consejos valiosos que fortalecieron significativamente el desarrollo de este proyecto.

Al Msc. Jaime Michilena, coordinador de la carrera, por ser una persona especial y siempre dispuesto a ayudar en cualquier solicitud.

A cada uno de los docentes que formaron parte de mi formación, gracias por sus enseñanzas teóricas y prácticas que me han permitido forjarme como un verdadero profesional. Finalmente, a todos quienes me brindaron su amistad sincera a lo largo de este camino, gracias de corazón. Que Dios les bendiga y les cuide siempre.

RESUMEN EJECUTIVO

La construcción de un prototipo de cámara anecoica para la carrera de Telecomunicaciones de la Universidad Técnica del Norte nace como respuesta a la necesidad de contar con un elemento didáctico donde los estudiantes realicen pruebas de laboratorio, donde contenga un espacio libre de interferencias, utilizando equipos como el kit de entrenamiento ME1310 y el analizador RF Keysight N9913A. El objetivo principal del proyecto es implementar un prototipo funcional donde el principal material es de aluminio, basado en el principio de la jaula de Faraday, de modo que las ondas electromagnéticas se anulen y no existan interferencias externas. Además, mediante la implementación de esponjas absorbentes en el interior permite atenuar las reflexiones de las señales, generando un entorno ideal para realizar distintas pruebas con los equipos disponibles en el laboratorio.

De este modo, se busca comparar el comportamiento de una antena mediante el parámetro S21 (patrón de radiación en 2D) en dos escenarios: uno al aire libre, donde la señal se ve afectada por interferencias que comúnmente son puntos de acceso Wi-Fi, dispositivos Bluetooth o periféricos inalámbricos utilizados por los estudiantes; y el otro escenario, se plantea dentro del prototipo, donde dichas perturbaciones se reducen significativamente. Para ello, se emplea una antena dipolo operando a 2.4 GHz.

Finalmente, mediante la herramienta MATLAB y el software RadPat, se procesan los resultados obtenidos del parámetro S21 para representar el patrón de radiación en 3D, indicando la dirección y la zona donde se concentra la mayor potencia de la antena.

Palabras clave: jaula de Faraday, cámara anecoica, patrón de radiación, eficiencia

ABSTRACT

The construction of a prototype anechoic chamber for the Telecommunications degree program at the Universidad Técnica del Norte arose in response to the need for a teaching tool where students could conduct laboratory tests in an interference-free space, using equipment such as the ME1310 training kit and the Keysight N9913A RF analyzer. The main objective of the project is to implement a functional prototype made primarily of aluminum, based on the Faraday cage principle, so that electromagnetic waves are canceled out and there is no external interference. In addition, the use of absorbent sponges inside the chamber attenuates signal reflections, creating an ideal environment for conducting various tests with the equipment available in the laboratory.

The aim is to compare the performance of an antenna using the S21 parameter (2D radiation pattern) in two scenarios: one outdoors, where the signal is affected by interference commonly caused by Wi-Fi access points, Bluetooth devices, or wireless peripherals used by students; and the other scenario is set up inside the prototype, where such disturbances are significantly reduced. For this purpose, a dipole antenna operating at 2.4 GHz is used.

Finally, using the MATLAB tool and RadPat software, the results obtained from the S21 parameter are processed to represent the radiation pattern in 3D, indicating the direction and area where the antenna's greatest power is concentrated.

Keywords: Faraday cage, anechoic chamber, radiation pattern, efficiency

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo I: Antecedentes 1

1.1. Tema 1

1.2. Problema 1

1.3. Objetivos 2

1.3.1. Objetivo General 2

1.3.2. Objetivos Específicos 2

1.4. Alcance 2

1.5. Justificación 4

Capítulo II: Estado del Arte 7

2.1. Propagación de ondas electromagnéticas 7

2.1.1. Reflexión 9

2.1.2. Refracción 11

2.1.3. Absorción 12

2.2. Jaula de Faraday 13

2.2.1. Aplicaciones 13

2.3. Cámara Anecoica 14

2.3.1. Aplicaciones de una cámara anecoica en ámbito de las Telecomunicaciones 16

2.3.2. Tipos de cámara anecoicas 18

2.3.2.1. Camara Anecoica Rectangular 18

2.3.2.2. Camara Anecoica de Estrechamiento progresivo 20

2.3.2.3. Cámara Semi-Anecoica 21

2.3.2. Materiales Absorbentes.....21

2.3.3. Otros Componentes.....24

2.4. Fundamentos de Antenas.....27

2.4.1. Clasificación de Antenas 29

2.4.2. Eficiencia de Antena 30

2.4.3. Patrón De Radiación 32

Capitulo III: Prototipo De La Cámara Anecoica Y Ejecución De Pruebas Experimentales.....35

3.1. Jaula de Faraday.....35

3.2. Prototipo de La Cámara Anecoica 39

3.2.1. Implementación del Prototipo.....43

3.2.2. Frecuencia De Operación.....45

3.3. Configuración de Equipos y Preparación del Espacio de Trabajo para ensayos de radiofrecuencia.....47

3.3.1. Preparación y Montaje de Equipos para Pruebas de Radiación.....48

3.3.2. Ejecución de Prueba en Presencia de Interferencia de Radiofrecuencia ...52

3.3.3. Ejecución de Prueba en un Entorno Electromagnéticamente Controlado .53

Capítulo IV: Análisis e Interpretación de Resultados.....55

4.1. Análisis de los Diagramas de Radiación de la Antena 55

4.1.1. Medición del Patrón de Radiación en un Entorno Abierto.....57

4.1.2. Medición del Patrón de Radiación en un Entorno Controlado 59

4.1.3. Evaluación de la Eficiencia de la Antena 62

4.2. Evaluación del Desempeño del Prototipo de la Cámara Anecoica.....65

4.2.1. Incorporación de la Malla de Aluminio para Mejorar el Blindaje del Prototipo 65

CONCLUSIONES 28

RECOMENDACIONES.....29

Bibliografía 28

ANEXO A.....28

ANEXO B.....39

ANEXO C.....50

ANEXO D.....55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Metodología waterfall 3

Figura 2 Espectro electromagnético 9

Figura 3 Reflexión de una onda incidente en una superficie plana 10

Figura 4 Refracción interna y externa 12

Figura 5 Cámara anecoica de Microsoft 15

Figura 6 Cámara anecoica rectangular 19

Figura 7 Cámara anecoica tipo cónica 21

Figura 8 Comparación del patrón de radiación en 2D: omnidireccional y direccional 33

Figura 9 Patrón de radiación de una antena direccional 34

Figura 10 Redistribución de Carga en la Jaula de Faraday 36

Figura 11 Comportamiento de la jaula de Faraday ante un campo eléctrico externo 37

Figura 12 Distribución estable de cargas 37

Figura 13 Región del campo lejano 41

Figura 14 Representación esquemática del funcionamiento de una cámara anecoica 42

Figura 15 Prototipo de la cámara anecoica 45

Figura 16 Diagrama de conexión 47

Figura 17 Configuración de dirección IP en el computador 49

Figura 18 Convergencia entre el computador y el dispositivo RF Keysight N9913A 49

Figura 19 Configuración del formato numérico y regional 50

Figura 20 Sistema de configuración para la conexión entre el computador y dispositivos 51

Figura 21 Configuraciones iniciales en Radpat 51

Figura 22 Escaneo de redes WiFi y colocación de equipos en el espacio de trabajo 52

Figura 23 Escenario de pruebas en un entorno controlado 54

Figura 24 Medición del parámetro S11 de una antena dipolo 56

Figura 25 Diagrama de radiación 2D en un ambiente con interferencia 58

Figura 26 Diagrama de radiación en 3D en un ambiente con interferencia 59

Figura 27 Diagrama de radiación en 2D de una antena dipolo dentro del prototipo de la cámara anecoica 60

Figura 28 Diagrama de radiación en 3D de una antena dipolo dentro del prototipo de la cámara anecoica 62

Figura 29 Recubrimiento adicional con malla de aluminio fina 66

Figura 30 Distribución de equipos para una mejor medición angular 67

Figura 31 Patrón de radiación en 2D y 3D reforzado con malla de aluminio 68

Figura 32 Medición de la señal móvil CLARO LTE en el exterior e interior del prototipo 70

Figura 33 Medición del nivel de potencia de señal Tuenti fuera y dentro del prototipo 71

Figura 34 Comparación de patrones de radiación 72

Figura 35 Cálculo de la atenuación del prototipo en 2.4 GHz 52

Figura 36 Cálculo de la atenuación del prototipo en 915 MHz 53

Figura 37 Ventana principal del aplicativo desarrollado en App Designer 55

Figura 38 Archivo con extensión .csv para graficar el patrón de radiación en 3D 56

Figura 39 Resultados obtenidos al graficar el patrón de radiación en 3D 56

Figura 40 Interfaz de cálculo de la eficiencia de la antena 58

Figura 41 Datos extraídos del archivo .csv medido con RadPat 58

Figura 42 Conversión de los datos a miliwatts 59

Figura 43 Ingreso de la potencia de entrada en dBm 60

Figura 44 Resultado del cálculo de la eficiencia de una antena dipolo 60

Figura 45 Nivel de atenuación del prototipo 61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Aplicaciones de una jaula de Faraday 14

Tabla 2 Materiales principales para la elaboración de una jaula de Faraday 38

Tabla 3 Distribución del espectro radioeléctrico según el Plan Nacional del Ecuador 2021 46

Tabla 4 Fórmulas empleadas para la conversión de potencia y eficiencia de antena 63

Tabla 5 Datos obtenidos con los equipos del laboratorio en un entorno con interferencias 28

Tabla 6 Conversión de dB a mW 33

Tabla 7 Datos obtenidos durante el barrido angular dentro del prototipo 39

Tabla 8 Conversión de unidades a mW con los datos obtenidos dentro del prototipo 44

Tabla 9 Atenuación de potencia en redes móviles Claro y Movistar 54

Capítulo I: Antecedentes

1.1. Tema

Prototipo de una cámara anecoica para la carrera de Telecomunicaciones de la Universidad Técnica del Norte

1.2. Problema

El desafío principal radica en alcanzar el silencio absoluto dentro de las cámaras anecoicas, diseñadas para mediciones precisas de radiaciones electromagnéticas, como en la caracterización de antenas. Sin embargo, el audio humano solo puede captar un rango limitado de decibeles, lo que impone restricciones a la percepción auditiva y limita la precisión de las mediciones. Los enfoques hacia las cámaras cónicas o de gran tamaño, son costosos y restringen el espacio de trabajo, lo que subraya aún más la importancia de superar estas limitaciones (Rong Chung et al., 2012).

De acuerdo con (Taybi et al., 2018) “La tarea de caracterizar una cámara anecoica sigue siendo un desafío en la actualidad. No solo requiere un entendimiento profundo de cómo funciona la cámara, sino también un dominio sólido de los métodos numéricos”.

Como señala (Popov & Kalimullin, 2020) “Las cámaras anecoicas se utilizan para obtener resultados exactos de las mediciones de parámetros de antenas de pequeño tamaño. Dichas mediciones en cámaras anecoicas son un proceso complejo y largo con el uso de equipos costosos”. Las reflexiones y ecos presentes en los entornos de prueba convencionales pueden distorsionar de manera significativa los resultados de las mediciones. Esto puede llevar a conclusiones incorrectas y al diseño ineficiente de los sistemas de antenas.

Actualmente, la carrera de Telecomunicaciones de la Universidad Técnica del Norte carece de esta infraestructura. Esto limita las oportunidades para que los estudiantes lleven a

cabo investigaciones y experimentos prácticos, y restringe su capacidad para aplicar sus conocimientos teóricos en un entorno práctico.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Implementar un prototipo de pequeña escala que permita realizar pruebas de laboratorio utilizando el kit de laboratorio ME1310 y el equipo Keysight N9913A que dispone la carrera de Telecomunicaciones.

1.3.2. Objetivos Específicos

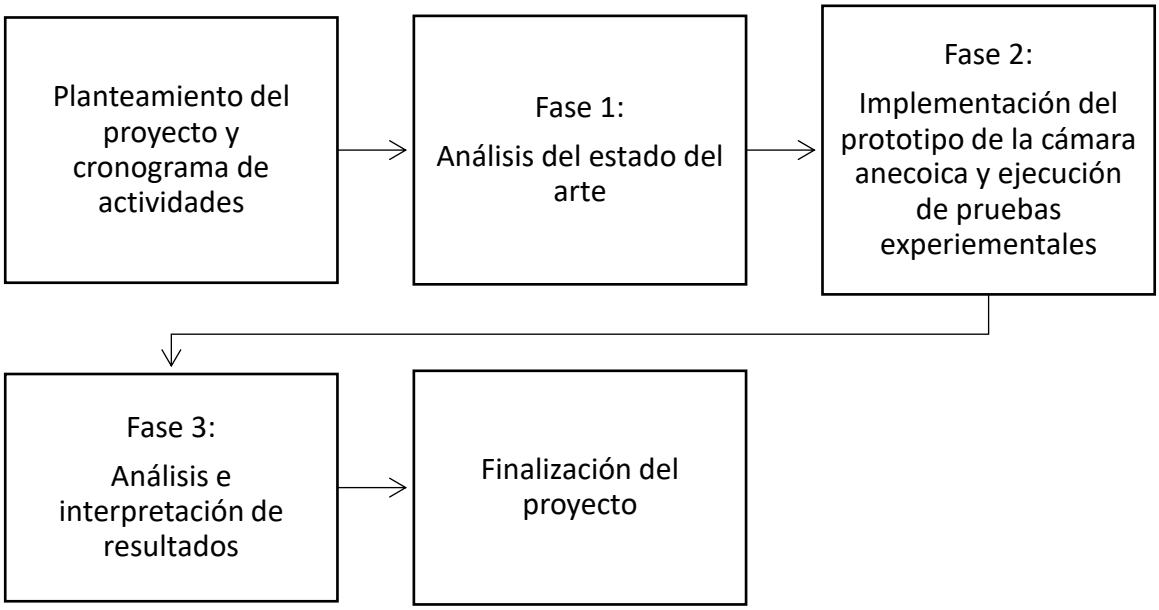
- Analizar el estado de arte y la fundamentación teórica de las cámaras anecoicas en relación con su diseño, aplicaciones y funcionamiento.
- Construir un prototipo de una cámara anecoica a pequeña escala para su uso de pruebas de laboratorio, siguiendo la metodología Waterfall.
- Evaluar la eficiencia de una antena de 2.4 GHz mediante la obtención y análisis de su diagrama de radiación 3D, utilizando el kit de laboratorio ME1310 y el equipo Keysight N9913A FieldFox RF analyzer.

1.4. Alcance

El objetivo principal del proyecto es proporcionar a la Universidad Técnica del Norte un prototipo de una cámara anecoica a pequeña escala. Para lo cual se basará en la metodología descrita en la Figura 1, en donde se muestra tres fases principales.

Figura 1

Metodología waterfall



Nota. Se indica la metodología waterfall que se va a utilizar en el proyecto propuesto

En la primera fase del proyecto, se llevará a cabo un análisis del estado del arte para adquirir y consolidar conocimientos relacionados con cámaras anecoicas. Este análisis incluirá el estudio de fundamentos teóricos esenciales y la investigación de diversos aspectos técnicos y estructurales de las cámaras anecoicas. Además, se abordará temas acerca de la medición de la eficiencia de antenas, diagramas de radiación 3D, interpretación de parámetros S.

La segunda fase, abordará la implementación del prototipo de una la cámara anecoica, considerando cálculos como la frecuencia de operación, distancia mínima teórica para el campo lejano, longitud de onda y las dimensiones físicas (largo, ancho y altura) de la cámara anecoica. Esta etapa incluye la selección y adquisición de materiales como láminas de aluminio, perfiles de aluminio cuadrado y material absorbente. Además, se llevará a cabo la construcción del prototipo, con el objetivo de realizar mediciones de la eficiencia de antena a 2.4GHz utilizando el kit de laboratorio ME1310 y el equipo Keysight N9913A FieldFox RF Analyzer,

permitiendo asi comparar en un entorno con interferencias y dentro del prototipo de la cámara anecoica para su posterior análisis en la siguiente fase.

En la tercera fase, se lleva a cabo el análisis e interpretación de los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas en la fase anterior. Se evalúan los datos registrados a partir de las mediciones realizadas y se comparan los resultados obtenidos en un entorno con interferencias con aquellos obtenidos dentro del prototipo, con el fin de verificar su capacidad para simular un entorno libre de reflexiones externas.

1.5. Justificación

Las cámaras anecoicas son la solución definitiva al desafío de encontrar un área libre de interferencias que no dependa de las condiciones climáticas. Estas cámaras replican con exactitud las condiciones de propagación del espacio libre, lo que soluciona los problemas de interferencias (Campos Mónica & Flores Paulina, 2006). Por esta razón, (Nerey Musa et al., 2014), afirma que las cámaras anecoicas poseen una función bidireccional: reducir las interferencias externas para prevenir su impacto dentro de la cámara a través del blindaje correspondiente, y disminuir los campos electromagnéticos generados en su interior que podrían afectar las mediciones mediante el uso de materiales absorbentes de ondas electromagnéticas.

La creación de una cámara anecoica de alta calidad es un recurso importante para el estudio de temas como; antenas, la propagación de ondas, teoría electromagnética y otros campos relacionados que se estudian en la carrera de telecomunicaciones. Este implica desafíos en el diseño inicial y en la simulación de la cámara ya que esta es la base para que la infraestructura pueda cumplir con su función. La calidad y el estado del material absorbente usado en las paredes, techo y suelo son fundamentales. Cualquier deterioro o instalación

incorrecta de estos materiales puede afectar su habilidad para absorber eficientemente las ondas incidentes.

Según lo mencionado por, (Ortega González et al., 2017) las antenas son los dispositivos más utilizados para emitir y captar ondas electromagnéticas. No solo irradian la energía recibida en forma de onda en todas las direcciones, sino que también tienen la capacidad de dirigirla hacia una dirección específica. El patrón de radiación visualiza cómo la antena emite estas ondas. Dada la amplia utilización de las antenas, es crucial que sean diseñadas de la mejor manera posible. Para verificar su calidad y realizar pruebas precisas, es importante introducirlas en una cámara anecoica. Este entorno proporciona condiciones controladas, lo que conduce a una mayor efectividad en los resultados de las pruebas.

Por otra parte, las cámaras anecoicas tienen una amplia gama de aplicaciones, que incluyen la realización de estudios, mediciones y ensayos bajo condiciones controladas. En el ámbito electromagnético, se emplean para llevar a cabo pruebas en antenas y radares, así como para realizar mediciones de interferencia electromagnética (EMI) y compatibilidad electromagnética (EMC), entre otros aspectos. Por otro lado, en el ámbito acústico, se utilizan para determinar la potencia sonora de una fuente, la respuesta de frecuencia de un altavoz y el coeficiente de absorción de un material, entre otras aplicaciones (Barrionuevo & Gonzalez, 2012).

Otro ejemplo, el uso de una cámara anecoica ha permitido llevar a cabo pruebas en dispositivos similares a satélites, cuya misión es la recopilación de datos, como lo indica un estudio realizado por (Álvarez Flores et al., 2017). Los CanSats, que son versiones a escala reducida de satélites, han ganado gran relevancia en el ámbito educativo y aeroespacial, gracias a su costo accesible, tamaño compacto y utilidad educativa. Sin embargo, para garantizar su uso seguro, se recomienda llevar a cabo pruebas de compatibilidad electromagnética

Según la revisión realizada sobre diferentes tesis en el país, han propuesto diseños y se ha llevado a cabo la construcción de cámaras anecoicas. Por ejemplo, en la tesis elaborada por (Brito Flores & López Campos, 2006) calcularon que el costo para construir una cámara anecoica es de 4.500,00 dólares para un rango de frecuencias de 2 GHz a 3 GHz. Esto ha permitido la realización de pruebas de laboratorio para estudiantes de electrónica y telecomunicaciones en la Universidad de las Fuerzas Armadas.

En el objetivo 4 de la (Organización de Naciones Unidas, 2022), establece que "la financiación de la educación debe convertirse en una prioridad de inversión nacional", este trabajo contribuye significativamente a la investigación para la posible construcción de una cámara anecoica. Al proporcionar la base y el diseño necesarios, este proyecto ofrece a la universidad la oportunidad de invertir en una infraestructura que potencie la calidad de la educación e investigación en el campo de las telecomunicaciones.

Como señala “La Universidad Técnica del Norte, será una Universidad, internacional, sustentable, intercultural, y humanista, líder en la formación integral e inclusiva con impacto social en el desarrollo de la investigación, innovación, emprendimiento y vinculación; será la respuesta académica a la demanda social y productiva que aporta a la transformación y sustentabilidad” (Universidad Técnica del Norte, 2022). Si bien la UTN ha avanzado considerablemente en este aspecto, es evidente la necesidad de fortalecer su infraestructura, particularmente en la creación y equipamiento de laboratorios actualizados que impulsen aún más su capacidad investigativa y su contribución al progreso científico y tecnológico.

Capítulo II: Estado del Arte

En este segundo capítulo, correspondiente al marco teórico del tema de titulación, se busca definir qué es una cámara anecoica, tipos de materiales, aplicaciones y otros puntos clave necesarios para el diseño de la misma. Una vez revisados estos temas, se procede a investigar otro elemento clave que una cámara anecoica debe tener: la jaula de Faraday. Este componente es esencial para que la cámara anecoica pueda apantallar los campos electromagnéticos incidentes desde el exterior y simular un espacio libre. Por otra parte, se hace una revisión de la propagación de ondas, con el objetivo de conocer los fenómenos que intervienen en una cámara anecoica. Finalmente, se revisarán temas relacionados a la teoría de antenas y caracterización del patrón de radiación.

2.1. Propagación de ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas se producen mediante oscilaciones o aceleración de una carga eléctrica y se caracterizan por tener componentes eléctricos y magnéticos. Un aspecto fundamental de estas ondas es que no requieren un medio para su propagación, ya que pueden viajar a través del espacio libre sin ningún obstáculo, alcanzando la velocidad de la luz, equivalente a 300.000 km/s (Lavagnino Fonseca, 2006).

La Ec.1 muestra el cálculo de la velocidad de la luz, utilizando los principios derivados de las ecuaciones de Maxwell; donde: μ_0 corresponde a la permeabilidad del vacío y ε_0 es la permitividad en el vacío.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

La permeabilidad y la permitividad del vacío son propiedades clave en el estudio de los campos eléctricos y magnéticos. La permeabilidad del vacío es un valor que indica la capacidad del espacio vacío para permitir la formación y propagación de un campo magnético. En otras palabras, determina la influencia que un campo magnético puede ejercer en el vacío, y se

expresa como un valor constante en henrios por metro (H/m). Por otra parte, la permitividad del vacío mide la capacidad del vacío para permitir la formación de un campo eléctrico y para almacenar energía eléctrica en presencia de dicho campo. Específicamente, cuantifica cuánta carga eléctrica puede ser almacenada en el vacío por unidad de campo eléctrico aplicado. Se mide en faradios por metro (F/m).

De acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI), tanto la permeabilidad como la permitividad del vacío son valores constantes, como se indica en la Ec. 2 para la permeabilidad y la Ec. 3 para la permitividad.

$$\mu_0 = 4\pi\ x\ 10^{-7}\ \left(\frac{H}{m}\right) \qquad \text{(Ec. 2)}$$

$$\varepsilon_0 = 8.854\ x\ 10^{-12}\ \left(\frac{F}{m}\right) \qquad \text{(Ec. 3)}$$

Al sustituir las Ec.2 y Ec.3 en la Ec.1, se obtiene el valor de la velocidad de la luz.

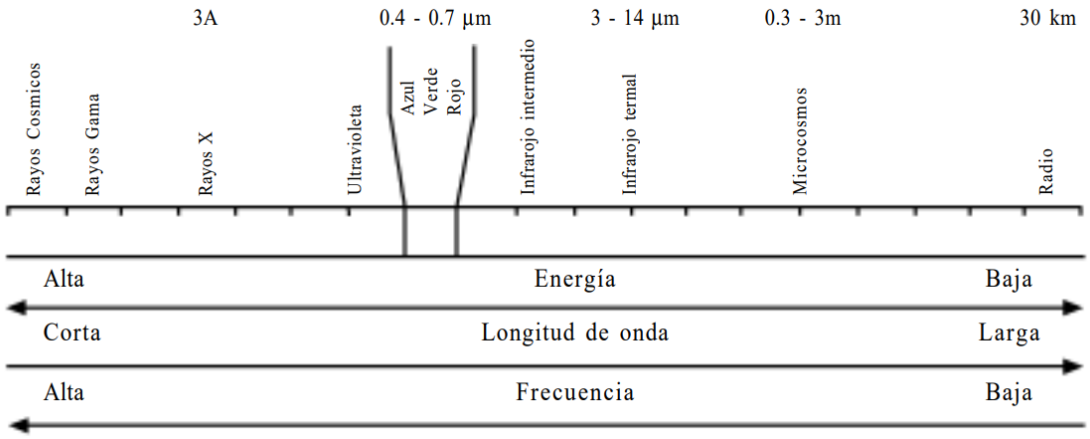
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\ x\ 10^{-7}\ \left(\frac{H}{m}\right) * 8.854\ x\ 10^{-12}\ \left(\frac{F}{m}\right)}} \approx 3x10^8 \frac{m}{s}$$

Por otra parte, (Lavagnino Fonseca, 2006) señala que las ondas electromagnéticas, por naturaleza, son transversales. Se consideran ondas transversales planas cuando se encuentran a una gran distancia de la fuente emisora. Estas ondas están compuestas por un campo eléctrico y un campo magnético, los cuales son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación. En este contexto, el autor menciona que las ondas electromagnéticas se clasifican según su frecuencia en diversas categorías las cuales se pueden distinguir entre ondas electromagnéticas ionizantes y no ionizantes. El período (T) de una onda se refiere al tiempo que tarda en completar una longitud de onda, mientras que la frecuencia se define como el número de ciclos

por segundo, medida en Hertz (Hz). La longitud de onda (λ) representa una distancia y se mide en metros, aunque comúnmente se expresa en nanómetros (nm). En la Figura 2, se indica la relación entre diferentes tipos de ondas electromagnéticas según su longitud de onda, frecuencia y energía. Desde los rayos cósmicos y gamma, que tienen longitudes de onda cortas y alta energía, hasta las ondas de radio, con longitudes de onda largas y baja energía, el espectro abarca una amplia gama de radiación, incluyendo la luz visible que se encuentra en un pequeño rango de 0.4 a 0.7 micrómetros. A medida que la longitud de onda aumenta, la energía disminuye y la frecuencia se reduce, tal como se observa en las escalas indicadas en la imagen.

Figura 2

Espectro electromagnético



Nota. Tomada de Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales (p.457), por (Bautista et al., 2004)

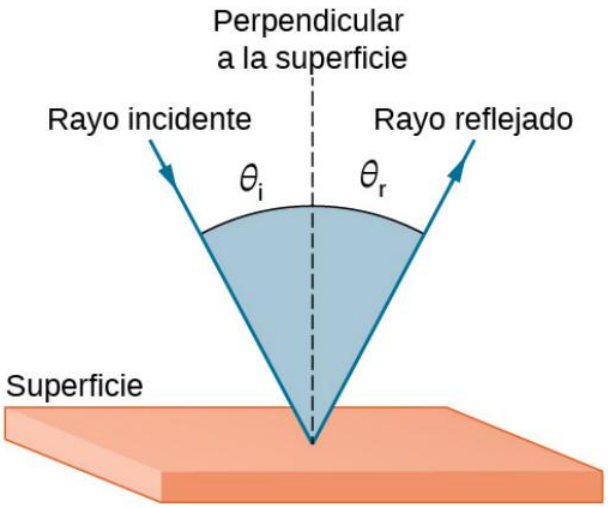
2.1.1. Reflexión

La reflexión de ondas ocurre cuando una onda choca con una superficie y rebota en lugar de atravesarla. Este fenómeno se presenta tanto en ondas electromagnéticas como en ondas mecánicas y sonoras. La ley de la reflexión establece que el ángulo con el que la onda incide θ_i sobre una superficie es igual al ángulo con el que se refleja θ_r. Ambos ángulos se miden en relación con la perpendicular a la superficie en el punto en el que la onda incide

(Zambrano Orejuela & Vallejo Ayala, 2012). La Figura 3 muestra cómo un rayo incidente choca con una superficie plana y se refleja con el mismo ángulo, como indica la ley de la reflexión.

Figura 3

Reflexión de una onda incidente en una superficie plana



Nota. Tomada de Física Universitaria 3 (p.13), por (Ling et al., 2021)

En este sentido, (Ling et al., 2021) afirma que la reflexión de las ondas puede clasificarse en:

- **Reflexión especular:** ocurre en superficies lisas y pulidas, como espejos o superficies metálicas. En este tipo de reflexión, la onda reflejada se propaga en una dirección definida, siguiendo la ley de la reflexión, que establece que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.
- **Reflexión difusa:** se presenta en superficies rugosas o irregulares. La onda reflejada se dispersa en múltiples direcciones, lo que hace que la reflexión sea menos predecible y que la energía de la onda se distribuya de manera más amplia.

2.1.2. Refracción

La refracción ocurre cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro con un índice de refracción diferente, lo que provoca un cambio en la dirección de la luz debido a la variación en la velocidad de la onda entre ambos medios. Este fenómeno está descrito por la ley de Snell, que se expresa matemáticamente como:

$$n_1 sin\theta_1 = n_2 sin\theta_2 \qquad \text{(Ec. 4)}$$

En la Ec. 4, se presenta la fórmula de la ley de Snell, donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios 1 y 2, respectivamente. Además, θ_1 representa el ángulo de incidencia y θ_2 el ángulo de refracción.

En base a (Sánchez Montenegro, 2020), establece que este fenómeno puede darse de dos maneras las cuales son:

- Refracción Interna $(n_1 < n_2): \theta_2 > \theta_1$

A medida que el ángulo de incidencia θ_1 se incrementa, el ángulo de refracción θ_2 también lo hace, aunque siempre permanece menor que el ángulo de incidencia. Cuando el ángulo de incidencia llega al ángulo crítico θ_c, el ángulo de refracción θ_2 alcanza los 90°, indicando que la onda refractada se desplaza de forma completamente paralela a la superficie del segundo medio.

- Refracción Externa $(n_1 > n_2): \theta_2 < \theta_1$

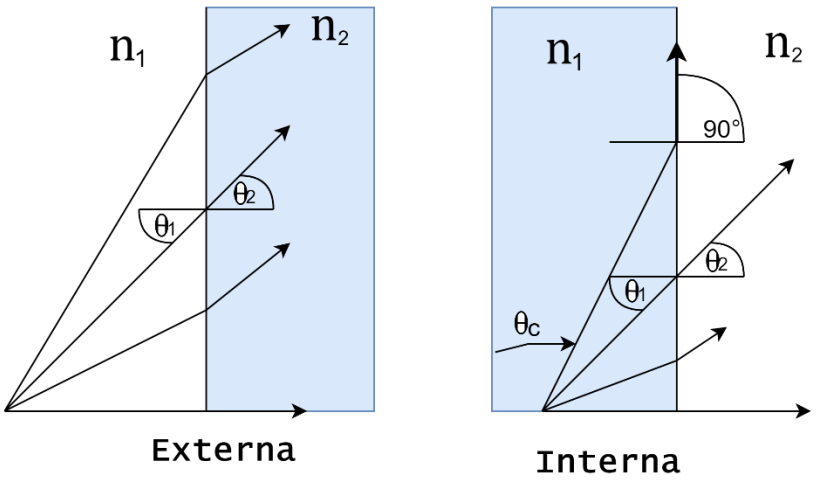
La refracción externa se manifiesta cuando una onda (de luz o sonido) incide en una superficie y cambia su dirección al entrar en un medio diferente. Este fenómeno ocurre cuando el índice de refracción del medio original es mayor que el del medio al que la onda se transfiere.

En la Figura 4 se muestra los fenómenos de refracción externa e interna en dos medios con diferentes índices de refracción, n_1 y n_2. En la parte izquierda, se indica la refracción

externa, donde un rayo de luz que incide desde el medio con índice n_1 hacia el medio con índice n_2 se desvía hacia la normal, dando como resultado una formación de un ángulo de refracción θ_2 menor que el ángulo de incidencia θ_1. Por otra parte, en el lado derecho de a Figura 4, se muestra la refracción interna, que ocurre cuando la luz incide desde un medio de mayor índice de refracción n_1 hacia un medio de menor índice n_2; en este caso, al superar el ángulo crítico θ_c, la luz se refleja completamente dentro del primer medio, mostrando la transición de refracción a reflexión interna total.

Figura 4

Refracción interna y externa



2.1.3. Absorción

La absorción de ondas electromagnéticas es el proceso en el cual la energía de una onda electromagnética es captada por un material o medio (conductores eléctricos, metales, dieléctricos) y convertida en otra forma de energía, generalmente calor. Este fenómeno describe la interacción entre las ondas electromagnéticas y la materia.

La absorción de la energía electromagnética puede ocurrir de diferentes maneras, dependiendo de las propiedades del material. En materiales conductores, como los metales, la absorción es principalmente debido a la interacción con los electrones libres, lo que genera

corrientes de Foucault y consecuentemente pérdidas resistivas que se manifiestan como calor. En materiales dieléctricos, la absorción ocurre debido a la polarización de las moléculas en el material, lo que también genera pérdidas en forma de calor.

Según (Hernández Pérez et al., 2019), “las corrientes de Foucault se producen cuando una piezat metálica está sometida a la acción de un flujo magnético variable con el tiempo. Este flujo se puede producir cuando el campo magnético es creado por un electroimán recorrido por una corriente alterna, o cuando un material conductor se desplaza en el seno de un campo magnético uniforme, debido a corrientes continuas o imanes”.

2.2. Jaula de Faraday

La Jaula de Faraday, nombrada en honor a su creador, el científico británico Michael Faraday, fue inventada en 1836. Esta estructura consiste en una capa externa compuesta por materiales conductores que permiten la libre circulación de cargas eléctricas. La envoltura puede estar formada por una malla o una carcasa continua del mismo material, lo que le permite bloquear eficazmente los campos eléctricos externos y la electricidad estática.

Esta estructura cerrada está fabricada con material conductor y protegida por un blindaje electrostático, cuya función principal es mantener nulo el campo electromagnético en su interior. Este fenómeno se logra debido a que, al ser expuesta a un campo electromagnético externo, el material conductor se polariza. La polarización induce una carga positiva en la superficie del conductor en la dirección del campo externo y una carga negativa en la dirección opuesta. Como resultado, se genera un campo eléctrico interno de igual magnitud, pero en sentido contrario al campo externo, lo que lleva a la anulación de ambos campos dentro del conductor (Pérez Guilcaso & Tigse Toapanta, 2021).

2.2.1. Aplicaciones

Las Jaulas de Faraday tienen una amplia gama de aplicaciones que las hacen indispensables en diversos campos. Por ejemplo, se utilizan para proteger equipos y sistemas

de interferencias electromagnéticas, así como para permitir la realización de experimentos científicos en entornos controlados. La Tabla 1 presenta algunos ejemplos de aplicaciones de una Jaula de Faraday, como microondas, smartphones, trajes de protección y sistemas de seguridad contra relámpagos.

Tabla 1

Aplicaciones de una jaula de Faraday

Aplicaciones	Detalle
Microondas	Calentar alimentos
Smartphone	Elimina interferencias y ruidos
Trajes de protección	Protege su seguridad durante el trabajo con líneas eléctricas de alta tensión. Estos trajes evitan que sufran una descarga eléctrica.
Seguridad contra relámpagos	Los aviones pueden encontrarse ocasionalmente en una tormenta eléctrica y sirve para proteger a los ocupantes de su interior.

Nota. Tomada de (Pérez Guilcaso & Tigse Toapanta, 2021)

2.3. Cámara Anecoica

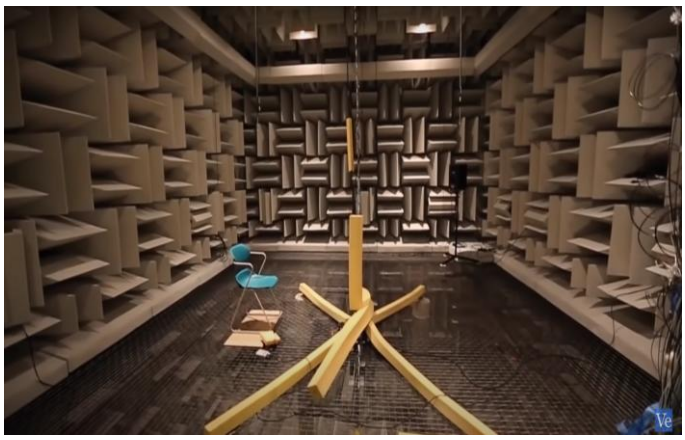
Una cámara anecoica es un recinto que permite absorber las reflexiones producidas por ondas electromagnéticas o acústicas, ya sean provenientes del exterior o generadas dentro de la cámara anecoica. En estas salas, las paredes, el techo y el suelo están cubiertos con materiales que absorben radiaciones electromagnéticas, eliminando cualquier tipo de reflexión de las ondas. Estos materiales suelen estar compuestos de conos de esponja de carbono, placas de ferrita o una combinación de ambos, y su calidad se mide por su capacidad para minimizar las reflexiones según la frecuencia. La reflectividad, definida como la proporción entre la potencia

de la onda reflejada y la onda incidente, debe ser inferior a -30 dB en todo el rango de frecuencias de trabajo para asegurar el buen funcionamiento de la cámara anecoica (Miranda et al., 2002).

En Estados Unidos se encuentra una de las mejores cámaras anecoicas, destacada por su eficiencia en absorber las reflexiones y eliminar ecos acústicos, según (Londeix, 2020). Esta cámara, diseñada por Hundraj Gopal para Microsoft, fue construida en aproximadamente dos años. Gopal la compara con una "cebolla" debido a su construcción en múltiples capas de hormigón y acero, lo que permite crear un ambiente completamente silencioso. Esta cámara anecoica de Microsoft es utilizada para investigaciones y pruebas de diversos productos, como altavoces, micrófonos, amplificadores y tecnologías de asistentes de voz. En la Figura 5 se puede ver una estructura en el centro de la sala, utilizada como soporte para un dispositivo que está puesto en prueba, junto a una silla destinada al investigador. Además, elementos como la iluminación, puertas adecuadas, y un piso falso son imprescindibles para garantizar el funcionamiento y la efectividad de la cámara anecoica.

Figura 5

Cámara anecoica de Microsoft



Nota. Tomado de (Londeix, 2020)

2.3.1. Aplicaciones de una cámara anecoica en ámbito de las Telecomunicaciones

La cámara anecoica corresponde a un entorno controlado donde se eliminan de manera regulado las reflexiones internas y la interferencia electromagnética proveniente del exterior, permitiendo que cualquier medición electromagnética represente únicamente el comportamiento del dispositivo evaluado. En el área de las telecomunicaciones, este tipo de recinto es indispensable garantizar el cumplimiento de normativas como, por ejemplo, la evaluación del desempeño inalámbrico de dispositivos móviles, y la obtención de métricas puras de transmisión como throughput, retardo, jitter, etc. La certificación de estas aplicaciones se sustenta en normas internacionales, entre las que destacan CISPR 16-1-4, ANSI C63.4, ETSI TS 103 052, IEC 61000-4-3, los planes de prueba CTIA y las especificaciones 3GPP para LTE y 5G. Entre sus aplicaciones se tiene:

- **Caracterización de antenas:** La caracterización de antenas sigue la metodología establecida en ETSI TS 103 052, la cual define que debe medirse la ganancia absoluta, el patrón de radiación y otros parámetros esenciales de una antena en un entorno libre de perturbaciones. Esta norma exige, que las mediciones de ganancia se realicen aplicando el método de sustitución, lo que implica que primero se debe medir la potencia recibida utilizando una antena patrón con ganancia conocida, manteniendo constante la distancia entre transmisor y receptor. Posteriormente, la antena certificada se sustituye por una antena bajo prueba (AUT) sin modificar ningún parámetro inicial, como, por ejemplo, la potencia de transmisión, la posición ni la polarización. La ganancia absoluta se obtiene comparando el nivel recibido con el de la antena de referencia. La distancia entre el transmisor y la AUT debe estar dentro de la región de campo lejano. Además, establece que el barrido angular debe cubrir un rango completo de 360° en el plano azimutal y, cuando se requiera un patrón tridimensional, debe incluir variaciones en el plano de elevación. La potencia medida debe corregirse

considerando el factor de antena del receptor, las pérdidas de los cables y los niveles reales del generador.

- **Evaluación del desempeño en dispositivos inalámbricos**: La evaluación del desempeño inalámbrico se basa en los procedimientos del CTIA Test Plan, que define las pruebas necesarias para medir la Potencia Total Radiada (TRP) y la Sensibilidad Isotrópica Total (TIS) de un dispositivo móvil. La norma CTIA Test Plan indica que para medir la potencia radiada total, el dispositivo debe transmitir mientras se registra la potencia recibida desde todos los ángulos espaciales, ya sea mediante un barrido en un sistema giratorio tridimensional o utilizando un arreglo de múltiples antenas; posteriormente, la potencia debe integrarse en todo el espacio para obtener la potencia radiada total real del equipo. Para medir la sensibilidad isotrópica total, el dispositivo debe recibir señales provenientes de un emulador de red cuya potencia disminuye progresivamente hasta que se alcanza un nivel de error de bloque (BLER) del 1% o 2%, valor que CTIA define como referencia de sensibilidad. Además, esta norma CTIA Test Plan menciona que, las mediciones deben realizarse un barrido obligatoriamente de 0° a 360° en azimut y 0° a 180° en elevación.
- **Métricas de rendimiento en 802.11:** RFC 2544 establece un procedimiento estructurado para medir el rendimiento real de un dispositivo o enlace de red utilizando tráfico sintético, generado por un instrumento de prueba o software especializado. Cada métrica se obtiene mediante un proceso específico: para throughput, se envían tramas a diferentes tasas crecientes hasta encontrar la velocidad máxima a la que no se pierde ningún paquete; para latencia, se inyectan tramas marcadas y se mide el tiempo de ida y vuelta (RTT) entre transmisión y recepción; para pérdida de paquetes, se comparan las tramas enviadas contra las recibidas mientras se somete al enlace a distintas cargas de tráfico; para jitter, se analiza la variación entre los tiempos de llegada consecutivos

de los paquetes; y para back-to-back frames, se envían ráfagas de tramas sin intervalos para identificar cuántas puede procesar el equipo antes de descartar alguna. Todas estas pruebas se realizan usando múltiples tamaños de trama (64, 128, 256, 512, 1024, 1280, 1518 bytes), con el fin de obtener una evaluación completa y comparable del comportamiento del equipo bajo distintas condiciones operativas.

2.3.2. Tipos de cámara anecoicas

En la década de 1950, comenzaron a utilizarse las salas anecoicas. Diez años después, avanzaron con las investigaciones lo que permitieron avances significativos a nivel comercial en la creación de materiales absorbentes, y se incorporaron técnicas innovadoras para diseñar la geometría de las cámaras anecoicas (Pinto Ballesteros, 2004).

En la actualidad, las cámaras anecoicas se han vuelto comerciales debido a la necesidad de realizar pruebas precisas en dispositivos electrónicos como, por ejemplo, teléfonos móviles, antenas y equipos de audio, garantizando su rendimiento y cumplimiento de normas de compatibilidad electromagnética. A continuación, se muestra los diferentes tipos de cámaras anecoicas más comunes: rectangulares, de estrechamiento progresivo y semi-anecoicas.

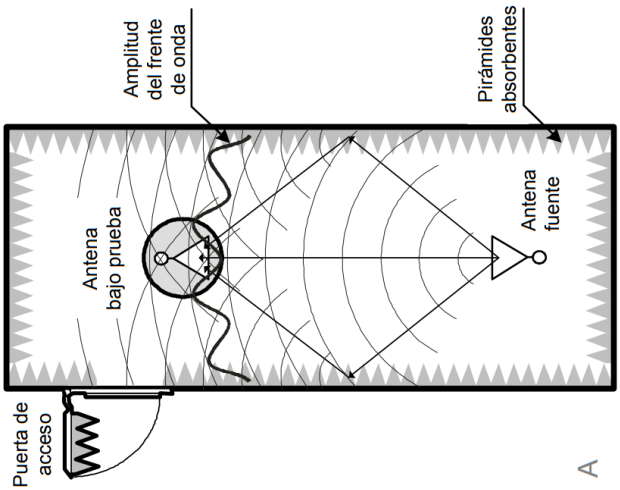
2.3.2.1. Camara Anecoica Rectangular

Una cámara de tipo rectangular crea un ambiente similar al campo libre, lo que permite eliminar completamente el sonido y las ondas electromagnéticas, ya sean que prevengan del exterior o internas. Permite realizar mediciones precisas en diferentes dispositivos que están siendo puesto a prueba. Al contar con una geometría cuadrada, permite que los elementos estén organizados de la mejor manera. Esta geometría cuadrada hace que la construcción sea más sencilla y eficiente, al momento de implementar los materiales absorbentes en las parades. En la Figura 6, muestra el diseño de una cámara anecoica rectangular que está siendo utilizada para pruebas electromagnéticas. Una antena de prueba emite señales electromagnéticas en el centro de la cámara anecoica. Las paredes se encuentran recubiertas con materiales absorbentes

que evitan las reflexiones internas, simulando un ambiente de campo libre. Lo que aseguran que las ondas electromagnéticas no reboten y sean absorbidas de manera efectiva, lo que brinda una mejor medición en la antena de prueba.

Figura 6

Cámara anecoica rectangular



Nota. Tomada de (Brégains, 2007)

Este tipo de cámaras anecoicas rectangulares se utiliza principalmente para la calibración de antenas, donde se deben realizar las siguientes mediciones bajo la condición de campo lejano. La Ec 5, muestra la fórmula para calcular la longitud del rango de medición, donde una antena receptora de prueba se encuentra a una distancia específica de la antena emisora. En esta fórmula, R representa la longitud del rango de medición, D es la dimensión máxima de la antena y λ la longitud de onda.

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \qquad \text{(Ec. 5)}$$

En caso de no conocer el valor de λ, este se puede calcular mediante la Ec.6, donde v corresponde a la Velocidad de la luz y f es la Frecuencia con la que se va a trabajar.

$$\lambda = \frac{v}{f} \qquad \text{(Ec. 6)}$$

Para determinar el valor del ancho de la cámara anecoica, se calcula mediante la Ec.7, donde W representa el ancho de la cámara anecoica y R es la longitud del rango de medición, que corresponde a la distancia entre la antena receptora de prueba y la antena emisora.

$$W > \frac{R}{2} \qquad \text{(Ec. 7)}$$

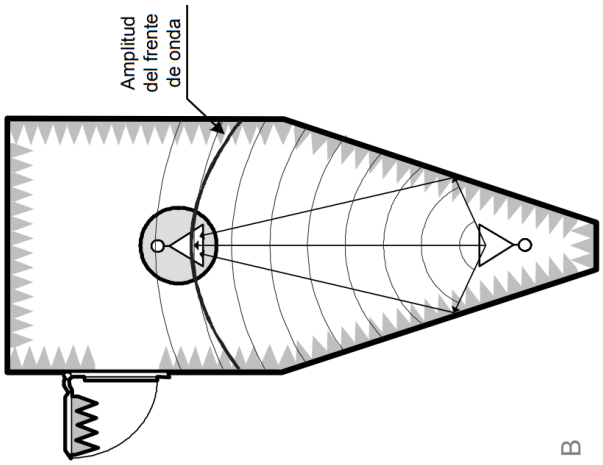
2.3.2.2. Camara Anecoica de Estrechamiento progresivo

Durante los últimos 45 años, se han utilizado cámaras anecoicas, particularmente las de estrechamiento progresivo, para abordar los problemas que enfrentaban las cámaras rectangulares a frecuencias VHF y UHF, especialmente por debajo de 500 MHz (Rodríguez, 2012). Las cámaras tradicionales tenían dificultades para eliminar reflexiones en estas frecuencias debido a la mayor longitud de onda de las señales, lo que requería mejores materiales absorbentes y un diseño optimizado.

Las cámaras de estrechamiento progresivo son de geometría cónica, lo que permiten obtener un frente de onda más uniforme en la zona de prueba. Este diseño coloca la fuente de antena cerca del vértice de la pirámide, generando un patrón de interferencia con variaciones lentas (Brégains, 2007). La Figura 7 muestra un diseño cónico con materiales absorbentes de tipo pirámide en sus paredes, con dos antenas de prueba ubicadas en distintas secciones de la cámara anecoica, de mediciones en diversas áreas, abarcando tanto la acústica como la electromagnética.

Figura 7

Cámara anecoica tipo cónica



Nota. Tomada de (Brégains, 2007)

Debido al diseño cónico, se logra reducir las reflexiones en el interior de la cámara anecoica, lo que conduce a la creación de un entorno sin interferencias. Esta ausencia de interferencias posibilita la realización.

2.3.2.3. Cámara Semi-Anecoica

Una cámara semi-anecoica es un espacio cerrado diseñado para cumplir con los requisitos de campo libre para el sonido, lo que significa que las ondas acústicas pueden moverse en todas direcciones sin obstrucciones ni reflejos. La característica "semi" se debe a que una de sus superficies internas es reflectante, a diferencia de una cámara anecoica donde todas las superficies son absorbentes. Debido a su particularidad acústica, requiere un revestimiento especial absorbente en las paredes internas para minimizar el ruido, así como un buen aislamiento contra ruidos y vibraciones externas (Cruz Altamirano, 2009).

2.3.2. Materiales Absorbentes

Los materiales absorbentes desempeñan un papel importante en la eliminación de ondas sonoras y electromagnéticas, y se clasifican en diversas categorías según su estructura y propiedades. Entre ellos, los absorbentes híbridos, que combinan ferrita y materiales

dieléctricos, destacan por formar capas capaces de absorber un amplio rango de frecuencias. Estos materiales, diseñados en formas de cuñas o pirámides permiten aumentar la superficie de absorción, y son reconocidos por su ligereza y flexibilidad.

Además de los absorbentes híbridos, hay de otros tipos. Por ejemplo, las baldosas de ferrita, eficientes en absorber frecuencias que van desde los 30 Hz hasta los 1000 MHz, caracterizados por su resistencia al fuego y la humedad. Por otra parte, las cuñas absorbentes de tipo Cremer y Wedge, son utilizados para diferentes rangos de frecuencias. Finalmente, los materiales absorbentes en forma de rollos y pirámides se destacan por su capacidad de absorber ondas electromagnéticas en un amplio espectro de frecuencias, ofreciendo soluciones versátiles y efectivas para una variedad de aplicaciones (Hemming, 2002).

- Absorbentes híbridos

La combinación de ferrita y material dieléctrico dan como resultado un absorbente hibrido con propiedades para absorber tanto sonido como ondas electromagnéticas (Hemming, 2002). Están diseñados con múltiples capas, cada una diseñada para absorber un rango específico de frecuencias. Las combinaciones que se pueden realizar son:

- Espumas acústicas: ligeras y porosas, ideales para absorber sonidos de alta frecuencia.
- Materiales viscoelásticos: cuentan con propiedades de amortiguamiento para la absorción de vibraciones y sonidos de baja frecuencia.
- Conductores: comúnmente se usa láminas metálicas o ferritas para absorber y atenuar las ondas electromagnéticas.

Los materiales absorbentes híbridos pueden diseñarse en formas como cuñas o pirámides para incrementar la superficie de absorción y mejorar su eficacia en un amplio rango de frecuencias. Asimismo, es posible encontrarlos en formatos como paneles planos o láminas flexibles, lo que facilita su instalación en diversas superficies (Pinto Ballesteros, 2004).

- Baldosas de ferrita

Las baldosas de ferrita presentan dos configuraciones geométricas. La primera es una estructura simple con un espesor de 6 mm y una superficie de 100 m². La segunda tiene forma de cuadrícula, con dimensiones de 2.54 mm y 1.27 mm. Este tipo de baldosas es eficiente, ya que permite absorber frecuencias de 30 Hz a 1000 MHz. Además, poseen la propiedad de ser inmunes al fuego, la humedad y diferentes químicos (Pinto Ballesteros, 2004).

- Absorbente en forma de cuñas

Como expresan (Barrionuevo & Gonzalez, 2012), existen dos tipos de cuñas acústicas: de tipo Cremer y las de tipo Wedge. Las cuñas Cremer, son utilizadas principalmente para la absorción de altas frecuencias, están diseñadas con una estructura compleja que se conforma de fibra de vidrio y lana de vidrio de diferentes densidades, lo que minimiza las reflexiones gracias a su forma tubular. Aunque su construcción es costosa, ofrecen una mayor eficacia en la reducción de reflexiones. Por otro lado, las cuñas Wedge, son las más comunes en cámaras anecoicas debido a su menor costo y facilidad de montaje, mantienen una densidad uniforme y son más eficaces en la absorción de bajas frecuencias.

- Absorbente en forma de rollos

La empresa Microwave Vision Group ofrece materiales absorbentes fabricados a partir de una espuma de poliuretano ligera impregnada con una mezcla de carbono que incluye retardantes en caso de incendios. La superficie frontal de estos absorbentes está ondulada, lo que permite una buena correspondencia con las ondas electromagnéticas que llega a los materiales absorbentes. Además, el revestimiento de estos absorbentes no afecta sus prestaciones de RF.

El diseño ondulado de la superficie, cuando está correctamente colocado en la estructura de la cámara anecoica, muestra una absorción sobresaliente en el rango de los milímetros, especialmente a amplios ángulos de incidencia. Además, este material en forma de

rollo posee propiedades deseables para aplicaciones que requieren alto rendimiento de reflectividad junto con bajas características de dispersión hacia adelante, lo que significa que reflejan las ondas de manera eficiente y reducen la dispersión en la dirección de la onda incidente. Este tipo de material es usado para frecuencias desde los 3GHz hasta los 40 GHz y la altura es de 3.8cm a 10.2cm.

- Absorbente Piramidal

Los materiales absorbentes en forma de pirámide tienen una característica clave para su eficiencia: la altura del pico. A mayor altura de la pirámide, mayor es la absorción de ondas electromagnéticas. Las pirámides más utilizadas tienen una altura de 0.61 metros, aunque pueden variar entre 0.1 metros y 3 metros. Para trabajar con frecuencias bajas, se requieren pirámides de aproximadamente 3 metros de altura. La selección de la altura adecuada de las pirámides depende tanto de la frecuencia de trabajo como del espacio disponible, especialmente cuando se necesitan pirámides de 3 metros para las frecuencias más bajas (Esparza Becerra, 2012).

2.3.3. *Otros Componentes*

Las cámaras anecoicas están diseñadas con elementos clave para asegurar un entorno libre de interferencias y reflexiones. El piso falso suspendido facilita el paso de cables y soporta cargas pesadas sin comprometer la integridad acústica. Las puertas, con sellos electromagnéticos y acústicos; los sistemas de ventilación, revestidos con materiales absorbentes, minimizan el ruido y las vibraciones. Las acometidas eléctricas incluyen filtros para eliminar interferencias; la iluminación LED, eficiente y de baja emisión electromagnética, evita el sobrecalentamiento. Finalmente, los sistemas contra incendios protegen los equipos electrónicos sensibles dentro de la cámara.

- Piso falso

Estos pisos están suspendidos sobre el suelo estructural de la cámara anecoica mediante amortiguadores de vibraciones y soportes especializados, lo que permite la absorción tanto de ondas sonoras como electromagnéticas. La estructura del piso flotante generalmente se compone de paneles fabricados con materiales como acero galvanizado o aluminio.

El diseño del piso flotante debe facilitar el paso de cables de equipos o cables eléctricos sin comprometer la integridad anecoica de la cámara. Además, estos pisos están diseñados para soportar cargas pesadas sin deformarse, garantizando así una plataforma estable para los dispositivos de medición y equipos en prueba (ETS-Lindgren, 2003).

- Puertas

Las puertas de las cámaras anecoicas están diseñadas para evitar fugas de ondas sonoras o electromagnéticas que puedan comprometer la precisión de las mediciones. Estas puertas son construidas generalmente por materiales absorbentes, como acero recubierto con espuma de poliuretano o ferritas. Además, incorporan sellos electromagnéticos y acústicos que garantizan un cierre hermético.

Existen dos tipos principales de puertas en el mercado: las puertas con bisagra y las puertas corredizas. Las primeras son más adecuadas para cámaras anecoicas de menor tamaño y uso menos intensivo, ya que permiten un acceso rápido y fácil. Sin embargo, pueden ser menos efectivas en el aislamiento debido a posibles puntos de fuga en las bisagras. A diferencia de las puertas corredizas son ideales para cámaras más grandes y de uso intensivo, ofrecen un mejor sellado y menor desgaste mecánico con el tiempo, lo que las hace más duraderas y eficientes (Pinto Ballesteros, 2004).

- Ventilación

Estos sistemas de ventilación permiten la circulación adecuada del aire, controlando tanto la temperatura como la humedad dentro de la cámara anecoica. Para lograrlo, se emplean

conductos y ventiladores silenciosos que minimizan la generación de ruido y vibraciones. Los conductos de ventilación suelen estar revestidos con materiales absorbentes y cuentan con configuraciones especiales, como curvas y atenuadores de ruido, para evitar la introducción de ondas sonoras y electromagnéticas desde el exterior.

Para reducir la presencia de polvo en los conductos de ventilación, es necesario instalar un precipitador electrostático, que captura el polvo e impide que este altere las características del material absorbente poroso ubicado dentro del conducto (Barrionuevo & Gonzalez, 2012).

- Acometidas

El fabricante (Holland Shielding Systems Bv, 2024), establece que las acometidas en una cámara anecoica son esenciales para mantener un entorno libre de interferencias y reflexiones. Estos filtros de línea eléctrica, alojados en carcasas de tres compartimentos con cubiertas atornilladas y terminales accesibles, logran una pérdida de transmisión de inserción de 100 dB a 14 kHz y superiores, lo que asegura la integridad de las mediciones.

Además, su circuito doble simétrico con núcleos de varilla de alta calidad proporciona inductancia sin saturarse y es insensible a cargas asimétricas. La correcta fijación de la carcasa del filtro a la habitación protegida asegura su funcionamiento, proporcionando un montaje estable y una excelente conexión a tierra.

- Iluminación

Los focos tradicionales, al estar muy cerca de los materiales absorbentes, desprenden mucho calor, lo que provoca un gran problema dentro de la cámara anecoica. Este calor excesivo puede calentar los materiales absorbentes hasta temperaturas elevadas, causando daños en su estructura. Por esta razón, se están utilizando luces LED, que destacan por su baja emisión de ruido electromagnético y alta eficiencia energética. Además, la iluminación debe ser uniforme para evitar sombras y áreas con poca o excesiva luz. Las luces LED también deben

estar adecuadamente apantalladas para prevenir la emisión de interferencias electromagnéticas (Esparza, 2017).

- Sistema contra incendios

Los sistemas contra incendios en cámaras anecoicas son fundamentales debido a la inflamabilidad de los materiales absorbentes y la presencia de equipos electrónicos sensibles, lo cual puede causar daños en dispositivos electrónicos de alto costo. Estos sistemas deben incluir detectores de humo, calor y gases para una detección temprana, y utilizar métodos de supresión no conductivos y no corrosivos, como por ejemplo el Inergen, CO2, FM-200 o Novec 1230. Estos tipos de extintores no dejan residuos y son seguros para los equipos electrónicos. Además, los materiales absorbentes deben cumplir con estándares de resistencia al fuego y ser retardantes de llama (Hemming, 2002).

2.4. Fundamentos de Antenas

Las antenas son elementos que permiten transformar señales eléctricas en ondas electromagnéticas y viceversa. Tienen la capacidad de emitir o receptar radiación electromagnética en un rango especifico de frecuencias. Su principio de funcionamiento se basa en la aceleración de cargas eléctricas, en donde se generan campos eléctricos y magnéticos que se propagan en el espacio. El diseño y las características de una antena son los principales elementos en el rendimiento de los sistemas de transmisión y recepción, debido a que se determinan parámetros como impedancia, polarización, ancho de banda y ganancia (Murillo Fuentes, 2007).

Una antena emisora transforma corrientes eléctricas en ondas electromagnéticas, mientras que una antena receptora realiza el proceso inverso, convierte las ondas electromagnéticas en corrientes eléctricas. Dicho funcionamiento permite que hoy en día sea posible comunicarse de forma inalámbrica mediante dispositivos como radios, TV, celulares móviles, entre otros (Huidobro, 2013).

De acuerdo con (Huidobro, 2013), los parámetros de una antena se comportan de la misma forma tanto en emisión como recepción y se caracterizan por tener ancho de banda, directividad, ganancia, rendimiento, impedancia, anchura de haz y polarización, a continuación, se describe cada uno de ellos:

- Ancho de banda: corresponde al rango de frecuencias en el que la antena presenta una buena adaptación.
- Directividad: se define como la división entre la densidad de potencia irradiada en la dirección de máxima radiación, a una distancia R, y la potencia total radiada por el área de una esfera de radio. Si la directividad es alta, indica una antena direccional, con un lóbulo principal y lóbulos secundarios pequeños. Mientras que, si la directividad es baja, indica una antena omni-direccional, lo que significa que la antena irradia o recibe en múltiples direcciones con niveles de potencia muy parecidos, dando como resultado baja ganancia.
- Ganancia: mide cuanta potencia se concentra en una dirección especifica, a diferencia con una antena ideal isotrópica que emite en todas las direcciones. Se define como $G = D \times \eta$, donde D es la directividad y η corresponde a la eficiencia de la antena.
- Rendimiento de una antena: se define como la división entre la potencia radiada y la potencia de entrada total. La potencia de entrada es igual a la suma de la potencia radiada (energía que la antena irradia en forma de ondas electromagnéticas) más la potencia de perdidas (energía que se disipa en forma de calor, acoplamientos incorrectos, conectores, etc,).
- Impedancia: se describe como $Z_{antena} = R + jX$, donde R (parte resistiva) hace que la corriente se convierta en ondas electromagnéticas, mientras que jX (parte reactiva) corresponde a la energía almacenada temporalmente en los

campos eléctricos o magnéticos. Cuando X=0, la antena está en resonancia y la potencia suministrada se irradia casi por completo como onda electromagnética, pero si es diferente de cero, parte de la energía se almacena en forma de campo reactivo y se devuelve al transmisor, provocando reflexiones. Para que la antena transmita o recepte de manera óptima, su impedancia debe coincidir o aproximarse a la de la línea de alimentación, caso contrario puede haber perdidas de potencia y en los equipos pueden causar daños.

- Anchura de haz: es el ángulo en el cual la intensidad de radiación en el lóbulo principal se reduce a la mitad de su valor máximo (-3dB) en cada extremo.
- Polarización: corresponde a la orientación del campo eléctrico de la onda que transmite o recibe, por ejemplo: vertical, horizontal, circular o elíptica. Para que la transmisión de la señal sea con eficacia, la antena emisora y la receptora deben ser de la misma polarización, caso contrario, gran parte de la señal se pierde.

2.4.1. Clasificación de Antenas

En la actualidad, existe una gran diversidad de tipos de antenas dependiendo de su uso al que van a ser destinadas. En algunos casos deben expandir lo máximo que sea posible la potencia radiada, es decir, irradia en todos los sentidos como, por ejemplo; una emisora de radio, TV o una estación móvil. Otras veces debe ser directivas para canalizar mejor la potencia y no interferir a otros servicios. Además, para definir el tamaño de la antena debe ser en base a la longitud de onda de la señal, por lo general sus dimensiones son múltiplo de la longitud de onda para funcionar adecuadamente (Huidobro, 2013).

A continuación, se presentan los diferentes tipos de antenas:

- Antenas de hilos: están elaboradas por hilos conductores, su diámetro es menor a la longitud de onda. Suelen estar formados por hilos rectos (dipolos, rombos), espirales (circular, cuadrada) y hélices.
- Antenas según su uso y directividad
  - Omnidireccionales: irradia en todas las direcciones. Por ejemplo: radio, TV, estación de base móviles, etc.
  - Direccionales: irradia en un solo sentido, de esta forma, se evita que exista interferencia con otros servicios
- Antena isotrópica: no tiene perdidas e irradia con igual intensidad en todas las direcciones.
- Antenas Yagi-Uda: diseñadas con un elemento activo y varios elementos pasivos que ofrecen alta ganancia, por ejemplo, antenas de TV.
- Antenas planas (microstrip o patch): elaborados con un parche metálico impreso acoplado a un sustrato dieléctrico y a un plano de tierra. Tienen un ancho de banda limitado.
- Arrays: grupo de antenas en geometrías lineales, planas o en fase variable. Permiten apuntar el haz electrónicamente sin mover su estructura.
- Antenas MIMO: utiliza varias antenas en el transmisor y el receptor para aprovechar las señales que se reflejan en edificios, árboles y otros obstáculos, en lugar de considerarlas interferencias; de esta forma, cada antena capta versiones ligeramente desfasadas de la señal original y el receptor las combina o separa para aumentar la velocidad de datos y mejorar la cobertura.

2.4.2. Eficiencia de Antena

La eficiencia de una antena (η) mide que parte de la potencia que se suministra al puerto de la antena realmente se irradia como onda electromagnética, en lugar de disiparse en forma

de calor u otras perdidas internas. Una antena con una eficiencia alta garantiza que la mayor parte de las ondas electromagnéticas se irradien de mejor manera en el espacio. La eficiencia se mide en valores entre 0 y 1, donde 1 representa una antena eficiente que irradia toda la potencia suministrada (Monachesi et al., 2011). En la Ec. 8 se indica la eficiencia (η), donde P_{rad} es la potencia que la antena irradia efectivamente en el espacio y P_{in} corresponde a la potencia que se entrega al puerto de la antena. Ambos parámetros son medidos en vatios.

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \qquad \text{(Ec. 8)}$$

La eficiencia se ve afectada principalmente por tres tipos de pérdidas:

- Pérdidas resistivas: Se producen en los conductores de la antena debido a la resistencia propia del metal. A altas frecuencias se disipa la energía en calor en las zonas superficiales del conductor.
- Pérdidas dieléctricas: la energía se disipa en forma de calor debido a la absorción de potencia por parte de los materiales aislantes que pueden estar dentro o fuera de la estructura de la antena.
- Pérdidas de acoplamiento y de superficie: Se originan cuando elementos metálicos cercanos (soportes, carcasas, tornillos) inducen corrientes parásitas o provocan reflexiones que desvían energía de la radiación útil.

Otra forma de expresar la eficiencia, basada en las resistencias de la antena se realiza con la Ec. 9. Donde R_{rad} es la resistencia de radiación (resistencia que convierte corriente en campo radiado) y R_{loss} que corresponde a la agrupación de todas las resistencias que causan perdidas, por ejemplo: conductores, pérdidas dieléctricas, pérdidas por acoplamiento, etc.

$$\eta = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{loss}} \qquad \text{(Ec. 9)}$$

Si el resultado de R_{loss} es equivalente a cero, la eficiencia de la antena es del 100%, es decir, su valor es 1. Desde el punto de vista del diseño, minimizar estas pérdidas implica elegir metales de conductividad alta (cobre, aluminio), utilizar sustratos dieléctricos con baja constante de pérdidas y verificar cuidadosamente la proximidad de otros objetos metálicos.

2.4.3. Patrón De Radiación

Según (Balanis, 2005), el diagrama o patrón de radiación de una antena es una representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en funcion de las coordenadas espaciales. En la práctica, se evalúa en la región de campo lejano y por lo general se expresa en coordenadas esféricas (r, θ, φ), identificando la variación de la densidad de potencia. La intensidad de radiación o la magnitud del campo eléctrico o magnético en funcion de la dirección de la observación. Se basa en dos tipos de patrones:

- Patrón de campo:
    - Se obtiene trazando la magnitud del campo eléctrico o magnético en funcion del ángulo.
    - Se representa como $|E(\theta, \varphi)|$, en escala lineal.
- Patrón de potencia:
    - Corresponde al cuadrado de la magnitud del campo eléctrico o magnético, $|E(\theta, \varphi)|^2$.
    - Se puede graficar en escala lineal o en escala logarítmica.

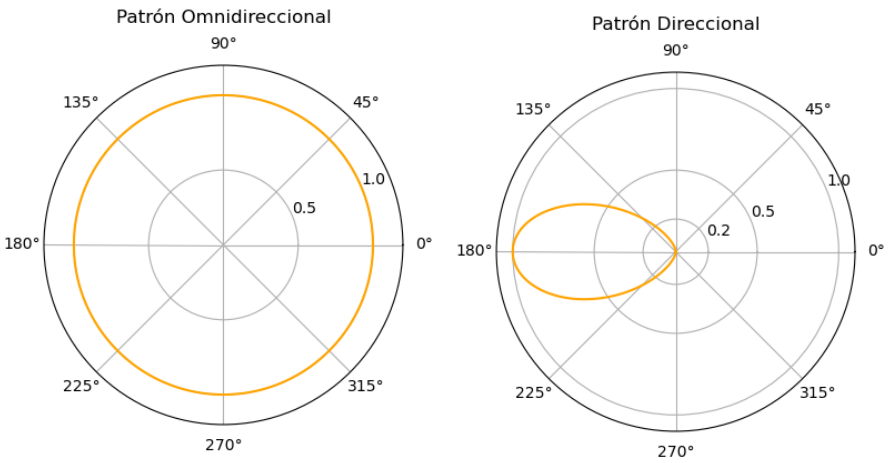
Dentro de los patrones de radiación, las antenas se clasifican en omnidireccionales y direccionales según su comportamiento angular. En una antena omnidireccional, en el plano azimut, la distribución de la intensidad se mantiene constante, lo que significa que la energía emite en todas las direcciones. En el plano de elevación, la ganancia varia de modo que la mayor parte de la energía se concentra alrededor de los 0°. Por su parte, un patrón direccional se caracteriza por concentrar gran parte de su energía en una dirección en específico,

identificando de mejor manera su lóbulo principal de radiación y reduciendo la energía radiada en todas las direcciones.

En la Figura 8-a se muestra el patrón de radiación de una antena omnidireccional en el plano azimut (0° a 360°), donde el radio se mantiene constante, lo que indica que la energía emite en todas las direcciones. Por otra parte, en la Figura8-b muestra una antena direccional, que concentra la mayor parte de su energía en una dirección especifica, formando un lóbulo principal.

Figura 8

Comparación del patrón de radiación en 2D: omnidireccional y direccional



(a) *(b)*

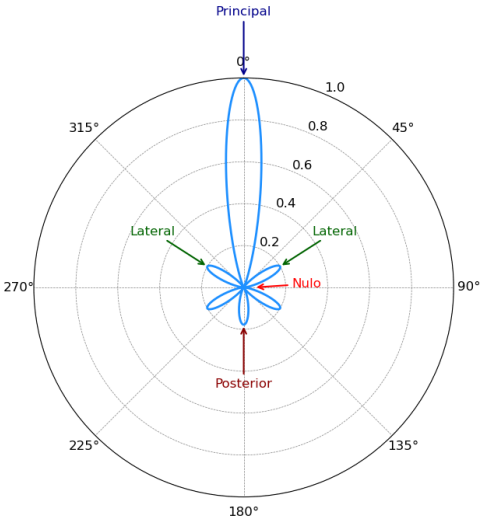
Al analizar un patrón direccional, aparecen distintos tipos de lóbulos: lóbulo principal corresponde a la región en donde se concentra la máxima radiación. La forma y anchura de este lóbulo reflejan la directividad de la antena; un lóbulo muy estrecho implica gran directividad y alta ganancia. Los lóbulos secundarios: si están situados en ángulos cercanos al lóbulo principal se denominan lóbulos laterales, si aparecen en la dirección opuesta, se llaman lóbulos posteriores. Estos lóbulos generan radiación no deseada o captación de señales al costado o detrás del haz principal, permitiendo que haya interferencia. Los lóbulos nulos son aquellos donde la antena no radia ni recibe energía. La presencia de estos lóbulos permite reducir la

interferencia procedente de fuentes emisoras, por lo que se aprovechan en aplicaciones que requieren aislarse de emisores cercanos.

En la Figura 9 se muestra el patrón de radiación de una antena direccional, indicando cada uno de sus lóbulos que lo conforman. Además, junto al lóbulo principal se presentan los valores de intensidad relativa, donde el valor 1 indica el nivel máximo de radiación.

Figura 9

Patrón de radiación de una antena direccional



Capitulo III: Prototipo De La Cámara Anecoica Y Ejecución De Pruebas Experimentales

En este capítulo se presentan las dimensiones físicas del prototipo de la cámara anecoica, diseñada para ser utilizada en las prácticas de laboratorio de la carrera de Telecomunicaciones de la Universidad Técnica del Norte. Durante la implementación se consideran los elementos que la conforman, destacando la incorporación de una jaula de Faraday, cuya función es proporcionar apantallamiento electromagnético, evitando la entrada o salida de señales externas e internas que puedan generar interferencias. Adicionalmente, el uso de materiales absorbentes en las paredes internas del prototipo permite reducir significativamente las reflexiones de ondas electromagnéticas, creando así un entorno libre de interferencias. Estas condiciones son importantes para la realización de pruebas experimentales con el kit de laboratorio ME1310 y el analizador de espectro Keysight N9913A FieldFox, tanto en un entorno con interferencias de radiofrecuencia como dentro del prototipo. En dichas pruebas se evalúa la ganancia de una antena operando en la banda de 2.4 GHz, y los resultados obtenidos serán analizados en el siguiente capítulo.

3.1. Jaula de Faraday

La jaula de Faraday es una estructura metálica que protege contra los campos eléctricos estáticos. En su interior, el campo eléctrico es nulo, lo que la hace útil para evitar descargas eléctricas. Fue inventada por el físico británico Michael Faraday, quien descubrió que un material conductor solo mostraba los efectos de una descarga eléctrica en su superficie exterior. Esto indicaba que las cargas dentro del conductor se distribuyen de manera que anula cualquier campo eléctrico interno.

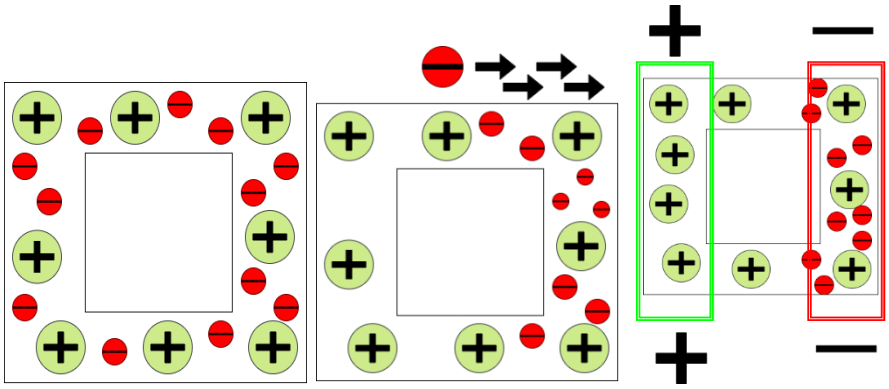
Su funcionamiento se basa en las propiedades de los conductores en equilibrio electrostático. Cuando se coloca una jaula de Faraday en presencia de un campo eléctrico externo, las cargas positivas permanecen en posiciones fijas dentro de la estructura, mientras

que los electrones libres comienzan a moverse debido a la fuerza ejercida sobre ellos. Este movimiento genera un campo eléctrico opuesto al externo, lo que provoca que el campo resultante en el interior de la jaula sea cero. Como resultado, ninguna carga puede atravesarla.

En la Figura 10-a se muestra la distribución de cargas en una jaula de Faraday sin la presencia de un campo eléctrico externo. En esta condición, las cargas libres en el conductor se distribuyen uniformemente en su superficie, manteniendo el interior eléctricamente neutro. Por otra parte, en la Figura 10-b, se indica que, al aplicar una carga externa, las cargas libres dentro del material conductor se redistribuyen, provocando una acumulación de cargas negativas en la zona más próxima a la carga externa, mientras que las cargas positivas se desplazan hacia el lado opuesto de la estructura. Finalmente, en la Figura 10-c se observa que cuando se establece una diferencia de potencial, se genera un campo eléctrico interno que se opone al campo externo. La jaula de Faraday actúa como un blindaje electromagnético, evitando que las variaciones del campo eléctrico externo afecten el interior de la estructura.

Figura 10

Redistribución de Carga en la Jaula de Faraday

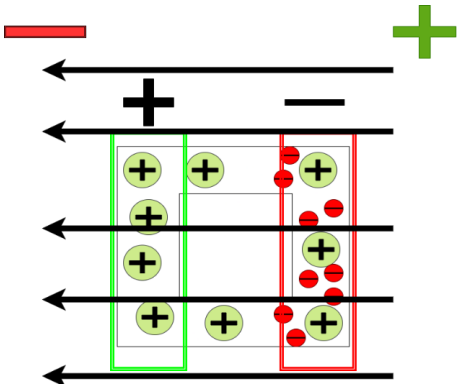


(a) *(b)* *(c)*

En la Figura 11 se muestra cómo una jaula de Faraday responde cuando se expone a un campo eléctrico externo. Las líneas negras representan la dirección del campo eléctrico externo. Dando como resultado la cancelación del campo dentro de la jaula de Faraday.

Figura 11

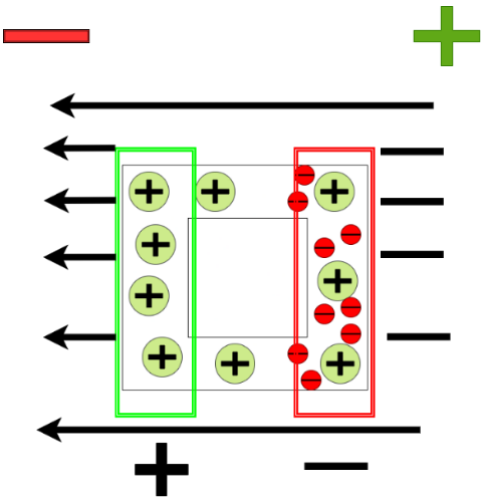
Comportamiento de la jaula de Faraday ante un campo eléctrico externo



Finalmente, en la Figura 12 se muestra el estado final de equilibrio de cargas dentro de la jaula. Aquí, las cargas han alcanzado una distribución estable, garantizando que el campo eléctrico en el interior permanezca nulo. Las líneas del campo eléctrico externo rodean la jaula, pero no logran penetrar en su interior debido a la cancelación que ocurre en la superficie del conductor.

Figura 12

Distribución estable de cargas



Los materiales empleados en la construcción de una jaula de Faraday incluyen principalmente cobre, aluminio, acero inoxidable y acero galvanizado, los cuales sirven para revestir las paredes, el techo y el suelo. Para asegurar conexiones firmes y eficientes, se

emplean pernos de cobre o aluminio, junto con soldadura de aluminio para reforzar las uniones. En caso de detectar pequeños espacios o posibles fugas, se recurre al uso de cinta adhesiva de aluminio, permitiendo así un sellado adecuado y evitando filtraciones no deseadas.

La estructura principal se refuerza con perfiles metálicos, los cuales constituyen la base del soporte estructural, proporcionando estabilidad y resistencia. La aplicación de soldadura de aluminio permite lograr uniones más sólidas y duraderas.

A continuación, en la Tabla 2, se presentan los materiales fundamentales a considerar en la fabricación de una jaula de Faraday, acompañados de una breve descripción y una imagen referencial.

Tabla 2

Materiales principales para la elaboración de una jaula de Faraday

Material	Descripción	Imagen
Soporte metálico	Material estructural que proporciona resistencia en la construcción de diversas estructuras. Largo 6m	
Soldadura	Permite unir distintos componentes metálicos, asegurando estabilidad y firmeza.	
Láminas de aluminio	Utilizados para el recubrimiento.	

Cinta adhesiva de aluminio	Ideal para sellar uniones, cubrir pequeños orificios y reforzar la impermeabilidad en diversas aplicaciones.	

3.2. Prototipo de La Cámara Anecoica

Una cámara anecoica brinda varios beneficios en múltiples aplicaciones. En el área de la ingeniería, permite realizar pruebas de dispositivos de comunicaciones inalámbricas y validar equipos transmisión y recepción entre otros. En el ámbito de la acústica, garantiza la cancelación de ruido total y una mejora en la calidad del sonido, además para el desarrollo e investigación de proyectos novedosos.

Estos beneficios son gracias a su estructura de construcción basada en la jaula de Faraday recubierta en su interior con materiales absorbentes, lo que permite simular un entorno libre de interferencias. Realizando el levantamiento de información, se identifica que en el mercado existen láminas de cobre, aluminio, acero inoxidable, acero galvanizado, zinc, entre otros que permiten realizar esta estructura base para la jaula de Faraday.

La selección del material es importante para garantizar la efectividad del aislamiento electromagnético. Por ejemplo, el cobre es reconocido por sus excelentes propiedades como la alta conductividad eléctrica, maleabilidad y ductilidad, tal como lo menciona (Pellicer Roig, 2024). Sin embargo, su elevado costo dificulta para su uso en proyectos de bajo presupuesto. En este sentido, el aluminio se presenta como una alternativa viable, ya que combina un costo más accesible con buenas propiedades de conducción eléctrica y térmica, además de reflejar adecuadamente la radiación electromagnética, especialmente en el espectro visible, según lo mencionado por (H. Rodríguez, 2024).

La prueba prevista dentro del prototipo de la cámara anecoica se basa en colocar los módulos de transmisión y recepción del kit de entrenamiento ME1310, estos dispositivos se sitúan a una distancia de 50 centímetros para evitar efectos de acoplamiento, interferencias cercanas o distorsiones en el patrón de radiación.

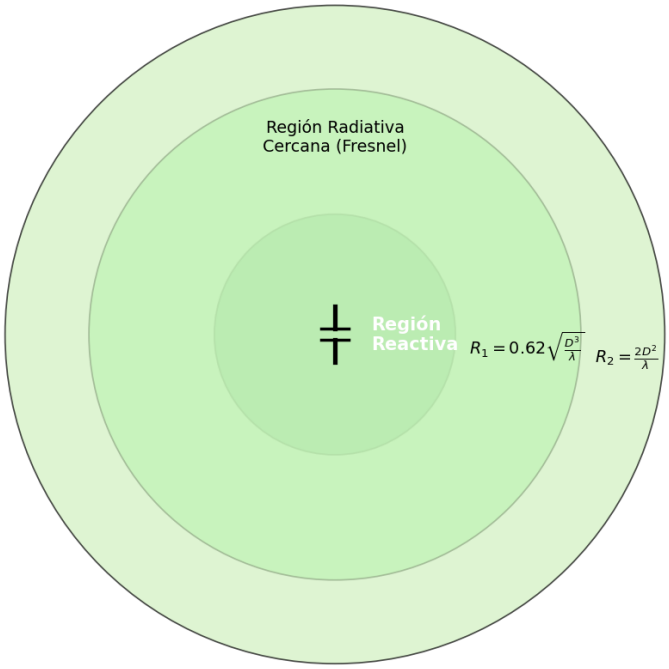
Desde el punto de vista electromagnético, uno de los factores clave en la colocación de los módulos como transmisor y receptor depende de la longitud de onda (λ), la cual está asociada a la frecuencia de operación. Para este caso, se utiliza un par de antenas dipolo que operan en 2.4 GHz. La longitud de onda se expresa mediante la Ec.6 y, desarrollando se obtiene:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8\ m/s}{2.4 \times 10^9\ Hz} = 0.125m = 12.5cm$$

De este modo, una separación de 50 cm entre el transmisor y receptor equivale aproximadamente cuatro longitudes de ondas, lo cual es suficiente para minimizar la presencia de la región reactiva cercana. Esta región se caracteriza por un comportamiento del campo electromagnético donde la energía no se propaga como una onda viajera, sino que permanece en forma de campos almacenados alrededor de la antena. Estos campos pueden interactuar con los elementos cercanos, afectando negativamente la medición del patrón de radiación. Por ello, al mantener una distancia superior a varias longitudes de onda, se garantiza que la medición se realice en condiciones representativas de campo radiado (Lema, 2024). En la Figura 13 se muestra las tres zonas de radiación que se generan alrededor de una antena dipolo. La región reactiva se encuentra junto a la antena, donde los campos no se propagan y solo almacenan energía; esta zona se extiende hasta una distancia $R_1 = 0.62\sqrt{D^3 / \lambda}$ .A continuación, está la región radiactiva cercana o de Fresnel, donde comienza la propagación de la energía, aunque aún no se forma completamente el patrón de radiación, y llega hasta $R_2 = 2D^2/\lambda$. Más allá se encuentra la región del campo lejano, donde la radiación es estable y bien definida.

Figura 13

Región del campo lejano



En este análisis, se utiliza una antena dipolo de 2.4GHz, la cual tiene una distancia física de aproximadamente 6cm. Tomando como referencia la Figura 13, muestra la fórmula para calcular límite superior del campo cercano (R_1) y el inicio del campo lejano (R_2). Al desarrollar, se obtiene los siguientes resultados:

Para R_1:

$$R_1 = 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} = 0.62\sqrt{\frac{(0.06m)^3}{0.125m}} = 2.58cm$$

Para R_2:

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2(0.06m)^2}{0.125m} = 5.76cm$$

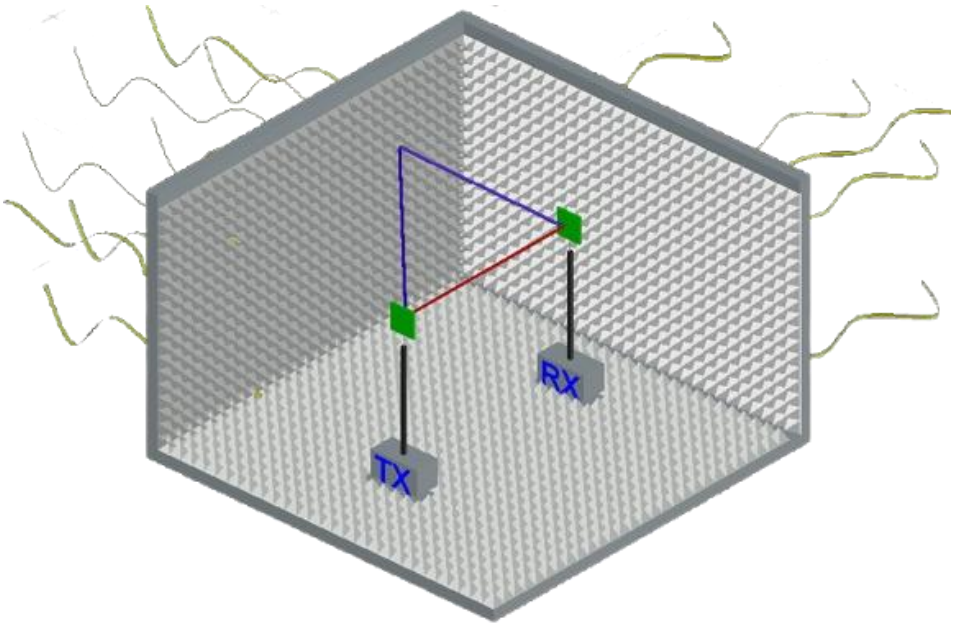
Por lo tanto, a una distancia de 5.76cm correspondiente al inicio del campo lejano, donde es posible realizar mediciones como: patrón de radiación, ganancia, eficiencia, etc.

Por otro parte, las dimensiones con las que cuenta el prototipo de cámara anecoica es 1.5 m de largo, 1.5 m de ancho y 80 cm aproximadamente de alto. Estas medidas aseguran que el espacio sea suficiente para la ubicación de los equipos, así como para la instalación de material absorbente en las paredes interiores.

Para comprender de mejor manera el funcionamiento del prototipo de la cámara anecoica, se presenta en la Figura 14. En ella se muestra dos equipos principales: el transmisor (Tx) y el receptor (Rx), cada uno conectado a una antena dipolo que opera a 2.4GHz. Los rayos de color azul y rojo representan la trayectoria de la propagación de la señal, donde el receptor la recepta con la finalidad de graficar el patrón de radiación de la antena. Además, este prototipo cuenta con un recubrimiento de láminas de aluminio y material absorbente, los cuales actúan como un escudo para que las señales del exterior sean bloqueadas y a su vez las señales internas no puedan propagarse al exterior.

Figura 14

Representación esquemática del funcionamiento de una cámara anecoica



3.2.1. Implementación del Prototipo

Se utiliza un soporte metálico conocido comercialmente como ángulo metálico como estructura base. Este material se selecciona por su favorable relación entre peso y resistencia, además de su buena conductividad eléctrica, lo cual contribuye al adecuado funcionamiento del blindaje electromagnético.

Las platinas de ángulos disponibles en el mercado presentan una longitud estándar de 6 metros. A partir de estos, se recortan en piezas para conformar los marcos superior e inferior del prototipo, como también para columnas horizontales o verticales. La unión para el soporte de la estructura se lleva a cabo mediante soldadura, lo que permite obtener una estructura firme, continua y resistente. El uso de la soldadura proporcionar mayor rigidez estructural y asegurar la continuidad eléctrica entre las partes metálicas, aspecto importante para evitar la formación de discontinuidades que puedan generar filtraciones electromagnéticas.

Una vez ensamblada la estructura base, se procede a colocar láminas de aluminio. Estas se comercializan comúnmente en un tamaño de 1.2 m × 2.4 m, por lo que deben ser cortadas y adaptadas para cubrir por completo el área definida de la estructura. Para las paredes laterales, se elaboran cuatro piezas de 0.8m × 1.5 m, mientras que para la parte superior e inferior se necesita piezas cuadradas de 1.5 m × 1.5 m. Estas se fijan directamente a la estructura mediante remaches y silicona, los cuales permiten una unión firme y permanente entre dos o más láminas de aluminio.

Los materiales absorbentes empleados en el prototipo de la cámara anecoicas son de gran importancia, debido a que son los elementos principales los cuales permiten minimizar las reflexiones dentro de la estructura. Su diseño geométrico piramidal permite absorber las ondas electromagnéticas y acústicas, evitando que se reflejen y generen interferencias en las mediciones realizadas dentro de la misma.

Por lo general, la gran mayoría de fabricantes emplean materiales de poliuretano. Tomando como ejemplo el fabricante (Holland Shielding Systems BV, 2025), que establece que los materiales utilizados en la fabricación de estos absorbentes se basan principalmente en espumas de poliuretano en forma de pirámides o cuñas, las cuales son eficaces en la absorción de ondas acústicas y electromagnéticas.

En el interior, el revestimiento se realiza con material absorbente piramidal, cuyas piezas miden 30 cm × 30 cm con un espesor aproximado de 5 cm. Este material se coloca en paredes laterales y el techo del prototipo mediante cinta de doble faz. El piso no se recubre, ya que el relieve piramidal generara desniveles no deseados que dificultan el posicionamiento adecuado de los equipos durante la medición del patrón de radiación.

Para permitir el paso de cables de alimentación o señal hacia el transmisor y receptor ubicado dentro de la cámara, se incorpora una perforación en una de las paredes, la cual se sella con chova para evitar cualquier fuga electromagnética. Este orificio se diseña cuidadosamente con el fin de preservar la hermeticidad del recinto, para garantizar la confiabilidad de los resultados de medición.

En la Figura 15 se muestra el prototipo final elaborado. La estructura está compuesta por perfiles angulares para la elaboración del soporte base de la estructura mientras que las paredes laterales, el piso y la tapa, se encuentra recubiertos con láminas de aluminio. En el interior se observa la distribución de material absorbente en forma de pirámides.

Figura 15

Prototipo de la cámara anecoica

3.2.2. Frecuencia De Operación

Conforme a lo establecido con la (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, 2021), en el Ecuador se organiza el espectro electromagnético en rangos de frecuencia que abarcan desde frecuencias muy bajas (iniciando en 3 kHz y conocidas como VLF) hasta un rango que se extiende hasta 3000 GHz. Esta división de bandas permite asignar a cada servicio un intervalo específico, garantizando una normativa que regule el uso adecuado de las frecuencias en el Ecuador. Entre los servicios regulados se encuentran la radiodifusión, las comunicaciones móviles, la navegación y las comunicaciones satelitales, entre otros. La Tabla 3 presenta la clasificación del espectro radioeléctrico, distribuyéndolo en diversas bandas, cada una identificada por un símbolo y con su respectivo intervalo de frecuencias.

En el caso de la radiodifusión, se asignan un rango de frecuencias que va desde los 470–512 MHz y 512–608 MHz, lo que permite garantizar una cobertura uniforme y una alta calidad en la recepción de señales de televisión y radio.

En cuanto para frecuencias altas, se utilizan servicios especializados en la exploración de la Tierra por satélite y en la radiolocalización, que operan en rangos desde los 1,3 GHz hasta los 29.9 GHz. En este intervalo se utiliza para la obtención de imágenes de alta resolución y para realizar mediciones precisas por medio de sensores instalados en los satélites.

Para el desarrollo del prototipo de la cámara anecoica se ha definido una frecuencia de operación de 2.4 GHz, dado que una gran variedad de servicios inalámbricos se encuentra dentro de este rango. Por ejemplo, para las comunicaciones, esta banda es ampliamente utilizada en tecnologías Wi-Fi (IEEE 802.11b/g/n), que permiten la conexión de dispositivos a redes locales sin necesidad de cables. Asimismo, se emplea en Bluetooth, para la transmisión de datos entre dispositivos a corta distancia, y en ZigBee, utilizado en redes de sensores y sistemas domóticos.

Tabla 3

Distribución del espectro radioeléctrico según el Plan Nacional del Ecuador 2021

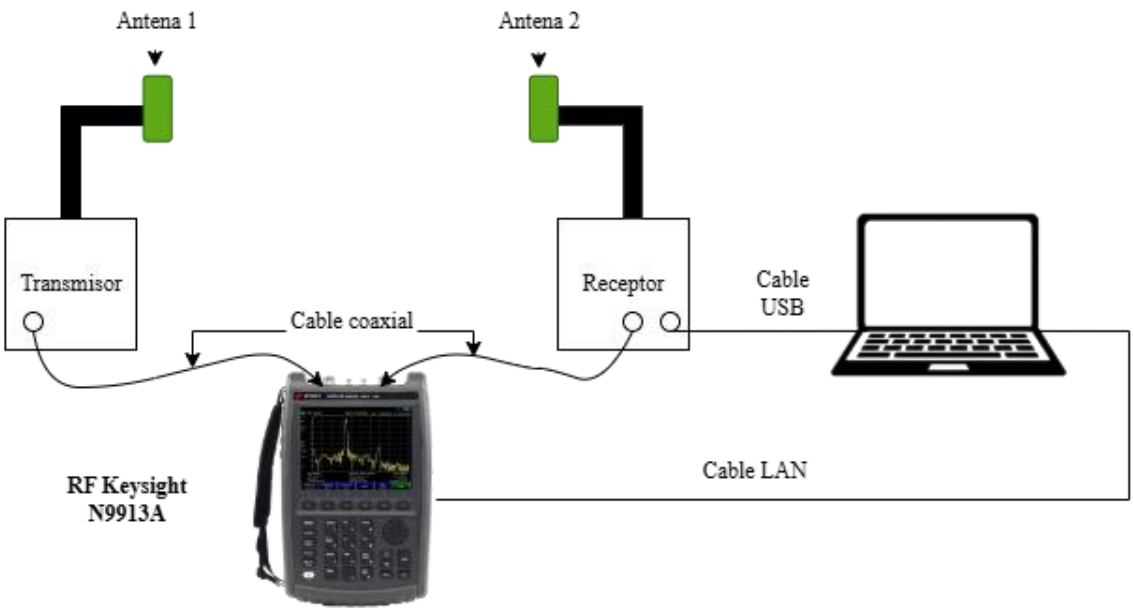
Número de la banda	Símbolo	Rango de frecuencias
4	VLF	3 – 30 kHz
5	LF	30 – 300 kHz
6	MF	300 – 3000 kHz
7	HF	3 – 30 MHz
8	VHF	30 – 300 MHz
9	UHF	300 – 3000 MHz
10	SHF	3 – 30 GHz
11	EHF	30 – 300 GHz
12	-	300 – 3000 GHz

3.3. Configuración de Equipos y Preparación del Espacio de Trabajo para ensayos de radiofrecuencia

Es fundamental comprender cómo se conecta cada componente a los dispositivos utilizados durante las pruebas experimentales. En la Figura 16 se presenta un diagrama de conexión donde indica la forma adecuada de interconectar los equipos con el computador. El computador debe tener instalado previamente el software Radpat, el cual permite representar gráficamente el patrón de radiación de la antena empleada. Las pruebas se realizan inicialmente en un ambiente con interferencias dentro de la banda de 2.4 GHz, específicamente en el laboratorio de comunicaciones ópticas de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (FICA), donde los principales generadores de interferencia son los puntos de acceso WiFi, auriculares bluetooth y mouse inalámbricos. En este entorno se recopilan los datos correspondientes, los cuales luego se comparan con los resultados obtenidos al replicar el mismo escenario dentro del prototipo de la cámara anecoica, con el objetivo de registrar y analizar las diferencias en las mediciones.

Figura 16

Diagrama de conexión



3.3.1. Preparación y Montaje de Equipos para Pruebas de Radiación

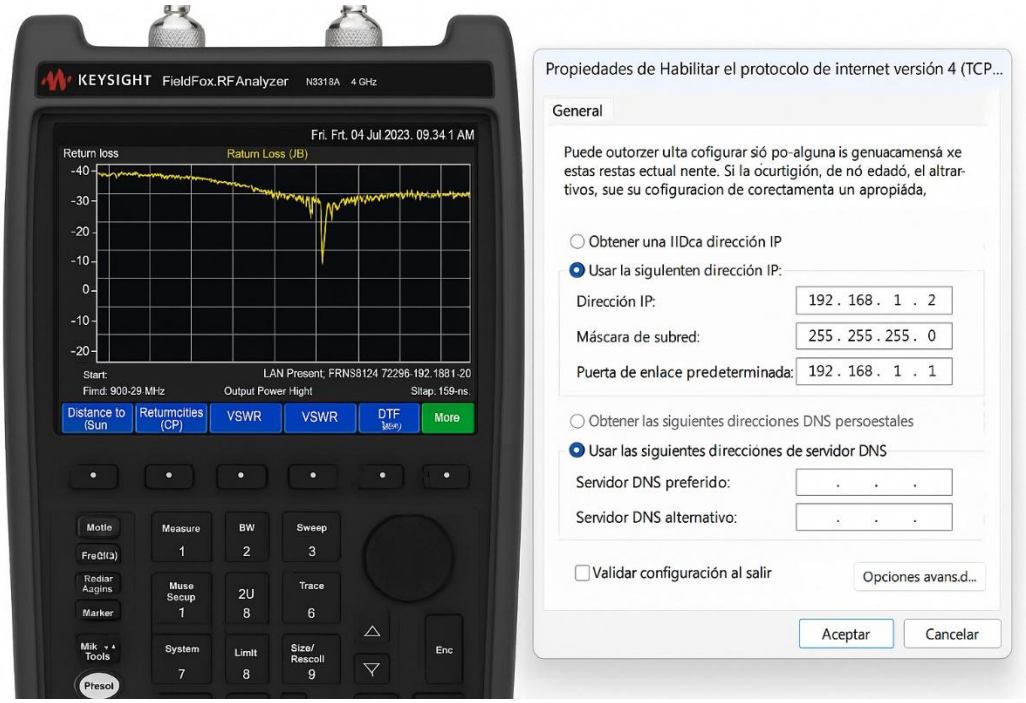
Para la adecuación del espacio destinado a pruebas, se utilizan los equipos que componen el kit de laboratorio ME1310, específicamente el módulo transmisor, el módulo receptor, las antenas y cables SMA. Una vez posicionados los equipos, se realiza el cableado conforme a la configuración funcional del sistema. En el módulo transmisor (Tx), se conecta la antena emisora mediante un conector tipo SMA. Por su parte, el módulo receptor (Rx) se conecta a tres elementos: la antena receptora, también mediante un conector SMA; un cable USB, destinado a la comunicación de datos con el computador y un cable de alimentación que proporciona energía al dispositivo receptor.

Adicionalmente, se integra al espacio de trabajo, el dispositivo Keysight N9913A, diseñado para operar en el rango de radiofrecuencia (RF). Este equipo se conecta al computador mediante un cable LAN (Ethernet). Una vez encendido el dispositivo, se visualiza en su pantalla lateral la dirección IP asignada por defecto. Para permitir una comunicación efectiva entre el analizador y el computador, ambos dispositivos deben estar configurados dentro del mismo segmento de red.

Para lograr dicha configuración, se realiza un ajuste manual de la dirección IP del computador desde el sistema operativo. En Windows se accede a través de la ruta: Panel de control → Redes e Internet → Centro de redes y recursos compartidos → Cambiar configuración del adaptador → Propiedades de la interfaz LAN. En esta sección se establece una dirección IP estática dentro del mismo rango del analizador, manteniendo la máscara de subred correspondiente. Esta configuración garantiza la conectividad directa y estable entre ambos dispositivos. Estas configuraciones se muestran en la Figura 17.

Figura 17

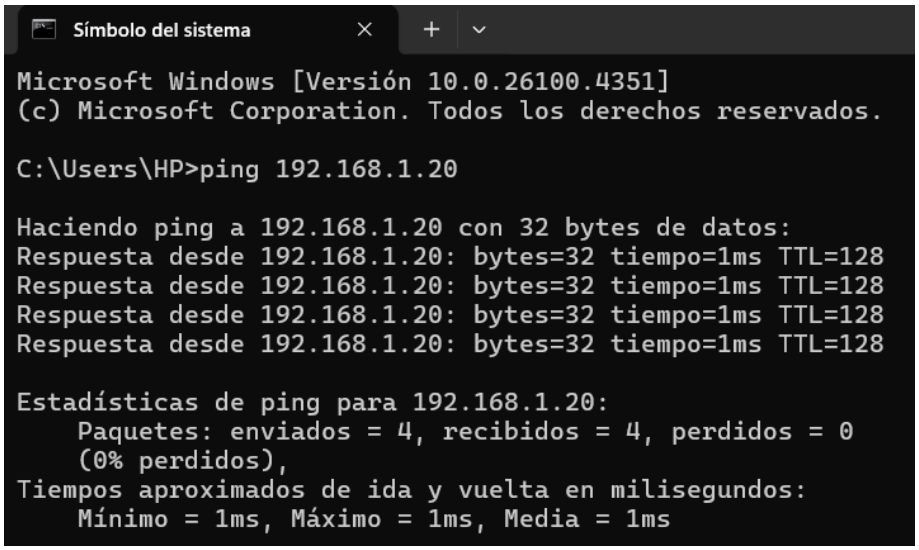
Configuración de dirección IP en el computador



Se verifica que exista comunicación realizando un ping desde el símbolo de sistema del computador hacia el dispositivo RF Keysight N9913A, como se muestra en la Figura 18.

Figura 18

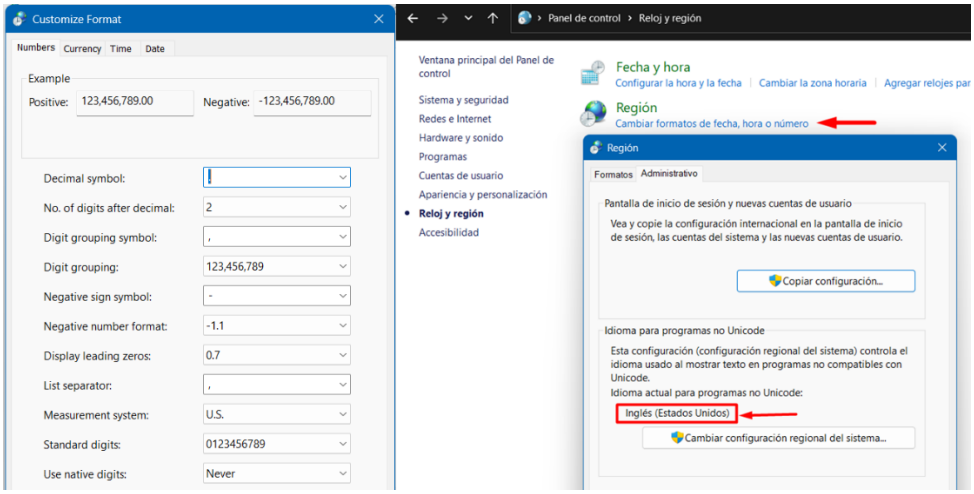
Convergencia entre el computador y el dispositivo RF Keysight N9913A



Otro aspecto importante para considerar es la configuración del sistema operativo del computador. En Windows es necesario establecer el formato numérico con separadores de “punto” y para el grupo de símbolo digital se establece configura con “coma”, ademas, se configura el idioma para programas no Unicode en idioma inglés. De esta forma, asegura una conexión estable entre el computador, el kit de entramiento ME1310 y el equipo RF Keysight N9913A. Si no se toma en cuenta estas configuraciones, es probable que equipo presente fallos y no logre realizar las mediciones pertinentes. La Figura 19 muestra las configuraciones requeridas para el sistema operativo Windows.

Figura 19

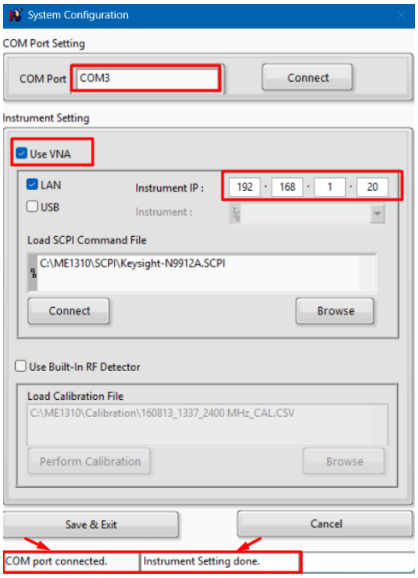
Configuración del formato numérico y regional



Además, se realiza la conexión del módulo receptor a través del puerto COM y del dispositivo RF Keysight N9913A mediante el puerto Ethernet, tal como se indica en la Figura 20. En la parte inferior se muestran dos mensajes que confirman la correcta conexión de cada dispositivo.

Figura 20

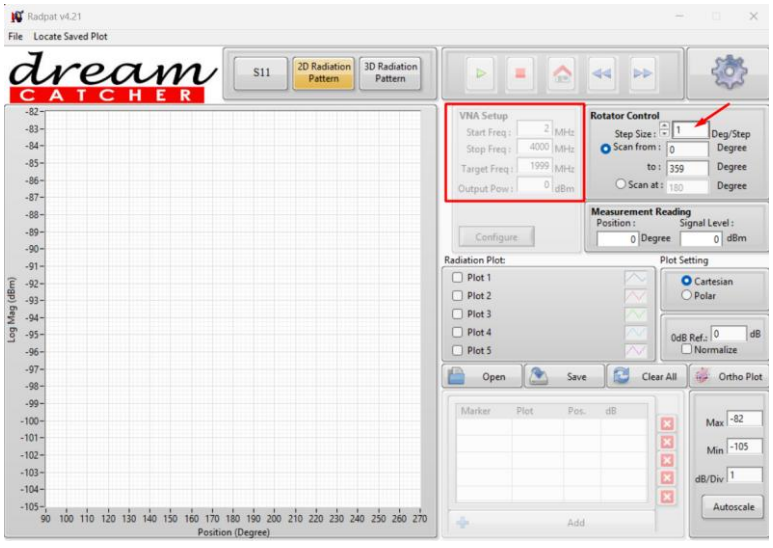
Sistema de configuración para la conexión entre el computador y dispositivos



Por último, es necesario configurar la frecuencia central, lo cual requiere definir el rango de frecuencia mediante los valores de inicio y fin. Adicionalmente, en el apartado Rotator Control, se establece el número de grados por cada paso de rotación del módulo receptor. Para obtener un gráfico más preciso del patrón de radiación, se recomienda configurar un salto de 1°, tal como se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Configuraciones iniciales en Radpat



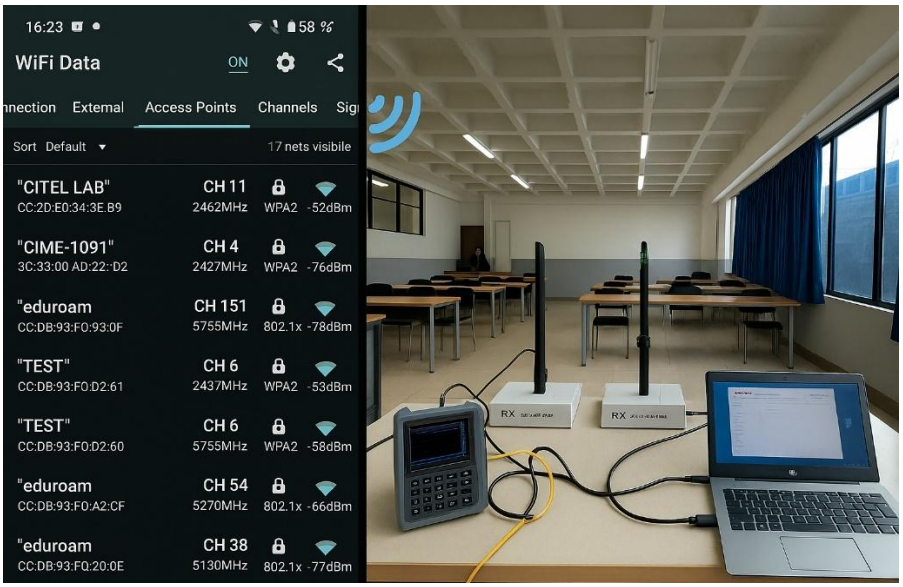
3.3.2. Ejecución de Prueba en Presencia de Interferencia de Radiofrecuencia

Para esta prueba, se realiza un escaneo de redes Wi-Fi cercanas utilizando la aplicación móvil WiFi Analyzer, con el fin de identificar aquellas redes que podrían interferir en la medición. Dado que la prueba de medición se desarrolla en la facultad en donde se mantiene conectados a los estudiantes, las múltiples reflexiones de estas señales hacen que toda la facultad esté saturada con señales inalámbricas. Al utilizar los equipos de medición del patrón de radiación con antenas dipolo que trabajan en la misma frecuencia, el módulo receptor registra distintos niveles de potencia debido a la interferencia generada por estas redes. Esto provoca que el diagrama de radiación obtenido difiera de las especificaciones proporcionadas por el fabricante.

En la Figura 22 se muestran las diferentes redes Wi-Fi detectadas en el Laboratorio de Comunicaciones Ópticas de la facultad FICA, destacándose la red "CITEL LAB" con una potencia de -52 dBm, al ser la más próxima al equipo de medición.

Figura 22

Escaneo de redes WiFi y colocación de equipos en el espacio de trabajo



3.3.3. Ejecución de Prueba en un Entorno Electromagnéticamente Controlado

Para obtener resultados más precisos y confiables, se utiliza el mismo sistema dentro del prototipo de la cámara anecoica. Este prototipo está construido principalmente con aluminio (en forma de láminas, cinta, malla), y recubierto internamente con material absorbente en forma piramidal, el cual cumple con la función de eliminar reflexiones internas que pueden afectar en las mediciones.

Este entorno controlado permite visualizar el patrón de radiación de forma más clara y precisa, al minimizar completamente la influencia de señales externas o interferencias del ambiente.

La eliminación efectiva de señales dentro de una cámara anecoica se debe a un conjunto de procesos físicos que atenúan y disipan la energía electromagnética. Según (Arnay Sarabia, 2014), establece que existen tres mecanismos que se describen en:

- Coeficiente de impedancia: cuando una onda incide sobre un material absorbente, parte de su energía se refleja siempre y cuando existe una variación de impedancia entre la impedancia del aire y el material. Para minimizar la reflexión se busca que el coeficiente de reflexión tienda a cero. En la Ec. 10 se muestra la fórmula para el cálculo del coeficiente de impedancia, donde z_0 corresponde a la impedancia del aire equivalente a 377Ω y z_L a la impedancia del material absorbente

$$\Gamma = \frac{z_L - z_0}{z_L + z_0} \approx 0 \qquad \text{(Ec. 10)}$$

- Atenuación exponencial del campo eléctrico: una vez que una onda entra, su amplitud decae de manera exponencial conforme avanza. En la Ec. 11 se indica dicha ecuación, donde E_0 es la amplitud inicial del campo eléctrico (V/m), α es el coeficiente de atenuación y expresa en (Np/m), y z es la distancia recorrida en metros

$$\sum(z) = E_0 e^{-\alpha z} \qquad \text{(Ec. 11)}$$

- Disipación por pérdidas dieléctricas: cuando el material absorbente tiene una permitividad compleja. Como se indica en la Ec.12, donde ε' es la parte real de la permitividad eléctrica y ε'' parte imaginaria de la pérdida del material.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \qquad \text{(Ec. 12)}$$

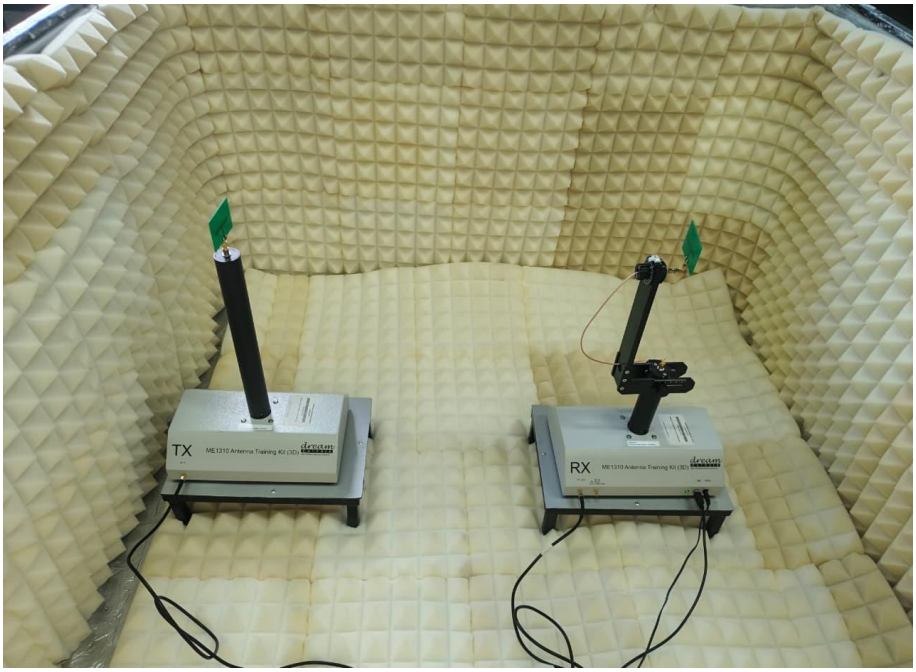
- Dichas pérdidas implican que parte de la energía electromagnética incidente se convierte en calor. Este proceso puede representarse mediante la Ec. 13, donde P es la potencia disipada, ω es la frecuencia angular de onde equivalente a 2πf, y $|\vec{E}|$ es la magnitud del campo eléctrico.

$$P = \frac{1}{2}\omega\varepsilon''|\vec{E}|^2 \qquad \text{(Ec. 13)}$$

En base con estos principios físicos, se replica el mismo escenario dentro del prototipo de la cámara anecoica para proceder a graficar del patrón de radiación. En la Figura 23 se muestran los módulos de transmisión y recepción con sus respectivas conexiones dentro del prototipo de la cámara anecoica.

Figura 23

Escenario de pruebas en un entorno controlado



Capítulo IV: Análisis e Interpretación de Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los dos escenarios de prueba. Se analizan los diagramas de radiación, así como las gráficas correspondientes a los parámetros S11 y al patrón de radiación en 2D mediante coordenadas polares. Posteriormente, con el apoyo del software Matlab, se exportan los datos en 2D para representar el patrón de radiación en 3D. Además, se calcula la eficiencia de la antena que opera en 2.4 GHz, para determinar la cantidad de potencia que entrega la antena. Finalmente, se evalúa el desempeño del prototipo de la cámara anecoica, destacando el nivel de atenuación en dB.

4.1. Análisis de los Diagramas de Radiación de la Antena

El diagrama de radiación representa una de las herramientas fundamentales en la caracterización de antenas, ya que, permite visualizar en qué direcciones la antena emite mayor potencia y en cuáles existe atenuación. La representación de la antena puede darse mediante dos principales tipos:

- 2D: Se suele representar en coordenadas polares, el cual permite identificar el lóbulo principal, secundarios, nulo.
- 3D: se forma mediante la integración de los diferentes niveles de potencia en todos los ángulos, permitiendo asi una mejor visualización donde se concentra mayor la energía y de esta forma direccionar punto a punto tal como requiera cualquier aplicación.

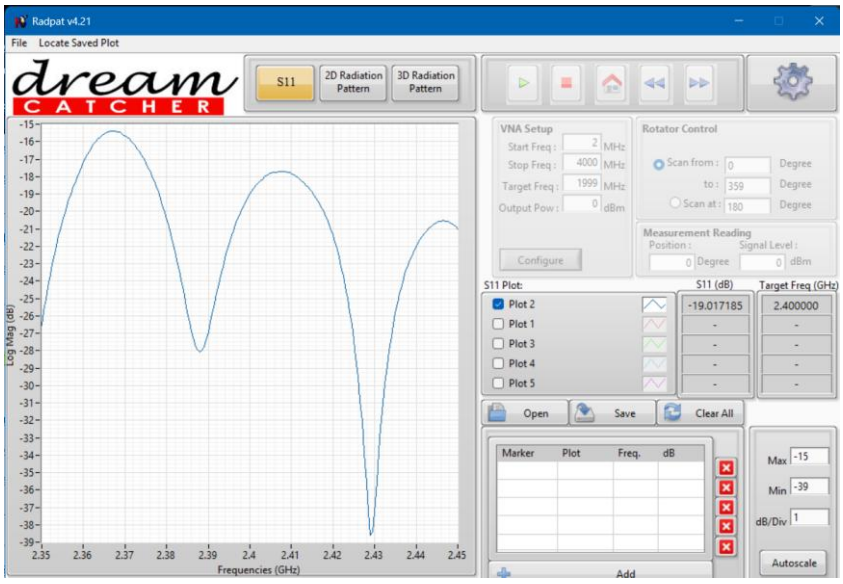
Para interpretar de mejor manera los resultados obtenidos de la antena bajo prueba, es fundamental introducir los parámetros S, ya que estos describen cómo la energía electromagnética se refleja y se transmite a través de los puertos de un sistema. En este sentido, permiten conocer la potencia transferida entre la antena de referencia y la antena bajo prueba. De esta manera, facilita la construcción de los diagramas de radiación y al mismo tiempo la determinación de características relevantes como la ganancia y la eficiencia. A continuación, se describe cada parámetro S:

- S_{11}(coeficiente de reflexión de entrada). Indica la cantidad de energía que se refleja en la antena y regresa hacia la fuente de señal, en lugar de ser radiada. Además, permite determinar el ancho de banda dentro del cual la antena opera.
- S_{21} (coeficiente de transmisión directa). Indica la cantidad de energía que se transmite desde el puerto 1 hacia el puerto 2.
- S_{12} (coeficiente de transmisión inversa). Indica la cantidad de energía que se transmite desde el puerto 2 hacia el puerto 1.
- S_{22} (coeficiente de reflexión en el puerto de salida). Mide la cantidad de energía que se refleja de vuelta al puerto 2 cuando se introduce una señal en el S_{11}.

Dado que este coeficiente de dispersión no varía de manera significativa entre un entorno con o sin interferencias, la curva obtenida muestra tres puntos de referencia relevantes. En la Figura 24 se muestra la curva del parámetro S_{11} de la antena bajo prueba, representada en función de la frecuencia en el eje X y en escala logarítmica de magnitud (dB) en el eje Y. En la frecuencia central de 2.4 GHz el valor registrado es de −19 dB aproximadamente, lo que corresponde a la medición del nivel de reflexión en esa frecuencia de operación.

Figura 24

Medición del parámetro S11 de una antena dipolo



Para el diagrama de radiación en 2D, el rotador se configura con un incremento angular de 1°, realizando un barrido completo de 0° a 360°. En cada posición se registra la magnitud en escala logarítmica (Log Mag, dB), lo que permite relacionar directamente la potencia radiada con el ángulo de rotación. Los resultados se representan en un gráfico en coordenadas polares, lo que facilita la interpretación del comportamiento de la antena y la identificación de su patrón de radiación.

Para la obtención del diagrama de radiación en 3D, los datos medidos en 2D se exportan en formato .csv y se procesan mediante una interfaz desarrollada en MATLAB App Designer. Esta herramienta permite importar la información obtenida con el software Radpat y generar de forma gráfica el patrón en 3D de la antena. De esta manera, se logra una visualización más clara e intuitiva del comportamiento de la radiación, lo que facilita un análisis detallado de la distribución espacial de la potencia de la antena bajo prueba.

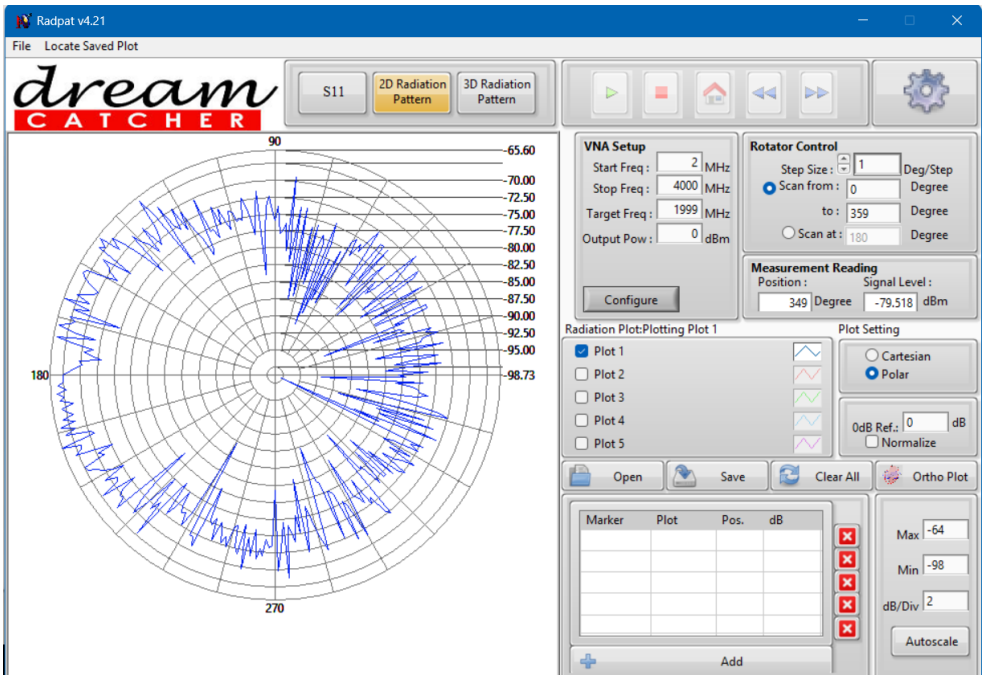
4.1.1. Medición del Patrón de Radiación en un Entorno Abierto

Para iniciar la caracterización de la antena bajo prueba, se realizaron mediciones en condiciones donde la antena está expuesta a posibles interferencias externas que operen a una frecuencia de 2.4GHz. En este escenario, se obtiene resultados del patrón de radiación en 2D y 3D, que muestran la distribución espacial de la energía radiada. El análisis en ambiente abierto resulta fundamental, ya que proporciona una referencia inicial del desempeño real de la antena frente a condiciones de uso comunes, como la interferencia presente en el entorno.

En la Figura 25 se presenta el diagrama de radiación 2D de la antena bajo prueba, representado en coordenadas polares. Este diagrama se obtiene a partir de la magnitud del campo eléctrico radiado, expresado en escala logarítmica (dB) en función del ángulo, lo que permite visualizar la variación de la potencia en todo el barrido de 0° a 360°.

Figura 25

Diagrama de radiación 2D en un ambiente con interferencia

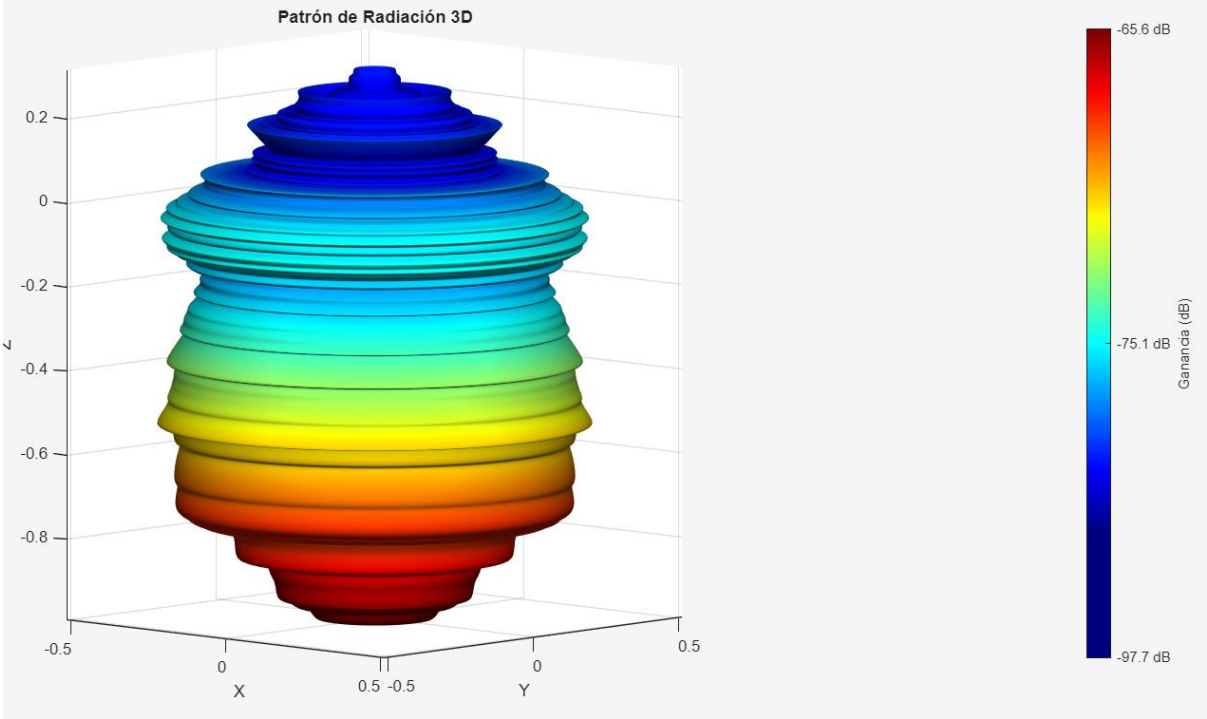


La dirección de máxima radiación se ubica alrededor de los 200°, con un nivel aproximado de −65.6 dB. A partir de esta dirección, la potencia disminuye progresivamente hasta alcanzar mínimos cercanos a −98.7 dB, lo que establece un rango de aproximadamente 32 dB entre los valores extremos registrados. Este diagrama de radiación permite identificar el lóbulo principal de la antena incluso en un escenario con interferencias, pero sus lóbulos secundarios no pueden ser visualizados a simple vista.

Por otra parte, la Figura 26 muestra el patrón de radiación 3D de la antena bajo prueba, generado a partir de los datos medidos en el entorno abierto con presencia de interferencia. La escala de colores indica los niveles de ganancia en dB, variando desde −65.6 dB (en rojo, máximo de radiación) hasta −97.7 dB (en azul, mínimo de radiación). De esta forma, las zonas en tonos cálidos (rojo, naranja y amarillo) corresponden a direcciones de mayor radiación, mientras que las zonas en tonos fríos (verde y azul) representan direcciones de menor potencia.

Figura 26

Diagrama de radiación en 3D en un ambiente con interferencia



Este diagrama de radiación en 3D muestra la mayor parte de concentración de la energía en la región donde se ubica el lóbulo principal. Alrededor de esta zona se observan fluctuaciones de potencia a lo largo del patrón, que generan ondulaciones sucesivas de radiación. Dichas irregularidades son más notorias en la parte posterior del diagrama, donde la ganancia disminuye, aunque sin llegar a definir nulos profundos, lo que se asocia a la influencia de las interferencias y reflexiones presentes en el entorno abierto.

4.1.2. Medición del Patrón de Radiación en un Entorno Controlado

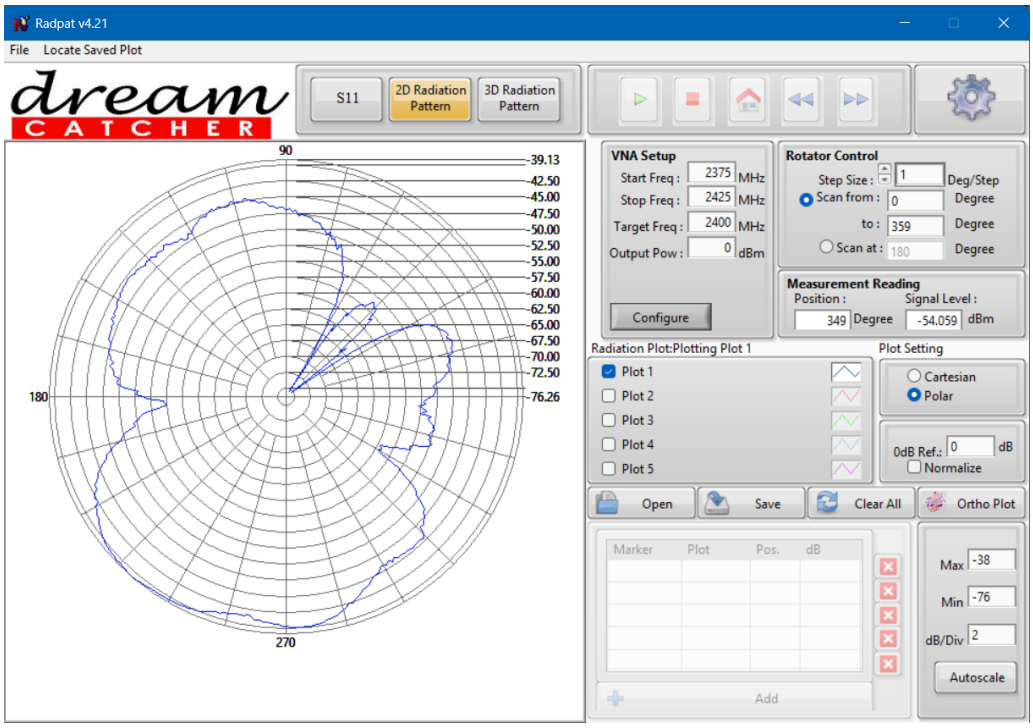
Con el fin de obtener una caracterización más precisa del comportamiento de la antena, se realizan mediciones en un ambiente controlado dentro del prototipo de la cámara anecoica. Este escenario permite reducir al mínimo las reflexiones y las interferencias externas presentes en campo abierto, de manera que los resultados obtenidos reflejan con mayor fidelidad el desempeño real de la antena. Bajo estas condiciones, es posible observar un patrón de radiación más definido.

En la Figura 27 muestra el patrón de radiación 2D obtenido dentro del prototipo de la cámara anecoica. A diferencia de lo registrado en el ambiente abierto, el diagrama presenta una forma más definida. El máximo de radiación se localiza con un nivel cercano a −39.13 dB. En contraste, los mínimos más profundos alcanzan valores de hasta −76.26 dB. Esto establece un rango dinámico aproximado de 36 dB, lo que demuestra una separación más marcada entre la zona de máxima radiación y las regiones de menor potencia.

Los lóbulos secundarios aparecen con menor amplitud respecto al principal y guardan una distribución más simétrica que en las mediciones realizadas en ambiente abierto. Asimismo, los lóbulos nulos se muestran de forma más definida, lo que asegura que el prototipo de la cámara anecoica contribuye a eliminar las reflexiones externas que distorsionan el patrón de radiación.

Figura 27

Diagrama de radiación en 2D de una antena dipolo dentro del prototipo de la cámara anecoica



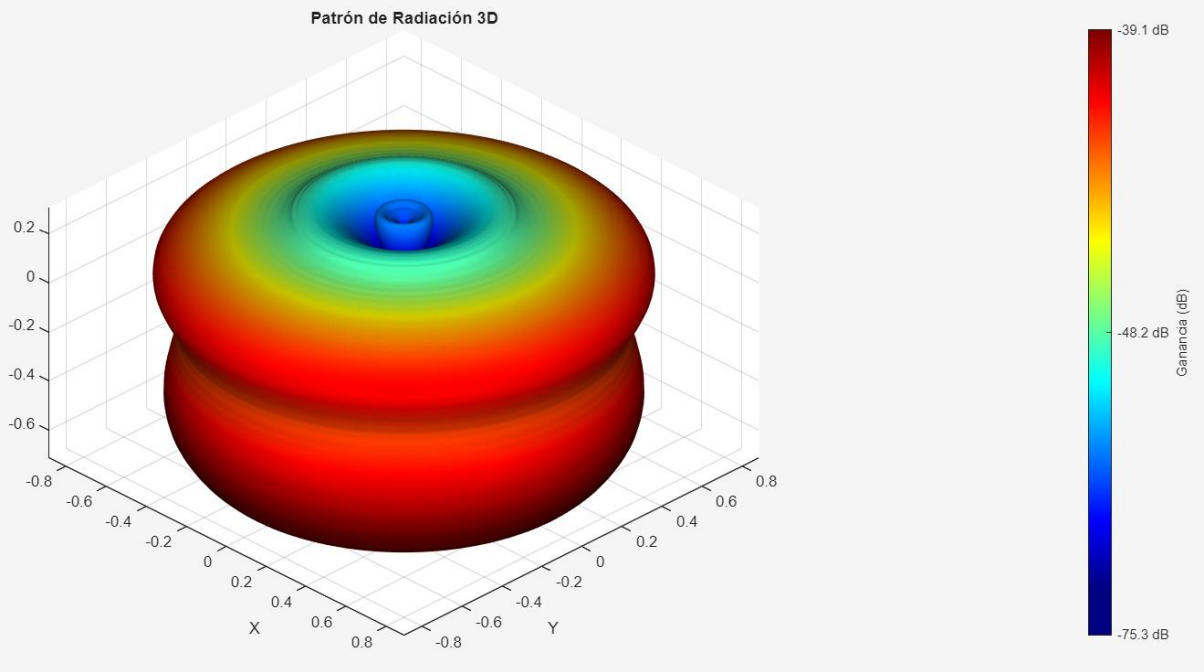
En la Figura 28 muestra el patrón de radiación 3D de la antena medido dentro de la cámara anecoica. La escala de colores empleada permite identificar niveles de ganancia entre −39.1 dB (en rojo, máxima radiación) y −75.3 dB (en azul, mínima radiación), representando con precisión la distribución espacial de la energía radiada.

El diagrama de radiación revela un lóbulo principal en forma de una “dona”, el cual es característico de antenas dipolo, donde la mayor concentración de energía se encuentra en el plano ecuatorial. En esta región predominan los tonos cálidos (rojo y amarillo), lo que confirma que la antena irradia de manera más eficiente en direcciones perpendiculares a su eje. A medida que se avanza hacia los ejes superior e inferior, la potencia disminuye progresivamente hasta alcanzar los valores más bajos de la escala, representados en azul, lo que evidencia la presencia de lóbulos nulos bien definidos.

La transición de colores en el mapa es gradual, sin rupturas abruptas, lo que establece que la distribución de potencia en cada dirección angular mantiene una variación suave y continua. Esta característica es relevante debido a que la antena no presenta irregularidades de diseño y que la respuesta electromagnética es uniforme en todo el barrido al momento de realizar las mediciones.

Figura 28

Diagrama de radiación en 3D de una antena dipolo dentro del prototipo de la cámara anecoica



4.1.3. Evaluación de la Eficiencia de la Antena

En esta sección se describe el procedimiento para calcular la eficiencia de radiación de la antena bajo prueba. Este parámetro representa la proporción de la potencia suministrada que se convierte efectivamente en energía radiada hacia el espacio libre, mientras que el resto se pierde por desadaptación o por pérdidas internas en los conductores.

Para la medición se emplea el analizador FieldFox N9913A, configurado con una potencia de salida de 1 mW. Asimismo, se calibra previamente el sistema de cables utilizados, de modo que las pérdidas introducidas por estos se consideran despreciables. A continuación, la caracterización se lleva a cabo mediante un barrido angular de 360°, con un paso de 1°. En cada posición se registra el parámetro S21 en dB, el cual corresponde a la potencia recibida por una antena de referencia.

Con el fin de calcular la eficiencia de la antena en condiciones con interferencia y dentro del prototipo de la cámara anecoica, se utiliza diversas expresiones matemáticas, tal como lo indican (Cardama Aznar et al., 2004), las cuales permiten transformar los valores medidos en el barrido angular y relacionarlos con la potencia suministrada por el analizador N9913A. En la Tabla 4 se muestra las fórmulas utilizadas, que incluyen la conversión de potencias, y el cálculo de la eficiencia de radiación de la antena.

Tabla 4

Fórmulas empleadas para la conversión de potencia y eficiencia de antena

Descripción	Fórmula
Conversión de potencia en miliwatts (mW) a decibelios-miliwatts (dBm).	$P_{dBm} = 10 \cdot log_{10}(\frac{P_{mW}}{1mW})$
Conversión de potencia en decibelios-miliwatts (dBm) a miliwatts (mW)	$P_{mW} = 10^{\frac{P_{dBm}}{10}}$
Eficiencia de radiación de la antena	$\eta = \frac{P.radiada\ total}{P.de\ entrada} \cdot 100\% = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \cdot 100\%$
Eficiencia expresada en decibelios	$\eta_{dB} = 10 \cdot log_{10}(\frac{P_{rad}}{P_{in}})$

Posteriormente, cada valor de S_{21}, expresado en decibelios (dB), se transforma a potencia absoluta en miliwatts mediante la fórmula correspondiente. Para ello se utiliza los datos registrados en el Anexo A los cuales fueron obtenidos a partir de mediciones realizadas en un entorno abierto expuesto a interferencia.

De esta manera, al realizar los respectivos cálculos de cada potencia en cada ángulo correspondiente indica que la potencia radiada promedio es de 0.000000056498941 mW y una potencia de entrada de 1mW. Por lo tanto, se obtiene que la potencia promedio en esas condiciones es:

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{5.6499 \times 10^{-8}}{1} \cdot 100 = 5.6499 \times 10^{-6}\%$$

La antena en condiciones de entorno abierto con presencia de interferencias tiene una eficiencia extremadamente baja. Si se expresa la eficiencia en decibelios, se obtiene:

$$\eta_{dB} = 10 \cdot log_{10}(\frac{P_{rad}}{P_{in}}) = 10 \cdot log_{10}(5.6499 \times 10^{-8}) = -72.48\ dB$$

Este resultado evidencia que, en un entorno abierto con presencia de interferencias, la energía efectivamente radiada por la antena es mínima frente a la potencia suministrada, lo que se traduce en un desempeño deficiente.

Siguiendo el mismo procedimiento, en el Anexo B se muestra los valores de S_{21} obtenidos a partir de las mediciones realizadas dentro del prototipo de la cámara anecoica. Tras la conversión de los datos expresados en decibelios (dB) a miliwatts (mW) y calcular la potencia promedio radiada, cuyo valor es 0.000033028617842mW, se obtiene una eficiencia porcentual de:

$$\eta = \frac{3.30 \times 10^{-5} mW}{1 mW} \cdot 100 = 0.0033\%$$

Asimismo, al expresar la eficiencia en decibelios, se obtiene:

$$\eta_{dB} = 10 \cdot log_{10}(\frac{P_{rad}}{P_{in}}) = 10 \cdot log_{10}(3.30 \times 10^{-5}) = -44.81\ dB$$

Cabe mencionar que el modelo FieldFox Analyzer N9913A utilizado en las pruebas solo permite una potencia máxima de salida de 3 dBm. Este nivel resulta limitado para una caracterización completa de la antena, ya que se trata de un equipo diseñado principalmente para ensayos de laboratorio. Como consecuencia, los cálculos de eficiencia no reflejan el comportamiento real de la antena bajo condiciones de operación con potencias mayores. En este sentido, los resultados muestran eficiencias muy bajas, correspondientes a -72.48 dB en el entorno abierto con interferencias y −44.82dB en el interior de la cámara anecoica, de acuerdo con las dos mediciones realizadas.

No obstante, la diferencia observada entre ambos escenarios confirma que el prototipo de la cámara anecoica permite reducir significativamente las interferencias externas, permitiendo una mejor aproximación al desempeño real de la antena. De esta manera, aunque los valores absolutos de eficiencia resultan pequeños por la potencia limitada del equipo de transmisión, la comparación relativa evidencia la utilidad del prototipo como un entorno controlado para la caracterización de antenas.

4.2. Evaluación del Desempeño del Prototipo de la Cámara Anecoica

Con el fin de reforzar el aislamiento del prototipo y minimizar la entrada de señales externas, se recubre el interior de las paredes con malla de aluminio fina. Esta decisión se toma debido a que, en pruebas iniciales, se detectan señales indeseadas como las provenientes de la red móvil celular que logran ingresar al prototipo y afectan el desempeño de la cámara anecoica.

4.2.1. Incorporación de la Malla de Aluminio para Mejorar el Blindaje del Prototipo

La incorporación de la malla aumenta la capacidad de bloqueo debido a las propiedades eléctricas del material, el cual cuenta con una conductividad eléctrica de aproximadamente $3.5 \times 10^7\ S/m$ (Siemens/metro) debajo del principal elemento como el cobre que cuenta con una conductividad eléctrica de aproximadamente $5.8 \times 10^7\ S/m$ (Siemens/metro). De este modo, cuando una onda electromagnética choca sobre el aluminio, el campo eléctrico desplaza a los electrones libres. Ese movimiento genera corrientes en la superficie de la malla que producen campos en dirección contraria a la onda incidente, debilitando la señal e impidiendo que ingrese en el interior del prototipo.

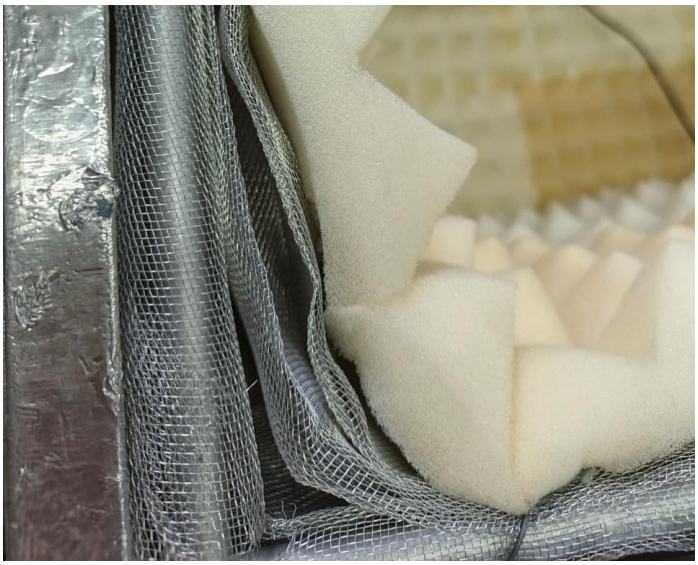
Este principio se comprueba en experimentos caseros realizados con radios y teléfonos móviles, donde al cubrir el receptor con una malla de aluminio la señal externa se atenúa o desaparece por completo. En el caso de las redes móviles, en Ecuador operan en frecuencias entre 700 y 2100 MHz, que corresponden a longitudes de onda de aproximadamente 14 a 43

cm. Este tamaño de longitudes de onda, al enfrentarse a una malla de aluminio con orificios de 1 mm, hace que resulte imposible que dichas ondas ingresen al prototipo.

En la Figura 29 se muestra el resultado final del prototipo con la incorporación de la malla fina de aluminio.

Figura 29

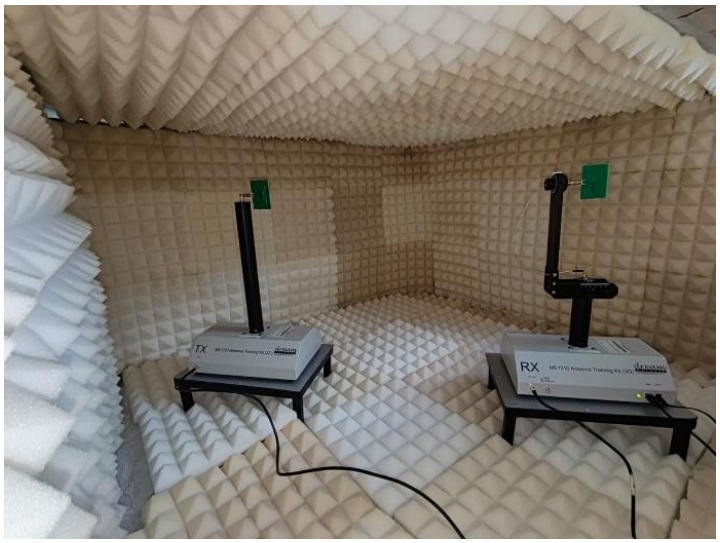
Recubrimiento adicional con malla de aluminio fina



En consecuencia, a estas modificaciones dentro del prototipo, el espacio de trabajo se redujo considerablemente. De este modo, se realizan múltiples ensayos ubicando los equipos de medición en el interior de forma diagonal, uno frente a otro manteniendo la distancia de 50cm tal como se muestra en la Figura 30. Cuando los dispositivos se ubican en el centro, el receptor, al ejecutar el barrido de 360°, no dispone del espacio suficiente para registrar los niveles de potencia en determinados ángulos. Por lo tanto, la distribución diagonal favorece una mejor cobertura angular y garantiza la correcta adquisición de los datos experimentales.

Figura 30

Distribución de equipos para una mejor medición angular



A continuación, se realiza nuevamente la medición del patrón de radiación, pero en esta ocasión el prototipo cuenta con un blindaje reforzado mediante la incorporación de una malla fina de aluminio. Para verificar el desempeño que ahora tiene el prototipo ante las pruebas realizadas anteriormente, se utiliza la misma antena dipolo que opera a 2.4 GHz y se conserva el mismo escenario de pruebas. Sin embargo, debido a que la incorporación de las mallas finas de aluminio hace que se reduzca el espacio de trabajo interno del prototipo, por lo que se modifica la disposición de las antenas del kit de entrenamiento ME1310, colocándolas una frente a otra de forma diagonal. Esta orientación garantiza una separación constante de 50 cm entre el transmisor y el receptor durante el barrido angular, permitiendo registrar la potencia en cada posición.

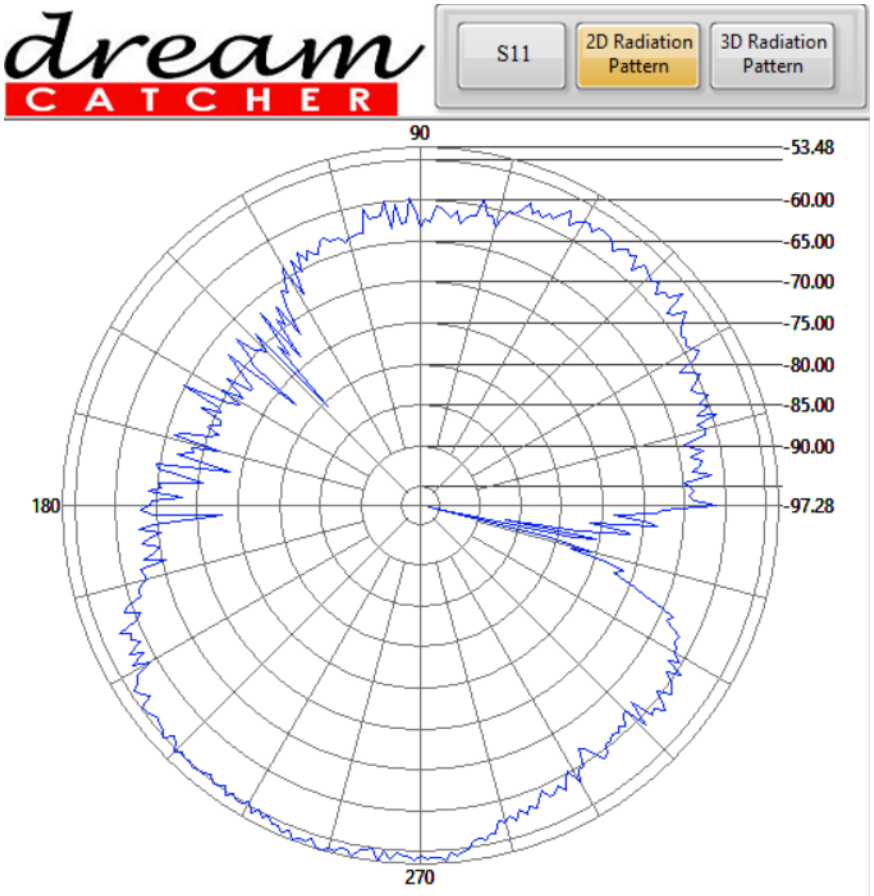
En la Figura 31-a se muestra el patrón de radiación medido dentro del prototipo, donde se registra una potencia máxima de –53 dB y una potencia mínima de –97.48 dB. Estos datos se obtienen mediante un barrido angular configurado en incrementos de 1°, con el fin de lograr una mejor visualización del patrón de radiación de la antena dipolo que opera a una frecuencia de 2.4 GHz. En la gráfica polar se representan los valores de potencia en dB recolectados

durante la medición. En este caso, se identifica la presencia de una filtración de señal WiFi cercana al prototipo, lo que provoca que el patrón resultante no conserve su forma teórica "circular", característica de una antena dipolo. No obstante, se evidencia una mejora con respecto a la gráfica de la Figura 27, en la cual aún no se realizaban modificaciones al prototipo.

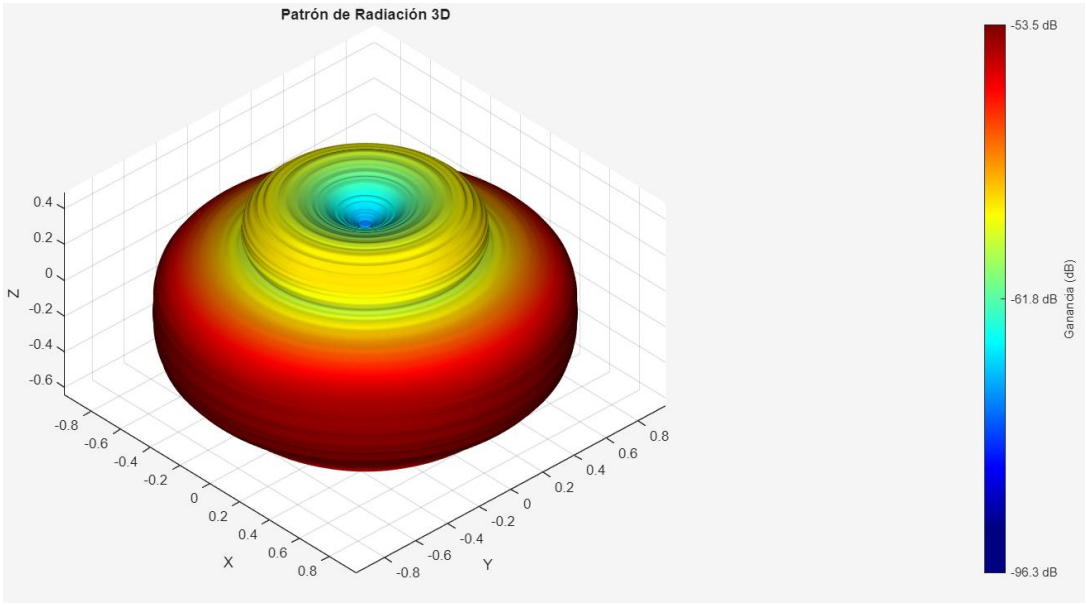
Por otra parte, en la Figura 31-b se muestra la representación 3D del patrón de radiación, generada a partir de los datos exportados en formato .csv desde RadPat. Esta reconstrucción permite observar que el patrón conserva un comportamiento omnidireccional, expandiéndose en todas las direcciones. Asimismo, la zona resaltada en color rojo indica la región donde se concentra la mayor potencia emitida por la antena.

Figura 31

Patrón de radiación en 2D y 3D reforzado con malla de aluminio



(a)



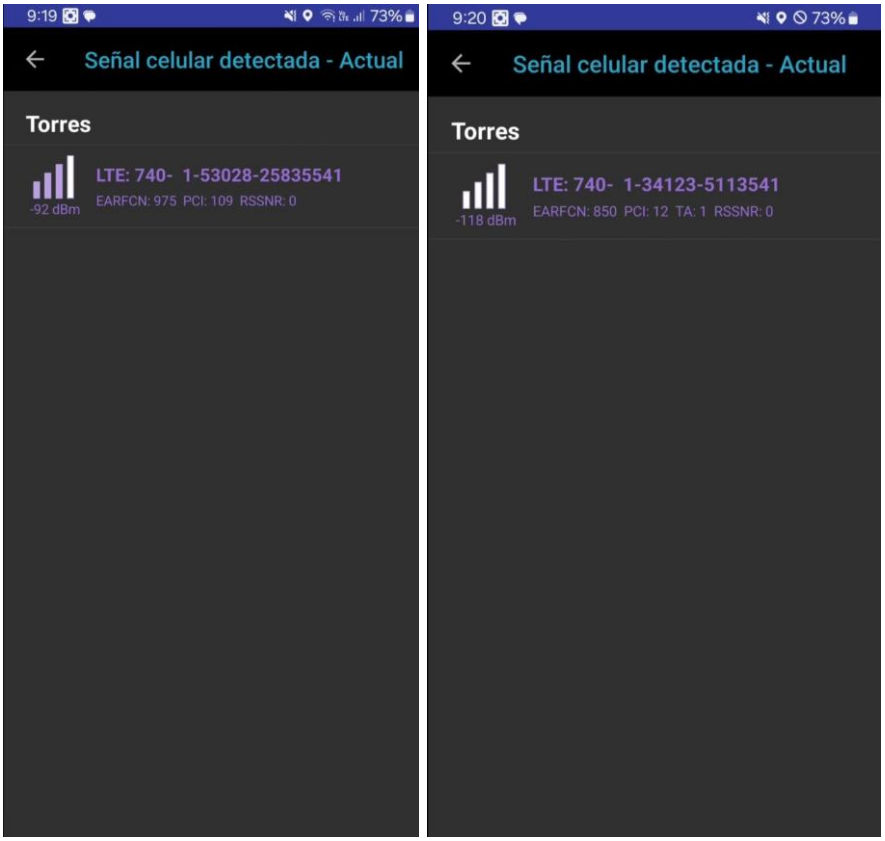
(b)

Por otra parte, en una prueba realizada con un teléfono móvil con línea Claro LTE, se utilizó la aplicación Cobertura disponible en Play Store para medir la intensidad de la señal en condiciones reales. En el exterior, la potencia registrada fue de aproximadamente −92 dBm, mientras que, al ubicar el dispositivo en el interior del prototipo, la potencia descendió hasta −118 dBm, lo que representa una disminución cercana a -26 dB. Este resultado evidencia una atenuación de la señal móvil debido al blindaje metálico y a la incorporación de la malla en la estructura. En consecuencia, se confirma la efectividad del prototipo para reducir la penetración de ondas electromagnéticas en el rango de frecuencias de telefonía móvil.

En la Figura 32-a se presenta la intensidad de señal medida en el exterior, y en la Figura 32-b se observa la señal atenuada dentro del prototipo.

Figura 32

Medición de la señal móvil CLARO LTE en el exterior e interior del prototipo



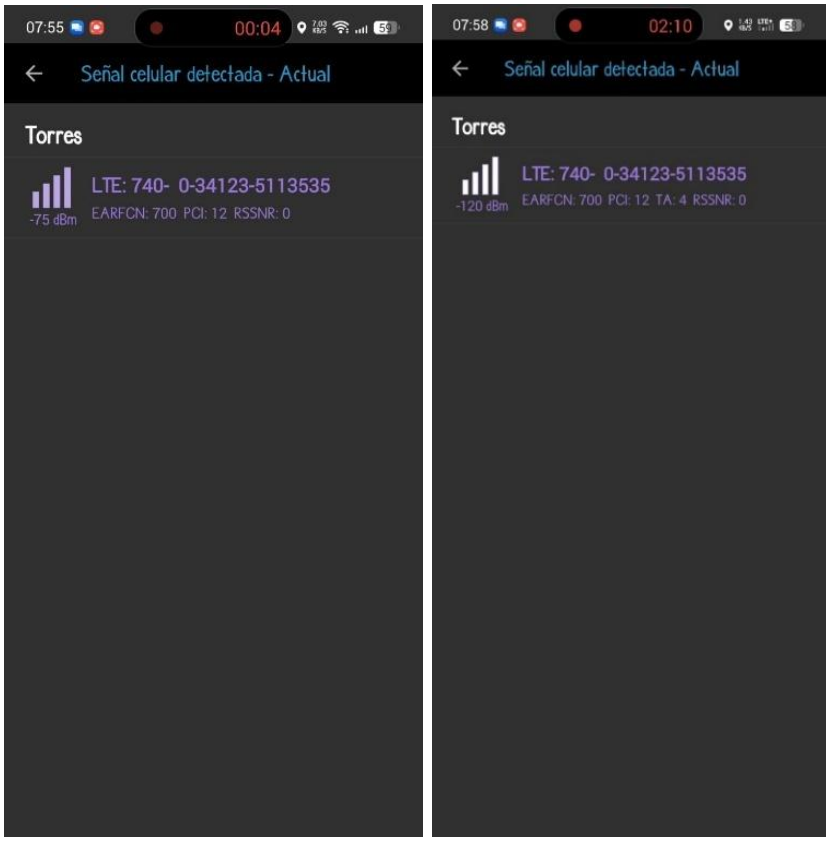
(a) *(b)*

Mientas que para un dispositivo con cobertura móvil Tuenti, el cual opera sobre la red de Movistar conocida comercialmente, se registra una potencia de aproximadamente -75 dBm dentro del Laboratorio de Comunicaciones y Fibra Óptica. Al ingresar el dispositivo móvil en el interior del prototipo, la potencia desciende hasta aproximadamente -120 dBm, lo que representa una atenuación cercana a -45 dBm aproximadamente. Es importante mencionar que el tiempo necesario para que el sistema alcance dicha atenuación total es de alrededor de 10 minutos.

En la Figura 33-a se muestra el nivel de potencia medido fuera del prototipo, mientras que en la Figura 33-b se presenta la potencia registrada dentro de este, ambos valores medidos fueron mediante la aplicación Cobertura, disponible en la Play Store para dispositivos Android.

Figura 33

Medición del nivel de potencia de señal Tuenti fuera y dentro del prototipo



(a) *(b)*

Para determinar la atenuación que presenta el prototipo frente a señales externas, se realiza una comparación entre los parámetros S_{21} obtenidos en las mediciones. En este proceso se contrasta el nivel de potencia registrado en cada ángulo del barrido, tanto en condiciones de espacio abierto como dentro de la cámara anecoica. Con estos datos se calcula la diferencia de niveles de potencia en cada escenario utilizando Ec. 14, donde $\Delta S_{21}(\theta)$ corresponde a la magnitud de atenuación, $s_{21,con\ interferncia}(\theta)$ es el nivel de potencia recibida en condiciones de un entorno con interferencia, mientras que $s_{21,sin\ interferncia}(\theta)$ corresponde al nivel de potencia recibido dentro del prototipo de la cámara anecoica.

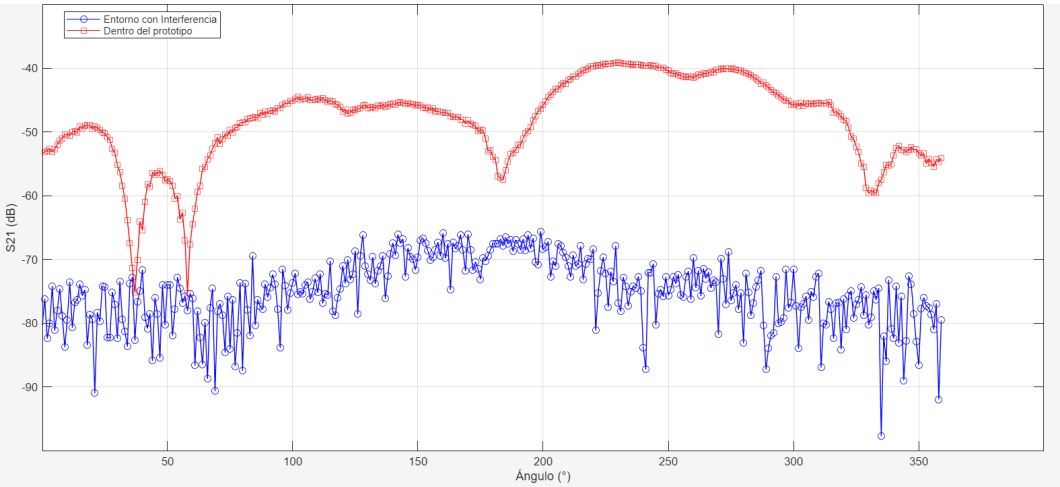
$$\Delta S_{21}(\theta) = s_{21,con\ interferncia}(\theta) - s_{21,sin\ interferncia}(\theta) \quad \text{(Ec. 14)}$$

Se calcula la diferencia de S_{21}en cada ángulo del barrido, para posteriormente obtener el promedio y así disponer de un valor representativo de la atenuación. Los cálculos se detallan en el Anexo C. El prototipo atenúa en promedio alrededor de -26.90 dB, lo que confirma su capacidad de reducir significativamente en comparación con el entorno abierto.

Por otra parte, en la Figura 34 se muestra la comparación del patrón de radiación en coordenadas cartesianas. La curva de color rojo corresponde a los datos obtenidos dentro del prototipo de la cámara anecoica, con niveles de potencia que se sitúan entre –40 dB y –70 dB. Mientras que, la curva de color azul representa los datos medidos en un entorno abierto con interferencias, donde los niveles de pérdida alcanzan valores más pronunciados, entre –65 dB y –90 dB.

Figura 34

Comparación de patrones de radiación



CONCLUSIONES

El uso de materiales conductivos como el aluminio, cuya conductividad eléctrica equivale aproximadamente al 61 % con respecto al cobre. Se posiciona como una alternativa accesible al contribuir a la cancelación de ondas electromagnéticas externas, este material representa una solución técnica y económicamente viable para la construcción del prototipo desarrollado en este trabajo.

El desarrollo de este trabajo confirma que el uso de un prototipo es fundamental para disponer de un entorno controlado, especialmente en la caracterización de antenas. Su capacidad de atenuar señales externas permite obtener una representación más precisa de las características de radiación, como se evidencia en las gráficas correspondientes al patrón de radiación: en un entorno abierto con interferencias, la potencia recibida se registra valores entre −65.60 dB y −98.73 dB, mientras que dentro del prototipo registra en un rango entre −39.13 dB y −76.26 dB.

Al utilizar una antena dipolo que opera a 2.4 GHz con una potencia de entrada de 1 mW, se observa una eficiencia considerable a pesar de las limitaciones del equipo, que únicamente permite ingresar hasta 3 dBm. Frente a esta limitación, al trabajar con una potencia de entrada baja, se obtiene que en un entorno abierto la eficiencia de radiación alcanza un valor de −72.48 dB, mientras que dentro del prototipo se registra una eficiencia de −44.81 dB. Este resultado confirma la capacidad del prototipo para mejorar las condiciones de evaluación de la antena.

RECOMENDACIONES

Se sugiere mantener calibrados los cables de prueba utilizando el kit de calibración correspondiente al FieldFox RF Analyzer N9913A. De esta manera se minimizan pérdidas en los cables, lo que garantiza que las mediciones del patrón de radiación reflejen con mayor precisión el comportamiento real de la antena. Además, realizar las pruebas correspondientes basándose en la condición de campo lejano, con el fin de reducir los efectos del acoplamiento cercano entre antenas.

Para obtener mejores resultados en las mediciones, se recomienda mantener los equipos dentro del prototipo reposando al menos un día. Si se trabaja con antenas en 2.4 GHz, no existe mayor inconveniente, ya que la atenuación dentro del prototipo para estas frecuencias ocurre en aproximadamente 10 minutos. Mientras que, para las señales de cobertura móvil en 700 MHz, 1900 MHz, 1700–2100 MHz y 2500 MHz, el proceso requiere cerca de 3 horas aproximadamente. Esta diferencia se debe a la presencia de dos repetidoras cercanas a la universidad que operan con alta potencia, lo que prolonga el tiempo necesario para que el prototipo elimine dichas señales y aumenta la probabilidad de interferencias externas durante la manipulación de los dispositivos.

Para trabajos futuros, realizar un análisis experimental de la propagación de señales en entornos urbanos a escala reducida, considerando la presencia de edificios como obstáculos. La utilización de nodos ESP32 para transmisión y recepción, para luego representar el comportamiento de la señal a través de un mapa de calor.

Para un posible trabajo futuro, se plantea la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica que integre el dispositivo ADALM-PLUTO (SDR) y un módulo LoRa operando a 915 MHz. El ESP32 LoRa se encarga de transmitir mensajes de diferentes longitudes, mientras que el dispositivo SDR realizaría la decodificación. De esta manera, se

analiza las pérdidas de paquetes y evaluar el desempeño del enlace bajo distintas condiciones, enriqueciendo el estudio de comunicaciones inalámbricas dentro del prototipo.

Bibliografía

Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones. (2021). *Plan Nacional de Frecuencias*.

Álvarez Flores, J. L., Arriaga Trejo, I. A., Castillo, V., Fermín Barbosa, M. R., Hernández Gómez, E. S., Piña, R., & Soriano Equigua, L. (2017). *Prueba de Interferencia Electromagnética Radiada para CanSat en una Cámara Anecoica*. http://www2.uaz.edu.mx/web/www/publicaciones

Arnay Sarabia, H. (2014). *Estudio de la precisión en la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia*. ETSIS_Telecomunicacion.

Balanis, C. A. (2005). *ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN THIRD EDITION*. www.copyright.com.

Barrionuevo, D., & Gonzalez, J. (2012). *CRITERIOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS ANECÓICAS*.

Bautista, F., Delfín, H., Delgado, M., & Palacio, J. L. (2004). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. https://www.researchgate.net/publication/236954619

Brégains, J. (2007). *Análisis, síntesis y control de diagramas de radiación generados por distribuciones continuas y discretas utilizando algoritmos estocásticos y redes neuronales artificiales. Aplicaciones.*

Brito Flores, P. P., & López Campos, M. P. (2006). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA ANECOICA PARA LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA*.

Campos Mónica, L., & Flores Paulina, B. (2006). *IMPLEMENTACIÓN DE UNA CÁMARA ANECOICA EN LA BANDA DE 2-3 GHz*.

Cardama Aznar, Á., Roca, L., Rius Casals, J. M., Romeu, J., & Blanch Boris, S. (2004). *Antenas*.

Cruz Altamirano, D. (2009). *Proyecto de una cámara semi-anecoica*.

Esparza Becerra, S. R. (2012). *Análisis eficiente de cámaras semianecoicas en alta frecuencia*.

Esparza, M. (2017). *Montaje, Verificación, Caracterización y Desarrollo de software de cámara anecoica para medida de antenas en diferentes bandas frecuenciales*.

ETS-Lindgren. (2003). *Walkway Absorber*. https://biblus.us.es/bibing/proyectos/use/abreproy/11813/fichero/VI+-+Anexo+documental%252FMaterial+absorbente%252FMicrowave+absorber+selection+guide.pdf

Hemming, L. H. (2002a). *Electromagnetic Anechoic Chamber*. Wiley-IEEE Press.

Hemming, L. H. (2002b). *Electromagnetic Anechoic Chambers: A Fundamental Design and Specification Guide*.

Hernández Pérez, J. L., Solá De Los Santos, J., & Fernández Cruz, R. D. (2019). Estudio empírico de las corrientes de Foucault, combinando un campo magnético con el campo gravitatorio. In *Am. J. Phys. Educ* (Vol. 13, Issue 3). http://www.lajpe.org

Holland Shielding Systems Bv. (2024). *ULTRA HIGH-PERFORMANCE FILTER FOR THE HIGHEST SHIELDING DEMANDS*. https://hollandshielding.com/en/emi-emp-power-signal-data-line-filters

Huidobro, J. M. (2013). *Antenas de telecomunicaciones*.

Lavagnino Fonseca, L. A. (2006). *Evaluación de la radiación emitida por las antenas base de telefonía celular en la ciudad de Guatemala, con base en los estándares permitid*.

Lema, M. (2024). *Antenas, su teoría y fundamentos: Manual práctico para proyectos de ingeniería*.

Ling, S., Sanny, J., & Moebs, W. (2021). *Física Universitaria 3*. openstax.

Londeix, G. (2020, July 12). *La cámara secreta de Microsoft: si se entra en ella, en minutos se llega a la locura*.

Miranda, J. M., Franco, J. L., Sierra, M., & Margineda, J. (2002). *Ingeniería de Microondas. Técnicas experimentales*. Pearson Educación S.A.

Monachesi, E., Frenzel, A. M., Chaile, G., Agustín, C., & Gómez, F. A. (2011). *Conceptos generales de Antenas*. http://www.edutecne.utn.edu.ar

Murillo Fuentes, J. J. (2007). *Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación*.

Nerey Musa, A., Villavicencio Lamas. Alain, Herrera Lao, A., Fernández Soler, B., Carballosa González, D., Pérez Cuellar, H., Castellanos González, H., & Moran González, I. (2014). *Proyecto Final de Antenas*.

Organización de Naciones Unidas. (2022, May 24). *Organización de Desarrollo Sostenible*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education/

Ortega González, D., Fonte Valdés, L., Méndez, A., & Arzola Morris, P. (2017). DISEÑO DE ANTENA DE BOCINA CORRUGADA A 3 GHZ PARA USO EN CÁMARAS ANECOICAS. *Revista Telemática*, *16*(3). http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele

Pellicer Roig, D. (2024, March 27). *Propiedades del cobre (Cu)*. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-cobre-cu_21925

Pérez Guilcaso, E. M., & Tigse Toapanta, W. V. (2021). *Automatización de la Jaula de Faraday para la seguridad de maniobras en el laboratorio de alto voltaje en la carrera de Ingeniería Eléctrica*.

Pinto Ballesteros, Y. C. (2004). *DISEÑO Y ESPECIFICACIÓN DE UNA CÁMARA ANECOICA*.

Popov, A., & Kalimullin, D. (2020). *Automatization of Antenna Measurements in the Anechoic Chamber*.

Rodríguez, V. (2012). *A cone shaped taper anechoic chamber for antenna measurements in the 200 MHz to 18GHz frequency range*.

Rong Chung, L., Teh Hong, L., & Hsi Tseng, C. (2012). *An Innovative Design of Anechoic Chamber for the EM Radiation Measurement at Low Frequencies*.

Sánchez Montenegro, E. A. (2020). Óptica geométrica clínica. *Universidad de La Salle*.

Taybi, C., Moutaouekkil, M. A., Elmagroud, B., & Ziyyat, A. (2018). *Novel Approach for Time-Domain Modeling a Full Anechoic Chamber for Near/Far-Field Antennas Measurement*.

Universidad Técnica del Norte. (2022). *MISIÓN Y VISIÓN – Universidad Técnica del Norte*. https://www.utn.edu.ec/mision-vision/

Zambrano Orejuela, J. I., & Vallejo Ayala, P. (2012). *Física Vectorial 3* (F. P. Vallejo Ayala, Ed.).

ANEXO A

En este apartado se indica los niveles de potencia registrados en un entorno con interferencia, haciendo un barrido angular en saltos de 1°.

Tabla 5

Datos obtenidos con los equipos del laboratorio en un entorno con interferencias

θ	Log Mag (dB)	θ	Log Mag (dB)	θ	Log Mag (dB)
1	-80.572060	121	-70.994087	241	-83.841270
2	-76.230469	122	-73.778481	242	-87.249008
3	-82.400482	123	-70.032547	243	-72.058693
4	-80.067749	124	-73.129440	244	-72.058319
5	-74.225922	125	-72.285599	245	-70.681137
6	-81.128868	126	-68.665604	246	-80.277710
7	-78.012611	127	-78.519119	247	-75.413979
8	-74.582970	128	-69.458656	248	-74.742989
9	-78.879967	129	-66.216057	249	-75.839394
10	-83.753319	130	-71.054962	250	-72.779152
11	-79.449059	131	-72.301071	251	-75.657829
12	-73.598648	132	-73.299728	252	-74.692833
13	-80.703453	133	-69.587280	253	-72.698257
14	-76.763870	134	-73.803062	254	-73.804283
15	-76.313606	135	-71.753372	255	-72.388786
16	-73.904091	136	-71.073578	256	-75.612991
17	-75.702850	137	-69.442459	257	-75.866180
18	-74.760643	138	-76.074051	258	-72.744171

19	-83.444771	139	-72.637917	259	-71.859306
20	-78.656479	140	-69.170723	260	-76.250481
21	-79.378380	141	-67.416183	261	-69.756783
22	-90.949272	142	-69.302612	262	-74.415802
23	-78.329491	143	-66.084679	263	-71.806107
24	-79.682472	144	-67.462242	264	-75.720619
25	-74.214333	145	-66.763657	265	-71.468803
26	-74.298759	146	-72.678291	266	-72.996719
27	-82.277908	147	-68.196037	267	-71.997368
28	-82.298538	148	-69.542442	268	-74.490440
29	-75.166573	149	-69.987503	269	-73.204086
30	-77.056503	150	-71.643356	270	-73.549690
31	-82.369743	151	-69.698318	271	-81.678322
32	-73.471512	152	-67.022331	272	-69.880524
33	-79.378693	153	-66.688683	273	-73.049759
34	-81.324089	154	-67.430679	274	-77.022949
35	-83.614998	155	-68.637161	275	-68.819489
36	-73.773277	156	-70.047623	276	-76.449989
37	-72.821701	157	-69.665451	277	-75.260971
38	-82.696770	158	-68.448402	278	-73.964851
39	-76.671547	159	-67.292259	279	-77.837997
40	-74.987572	160	-69.457603	280	-75.254494
41	-71.674583	161	-65.870697	281	-83.085083
42	-79.105690	162	-69.791481	282	-72.239677
43	-80.834511	163	-67.567688	283	-75.151733

44	-78.518890	164	-74.762032	284	-78.779037
45	-85.898499	165	-67.375717	285	-76.818138
46	-76.025368	166	-68.265839	286	-74.315750
47	-78.494820	167	-67.810883	287	-73.300438
48	-85.442070	168	-66.119858	288	-71.744370
49	-74.002693	169	-68.543327	289	-80.327202
50	-80.279411	170	-71.779640	290	-87.249397
51	-73.960030	171	-66.083946	291	-83.904602
52	-74.038483	172	-68.468460	292	-81.898392
53	-81.933449	173	-71.702873	293	-81.496780
54	-77.821312	174	-70.407463	294	-72.682190
55	-72.787849	175	-71.497963	295	-79.977867
56	-74.486862	176	-73.110847	296	-79.822060
57	-76.805580	177	-69.762817	297	-79.223442
58	-75.748878	178	-70.250092	298	-71.601608
59	-78.011688	179	-69.427711	299	-77.619926
60	-75.390877	180	-68.515251	300	-76.728828
61	-76.121132	181	-67.552147	301	-71.541061
62	-86.617310	182	-67.520638	302	-77.264732
63	-78.133278	183	-67.540749	303	-83.974648
64	-82.208672	184	-66.803871	304	-77.438263
65	-86.430893	185	-67.833183	305	-77.008591
66	-79.911522	186	-66.524933	306	-75.744873
67	-88.735039	187	-67.548317	307	-79.518791
68	-77.613808	188	-66.892632	308	-75.038887

69	-74.569618	189	-68.757912	309	-75.872208
70	-90.603500	190	-66.929878	310	-72.762390
71	-78.075798	191	-67.574341	311	-72.197197
72	-76.915482	192	-68.516548	312	-86.939400
73	-78.754143	193	-66.801117	313	-79.988586
74	-84.599876	194	-68.563858	314	-80.288277
75	-75.793098	195	-66.203667	315	-76.629082
76	-84.061798	196	-68.294182	316	-77.857391
77	-76.300926	197	-66.671440	317	-82.357521
78	-86.766579	198	-70.355820	318	-76.876411
79	-81.458931	199	-70.785843	319	-76.757988
80	-73.689293	200	-65.597931	320	-84.110184
81	-87.389603	201	-68.395363	321	-76.223770
82	-73.787941	202	-68.085007	322	-80.941292
83	-77.956238	203	-67.194687	323	-75.643517
84	-81.920029	204	-72.737068	324	-74.925911
85	-69.458031	205	-70.294518	325	-79.148109
86	-80.309090	206	-71.050209	326	-77.114304
87	-76.342598	207	-67.561783	327	-76.299843
88	-77.333900	208	-67.810043	328	-74.325958
89	-77.802940	209	-68.962212	329	-78.766357
90	-73.882088	210	-69.607857	330	-75.581383
91	-75.920326	211	-70.998558	331	-80.237267
92	-74.442398	212	-72.750847	332	-79.024353
93	-72.328484	213	-69.334412	333	-74.916603

94	-73.912086	214	-70.993561	334	-76.334190
95	-77.778900	215	-70.733612	335	-74.501549
96	-83.836258	216	-67.898827	336	-97.734360
97	-71.545692	217	-73.102730	337	-81.985870
98	-74.054771	218	-70.671417	338	-86.003326
99	-77.872131	219	-69.886543	339	-73.211197
100	-75.224289	220	-69.966248	340	-80.882919
101	-73.688988	221	-68.336761	341	-82.359161
102	-72.174751	222	-81.124077	342	-74.230339
103	-75.470879	223	-75.225189	343	-83.061600
104	-75.030968	224	-71.827042	344	-75.805023
105	-75.367111	225	-69.643402	345	-88.987663
106	-73.953331	226	-72.188011	346	-82.783524
107	-73.575638	227	-77.449341	347	-72.597794
108	-76.255402	228	-71.928627	348	-73.915283
109	-75.039497	229	-73.465088	349	-78.584671
110	-72.982269	230	-67.885803	350	-82.891998
111	-75.189049	231	-76.809464	351	-86.544067
112	-72.271088	232	-78.140701	352	-77.741447
113	-76.862549	233	-72.789040	353	-75.977638
114	-75.353600	234	-74.255127	354	-77.325409
115	-75.539001	235	-77.298729	355	-77.585289
116	-70.312050	236	-75.046318	356	-78.605072
117	-78.098022	237	-74.257561	357	-80.955406
118	-78.793510	238	-74.503548	358	-76.976021

119	-76.011139	239	-72.683510	359	-91.969131
120	-74.621582	240	-74.940063	360	-79.518059

Por otra parte, es importante convertir los datos a miliwatts (mW) para realizar el cálculo de la eficiencia de la antena mediante las fórmulas presentadas en la Tabla 4. Los resultados obtenidos de la conversión de unidades se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6

Conversión de dB a mW

θ	mW	θ	mW	θ	mW
1	0.000000008765849	121	0.000000079541046	241	0.000000004129267
2	0.000000023820622	122	0.000000041894007	242	0.000000001884079
3	0.000000005753761	123	0.000000099253379	243	0.000000062248759
4	0.000000009845213	124	0.000000048646993	244	0.000000062254120
5	0.000000037792690	125	0.000000059079947	245	0.000000085484288
6	0.000000007711044	126	0.000000135968905	246	0.000000009380565
7	0.000000015802977	127	0.000000014063328	247	0.000000028747634
8	0.000000034809918	128	0.000000113275086	248	0.000000033550662
9	0.000000012942057	129	0.000000238998018	249	0.000000026065172
10	0.000000004213744	130	0.000000078433898	250	0.000000052733282
11	0.000000011352568	131	0.000000058869846	251	0.000000027177975
12	0.000000043665174	132	0.000000046776444	252	0.000000033940380
13	0.000000008504616	133	0.000000109969437	253	0.000000053724737
14	0.000000021067500	134	0.000000041657557	254	0.000000041645847
15	0.000000023368961	135	0.000000066782520	255	0.000000057692771

16	0.000000040699671	136	0.000000078098411	256	0.000000027460023
17	0.000000026897691	137	0.000000113698334	257	0.000000025904905
18	0.000000033414556	138	0.000000024694197	258	0.000000053159746
19	0.000000004524003	139	0.000000054476387	259	0.000000065173253
20	0.000000013625489	140	0.000000121039661	260	0.000000023711111
21	0.000000011538836	141	0.000000181293277	261	0.000000105760063
22	0.000000000803661	142	0.000000117419114	262	0.000000036175938
23	0.000000014690984	143	0.000000246338391	263	0.000000065976504
24	0.000000010758527	144	0.000000179380735	264	0.000000026787865
25	0.000000037893673	145	0.000000210685332	265	0.000000071304953
26	0.000000037164141	146	0.000000053972297	266	0.000000050156601
27	0.000000005918467	147	0.000000151494303	267	0.000000063133985
28	0.000000005890419	148	0.000000111110679	268	0.000000035559529
29	0.000000030432855	149	0.000000100288168	269	0.000000047817999
30	0.000000019694715	150	0.000000068495872	270	0.000000044160197
31	0.000000005794630	151	0.000000107193438	271	0.000000006794661
32	0.000000044962329	152	0.000000198502920	272	0.000000102789227
33	0.000000011538004	153	0.000000214354053	273	0.000000049547769
34	0.000000007372098	154	0.000000180689160	274	0.000000019847468
35	0.000000004350110	155	0.000000136862321	275	0.000000131235430
36	0.000000041944237	156	0.000000098909430	276	0.000000022646500
37	0.000000052219162	157	0.000000108007745	277	0.000000029778506
38	0.000000005374314	158	0.000000142941982	278	0.000000040134227
39	0.000000021520150	159	0.000000186540914	279	0.000000016451303
40	0.000000031713400	160	0.000000113302554	280	0.000000029822950

41	0.000000068005134	161	0.000000258779757	281	0.000000004914640
42	0.000000012286580	162	0.000000104918458	282	0.000000059707969
43	0.000000008251804	163	0.000000175077848	283	0.000000030537023
44	0.000000014064069	164	0.000000033403871	284	0.000000013246352
45	0.000000002571284	165	0.000000182990397	285	0.000000020805885
46	0.000000024972568	166	0.000000149078873	286	0.000000037019027
47	0.000000014142233	167	0.000000165543335	287	0.000000046768797
48	0.000000002856229	168	0.000000244351045	288	0.000000066921089
49	0.000000039786039	169	0.000000139851555	289	0.000000009274271
50	0.000000009376892	170	0.000000066379809	290	0.000000001883911
51	0.000000040178804	171	0.000000246379971	291	0.000000004069488
52	0.000000039459511	172	0.000000142283323	292	0.000000006458933
53	0.000000006407006	173	0.000000067563587	293	0.000000007084709
54	0.000000016514628	174	0.000000091044497	294	0.000000053923863
55	0.000000052627786	175	0.000000070827791	295	0.000000010051093
56	0.000000035588837	176	0.000000048855707	296	0.000000010418231
57	0.000000020866134	177	0.000000105613224	297	0.000000011957924
58	0.000000026614125	178	0.000000094404088	298	0.000000069157486
59	0.000000015806336	179	0.000000114085093	299	0.000000017298458
60	0.000000028900962	180	0.000000140758587	300	0.000000021238175
61	0.000000024427937	181	0.000000175705477	301	0.000000070128395
62	0.000000002179059	182	0.000000176984894	302	0.000000018772703
63	0.000000015369941	183	0.000000176167220	303	0.000000004004379
64	0.000000006013576	184	0.000000208743471	304	0.000000018037390
65	0.000000002274630	185	0.000000164695487	305	0.000000019913193

66	0.000000010205818	186	0.000000222590538	306	0.000000026638680
67	0.000000001338123	187	0.000000175860499	307	0.000000011171742
68	0.000000017322844	188	0.000000204520478	308	0.000000031340888
69	0.000000034917103	189	0.000000133109423	309	0.000000025868974
70	0.000000000870262	190	0.000000202773968	310	0.000000052937204
71	0.000000015574718	191	0.000000174809850	311	0.000000060294861
72	0.000000020344724	192	0.000000140716557	312	0.000000002023299
73	0.000000013322499	193	0.000000208875884	313	0.000000010026316
74	0.000000003467468	194	0.000000139191976	314	0.000000009357769
75	0.000000026344515	195	0.000000239680830	315	0.000000021731605
76	0.000000003924824	196	0.000000148109119	316	0.000000016378001
77	0.000000023437290	197	0.000000215206805	317	0.000000005810960
78	0.000000002105436	198	0.000000092133591	318	0.000000020528580
79	0.000000007146722	199	0.000000083447955	319	0.000000021096053
80	0.000000042763250	200	0.000000275554114	320	0.000000003881339
81	0.000000001824062	201	0.000000144698390	321	0.000000023857394
82	0.000000041802851	202	0.000000155417279	322	0.000000008051389
83	0.000000016009442	203	0.000000190779322	323	0.000000027267687
84	0.000000006426834	204	0.000000053246762	324	0.000000032166877
85	0.000000113291389	205	0.000000093443307	325	0.000000012167157
86	0.000000009313030	206	0.000000078519785	326	0.000000019434331
87	0.000000023213477	207	0.000000175316059	327	0.000000023443136
88	0.000000018476087	208	0.000000165575357	328	0.000000036932117
89	0.000000016584638	209	0.000000126992713	329	0.000000013285084
90	0.000000040906394	210	0.000000109449631	330	0.000000027660607

91	0.000000025583938	211	0.000000079459202	331	0.000000009468328
92	0.000000035955075	212	0.000000053078092	332	0.000000012518858
93	0.000000058499425	213	0.000000116562486	333	0.000000032235893
94	0.000000040624815	214	0.000000079550681	334	0.000000023258462
95	0.000000016676696	215	0.000000084457612	335	0.000000035468686
96	0.000000004134035	216	0.000000162224820	336	0.000000000168486
97	0.000000070053655	217	0.000000048947104	337	0.000000006330135
98	0.000000039311797	218	0.000000085675826	338	0.000000002509963
99	0.000000016322508	219	0.000000102646867	339	0.000000047739768
100	0.000000030031090	220	0.000000100780196	340	0.000000008160337
101	0.000000042766253	221	0.000000146664126	341	0.000000005808766
102	0.000000060607295	222	0.000000007719556	342	0.000000037754272
103	0.000000028373447	223	0.000000030024868	343	0.000000004941286
104	0.000000031398088	224	0.000000065659232	344	0.000000026272276
105	0.000000029059551	225	0.000000108557492	345	0.000000001262507
106	0.000000040240827	226	0.000000060422529	346	0.000000005268022
107	0.000000043897137	227	0.000000017991439	347	0.000000054982008
108	0.000000023684259	228	0.000000064141232	348	0.000000040594921
109	0.000000031336486	229	0.000000045028886	349	0.000000013852651
110	0.000000050323762	230	0.000000162712044	350	0.000000005138072
111	0.000000030275763	231	0.000000020847482	351	0.000000002216120
112	0.000000059277680	232	0.000000015343693	352	0.000000016821135
113	0.000000020594208	233	0.000000052613355	353	0.000000025248536
114	0.000000029150097	234	0.000000037539398	354	0.000000018512245
115	0.000000027931863	235	0.000000018626322	355	0.000000017436973

116	0.000000093066847	236	0.000000031287308	356	0.000000013787731
117	0.000000015495222	237	0.000000037518365	357	0.000000008025265
118	0.000000013202282	238	0.000000035452364	358	0.000000020063094
119	0.000000025054521	239	0.000000053907476	359	0.000000000635458
120	0.000000034501804	240	0.000000032062228	360	0.000000011173625

ANEXO B

En este apartado se indica los niveles de potencia registrados dentro del prototipo, haciendo un barrido angular en saltos de 1°.

Tabla 7

Datos obtenidos durante el barrido angular dentro del prototipo

θ	Log Mag (dB)	θ	Log Mag (dB)	θ	Log Mag (dB)
1	-53.418121	121	-46.83717	241	-39.58062
2	-53.10379	122	-46.466461	242	-39.578831
3	-52.911469	123	-47.170101	243	-39.560959
4	-52.63113	124	-46.963211	244	-39.520851
5	-53.145889	125	-46.480301	245	-39.75885
6	-52.719559	126	-46.63298	246	-39.633018
7	-51.956039	127	-46.381142	247	-39.95602
8	-51.310928	128	-46.322041	248	-39.958561
9	-51.024502	129	-45.892262	249	-39.920368
10	-50.39164	130	-45.746719	250	-40.212181
11	-50.384998	131	-46.22633	251	-40.401249
12	-50.573761	132	-46.171909	252	-40.72393
13	-49.95454	133	-46.029491	253	-40.868389
14	-49.854939	134	-46.287029	254	-40.784752
15	-50.069248	135	-45.816292	255	-41.06356
16	-49.10944	136	-46.00227	256	-41.156609
17	-49.430481	137	-45.740391	257	-41.306229
18	-48.977341	138	-46.031059	258	-41.449081
19	-48.9305	139	-45.81908	259	-41.312199

20	-48.926628	140	-45.681171	260	-41.334801
21	-49.50404	141	-45.583488	261	-41.506611
22	-49.150219	142	-45.698608	262	-41.274521
23	-49.31535	143	-45.43325	263	-41.002281
24	-49.69677	144	-45.3736	264	-41.06776
25	-50.03931	145	-45.405071	265	-40.794361
26	-50.23111	146	-45.592972	266	-40.870731
27	-50.8265	147	-45.477451	267	-40.742352
28	-51.293701	148	-45.689999	268	-40.537251
29	-52.6078	149	-45.620281	269	-40.67765
30	-53.248241	150	-45.881939	270	-40.2896
31	-55.174389	151	-45.756359	271	-40.208439
32	-56.2976	152	-45.841469	272	-40.078011
33	-58.437389	153	-46.12875	273	-40.118488
34	-60.496201	154	-46.238892	274	-40.03791
35	-63.857311	155	-46.213631	275	-40.081059
36	-67.47226	156	-46.554989	276	-40.183971
37	-71.355423	157	-46.233021	277	-40.075169
38	-75.192741	158	-46.832989	278	-40.247601
39	-70.060333	159	-46.742729	279	-40.326382
40	-64.039871	160	-46.919239	280	-40.321701
41	-65.422363	161	-46.894779	281	-40.54715
42	-60.96983	162	-47.006649	282	-40.807171
43	-58.185699	163	-47.053711	283	-40.912651
44	-58.548019	164	-47.50016	284	-41.080139

45	-56.406761	165	-47.684891	285	-41.454231
46	-56.748501	166	-47.68214	286	-41.66996
47	-56.44276	167	-47.597431	287	-41.915939
48	-56.099281	168	-48.040951	288	-42.431671
49	-56.715691	169	-48.09687	289	-42.299
50	-57.638729	170	-48.699581	290	-42.71867
51	-57.434212	171	-48.229912	291	-43.01276
52	-57.664909	172	-48.684132	292	-43.468781
53	-58.44873	173	-48.890549	293	-43.772888
54	-60.470879	174	-49.01363	294	-43.914261
55	-60.006821	175	-49.910709	295	-44.221649
56	-63.712749	176	-49.638592	296	-44.590912
57	-62.679611	177	-49.798431	297	-44.903252
58	-66.961998	178	-50.998329	298	-45.074619
59	-75.256187	179	-53.007198	299	-45.100319
60	-67.698051	180	-52.790211	300	-45.794891
61	-64.476341	181	-53.93074	301	-45.73584
62	-62.08437	182	-54.37418	302	-45.56044
63	-59.360359	183	-57.00209	303	-45.913601
64	-58.41304	184	-57.21283	304	-45.476479
65	-55.84539	185	-57.524342	305	-45.89653
66	-55.463589	186	-56.06012	306	-45.541039
67	-54.274811	187	-54.628712	307	-45.6521
68	-53.646339	188	-53.500118	308	-45.474659
69	-52.621811	189	-53.23101	309	-45.593651

70	-51.820469	190	-52.842838	310	-45.542278
71	-50.818981	191	-52.022221	311	-45.385479
72	-51.9081	192	-52.092289	312	-45.481541
73	-51.132359	193	-51.057529	313	-45.547642
74	-50.349998	194	-50.154518	314	-45.51683
75	-50.643871	195	-49.843021	315	-45.283611
76	-49.669762	196	-49.238548	316	-45.791519
77	-50.117222	197	-48.170589	317	-46.966782
78	-49.326519	198	-47.50634	318	-46.810131
79	-49.24609	199	-46.693748	319	-47.148441
80	-48.62635	200	-46.383888	320	-47.589668
81	-48.484138	201	-45.774071	321	-48.036659
82	-48.46101	202	-45.221729	322	-48.291489
83	-48.010342	203	-44.465012	323	-49.354912
84	-47.880291	204	-44.154781	324	-50.714958
85	-47.704639	205	-43.703739	325	-51.088161
86	-47.62138	206	-43.227741	326	-52.2715
87	-47.833519	207	-43.326408	327	-53.199169
88	-46.999481	208	-42.660881	328	-54.905441
89	-47.28368	209	-42.323959	329	-55.454231
90	-46.82513	210	-42.441608	330	-58.788189
91	-47.107498	211	-41.779991	331	-59.622971
92	-46.652721	212	-41.717911	332	-59.225239
93	-46.63303	213	-41.34938	333	-59.40834
94	-46.75948	214	-41.303188	334	-59.613201

95	-46.266499	215	-40.92625	335	-58.06802
96	-46.222618	216	-40.67453	336	-57.493279
97	-45.744228	217	-40.385948	337	-56.359112
98	-45.498661	218	-40.213531	338	-55.11235
99	-45.562481	219	-40.0308	339	-55.275261
100	-45.134109	220	-39.709339	340	-55.017319
101	-45.129711	221	-39.66943	341	-53.637138
102	-44.82082	222	-39.595421	342	-52.565849
103	-44.511749	223	-39.492222	343	-52.16925
104	-45.001621	224	-39.560692	344	-52.840851
105	-44.820381	225	-39.318859	345	-52.850639
106	-44.780182	226	-39.38945	346	-53.11668
107	-44.584702	227	-39.292809	347	-52.830971
108	-45.039539	228	-39.341011	348	-52.3992
109	-45.032768	229	-39.17308	349	-52.781681
110	-44.92577	230	-39.21682	350	-52.754829
111	-44.745331	231	-39.126228	351	-53.316978
112	-45.013569	232	-39.151428	352	-53.72842
113	-44.685081	233	-39.304878	353	-53.396561
114	-44.99918	234	-39.32304	354	-54.990639
115	-45.34211	235	-39.33886	355	-54.159569
116	-45.08342	236	-39.430519	356	-54.831001
117	-45.215778	237	-39.474949	357	-55.44136
118	-45.590519	238	-39.416828	358	-54.350071
119	-45.774899	239	-39.41885	359	-54.704079

120	-46.020531	240	-39.495022	360	-54.058788

De igual manera, se aplican las fórmulas de la Tabla 4 para determinar la eficiencia de la antena dentro del prototipo de la cámara anecoica. La conversión de estas unidades se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8

Conversión de unidades a mW con los datos obtenidos dentro del prototipo

θ	mW	θ	mW	θ	mW
1	0.000004551850	121	0.000020714908	241	0.000110138206
2	0.000004893516	122	0.000022560769	242	0.000110183585
3	0.000005115088	123	0.000019186241	243	0.000110637945
4	0.000005456159	124	0.000020122359	244	0.000111664442
5	0.000004846309	125	0.000022488987	245	0.000105709739
6	0.000005346186	126	0.000021712108	246	0.000108817364
7	0.000006373766	127	0.000023008367	247	0.000101017822
8	0.000007394473	128	0.000023323617	248	0.000100958735
9	0.000007898594	129	0.000025749796	249	0.000101850508
10	0.000009137681	130	0.000026627359	250	0.000095231780
11	0.000009151667	131	0.000023843335	251	0.000091174859
12	0.000008762417	132	0.000024143993	252	0.000084646109
13	0.000010105225	133	0.000024948871	253	0.000081876845
14	0.000010339656	134	0.000023512407	254	0.000083468921
15	0.000009841815	135	0.000026204194	255	0.000078278771
16	0.000012275975	136	0.000025105738	256	0.000076619462

17	0.000011401235	137	0.000026666186	257	0.000074024776
18	0.000012655109	138	0.000024939865	258	0.000071629497
19	0.000012792340	139	0.000026187377	259	0.000073923088
20	0.000012803750	140	0.000027032294	260	0.000073539369
21	0.000011209752	141	0.000027647203	261	0.000070686894
22	0.000012161247	142	0.000026923976	262	0.000074567211
23	0.000011707522	143	0.000028620354	263	0.000079391115
24	0.000010723165	144	0.000029016164	264	0.000078203106
25	0.000009909894	145	0.000028806660	265	0.000083284446
26	0.000009481761	146	0.000027586894	266	0.000081832704
27	0.000008267039	147	0.000028330543	267	0.000084287816
28	0.000007423862	148	0.000026977401	268	0.000088363905
29	0.000005485548	149	0.000027413968	269	0.000085552952
30	0.000004733429	150	0.000025811075	270	0.000093549183
31	0.000003037813	151	0.000026568320	271	0.000095313869
32	0.000002345525	152	0.000026052722	272	0.000098219767
33	0.000001433049	153	0.000024385126	273	0.000097308595
34	0.000000892031	154	0.000023774468	274	0.000099130889
35	0.000000411404	155	0.000023913156	275	0.000098150858
36	0.000000178967	156	0.000022105539	276	0.000095852380
37	0.000000073191	157	0.000023806629	277	0.000098284063
38	0.000000030250	158	0.000020734860	278	0.000094458251
39	0.000000098620	159	0.000021170304	279	0.000092760226
40	0.000000394469	160	0.000020327132	280	0.000092860261
41	0.000000286922	161	0.000020441940	281	0.000088162724

42	0.000000799866	162	0.000019922099	282	0.000083039151
43	0.000001518554	163	0.000019707380	283	0.000081046619
44	0.000001397005	164	0.000017782139	284	0.000077980515
45	0.000002287304	165	0.000017041621	285	0.000071544607
46	0.000002114219	166	0.000017052419	286	0.000068077563
47	0.000002268423	167	0.000017388291	287	0.000064328896
48	0.000002455115	168	0.000015700190	288	0.000057125880
49	0.000002130252	169	0.000015499333	289	0.000058897926
50	0.000001722373	170	0.000013490930	290	0.000053472809
51	0.000001805422	171	0.000015031724	291	0.000049971686
52	0.000001712021	172	0.000013539007	292	0.000044990612
53	0.000001429312	173	0.000012910561	293	0.000041947994
54	0.000000897247	174	0.000012549806	294	0.000040604475
55	0.000000998431	175	0.000010207728	295	0.000037829892
56	0.000000425329	176	0.000010867779	296	0.000034746319
57	0.000000539559	177	0.000010475069	297	0.000032335144
58	0.000000201280	178	0.000007946339	298	0.000031084086
59	0.000000029811	179	0.000005003573	299	0.000030900685
60	0.000000169901	180	0.000005259917	300	0.000026333640
61	0.000000356752	181	0.000004045070	301	0.000026694144
62	0.000000618818	182	0.000003652431	302	0.000027794317
63	0.000001158682	183	0.000001994302	303	0.000025623585
64	0.000001441106	184	0.000001899840	304	0.000028336884
65	0.000002602921	185	0.000001768340	305	0.000025724503
66	0.000002842111	186	0.000002477354	306	0.000027918758

67	0.000003736964	187	0.000003444521	307	0.000027213851
68	0.000004318830	188	0.000004466715	308	0.000028348762
69	0.000005467879	189	0.000004752247	309	0.000027582581
70	0.000006575868	190	0.000005196563	310	0.000027910795
71	0.000008281364	191	0.000006277372	311	0.000028936906
72	0.000006444511	192	0.000006176908	312	0.000028303875
73	0.000007704848	193	0.000007838755	313	0.000027876343
74	0.000009225719	194	0.000009650464	314	0.000028074821
75	0.000008622097	195	0.000010368070	315	0.000029623673
76	0.000010790059	196	0.000011916403	316	0.000026354095
77	0.000009733696	197	0.000015238461	317	0.000020105820
78	0.000011677452	198	0.000017756853	318	0.000020844280
79	0.000011895727	199	0.000021410421	319	0.000019282170
80	0.000013720344	200	0.000022993824	320	0.000017419400
81	0.000014177061	201	0.000026460186	321	0.000015715713
82	0.000014252761	202	0.000030048798	322	0.000014820099
83	0.000015811235	203	0.000035768341	323	0.000011601357
84	0.000016291869	204	0.000038416863	324	0.000008482116
85	0.000016964306	205	0.000042621242	325	0.000007783661
86	0.000017292668	206	0.000047558254	326	0.000005927206
87	0.000016468275	207	0.000046489963	327	0.000004787217
88	0.000019955008	208	0.000054189095	328	0.000003231885
89	0.000018690977	209	0.000058560409	329	0.000002848242
90	0.000020772415	210	0.000056995320	330	0.000001321847
91	0.000019464811	211	0.000066374445	331	0.000001090694

92	0.000021613639	212	0.000067330044	332	0.000001195298
93	0.000021711859	213	0.000073292916	333	0.000001145951
94	0.000021088806	214	0.000074076627	334	0.000001093150
95	0.000023623819	215	0.000080793235	335	0.000001560264
96	0.000023863723	216	0.000085614436	336	0.000001781034
97	0.000026642637	217	0.000091496651	337	0.000002312538
98	0.000028192520	218	0.000095202181	338	0.000003081520
99	0.000027781258	219	0.000099293313	339	0.000002968068
100	0.000030661197	220	0.000106921760	340	0.000003149692
101	0.000030692262	221	0.000107908834	341	0.000004327990
102	0.000032954748	222	0.000109763488	342	0.000005538793
103	0.000035385481	223	0.000112402973	343	0.000006068411
104	0.000031610976	224	0.000110644747	344	0.000005198941
105	0.000032958080	225	0.000116980669	345	0.000005187237
106	0.000033264561	226	0.000115094614	346	0.000004879013
107	0.000034796038	227	0.000117684455	347	0.000005210782
108	0.000031336183	228	0.000116385506	348	0.000005755459
109	0.000031385077	229	0.000120973989	349	0.000005270258
110	0.000032167921	230	0.000119761713	350	0.000005302945
111	0.000033532575	231	0.000122286130	351	0.000004659102
112	0.000031524129	232	0.000121578617	352	0.000004237971
113	0.000034001016	233	0.000117357865	353	0.000004574503
114	0.000031628748	234	0.000116868104	354	0.000003169101
115	0.000029227320	235	0.000116443165	355	0.000003837453
116	0.000031021158	236	0.000114011353	356	0.000003287758

117	0.000030090001	237	0.000112850919	357	0.000002856696
118	0.000027602480	238	0.000114371338	358	0.000003672763
119	0.000026455142	239	0.000114318101	359	0.000003385261
120	0.000025000397	240	0.000112330528	360	0.000003927545

ANEXO C

En este anexo se muestra el código desarrollado en Matlab, el cual permite determinar el nivel de potencia utilizando dos archivos .cvs obtenidos en las mediciones correspondientes al escenario con interferencia y dentro del prototipo de una cámara anecoica. El cálculo de la atenuación se realiza obteniendo, para cada ángulo, la diferencia entre los datos medidos. Posteriormente, se realiza el promedio del conjunto de diferencia para conocer el valor aproximado de la atenuación entre ambos ejemplos seleccionados.

Código:

```
% 1) Cargar CSV CON interferencia
% 2) Cargar CSV SIN interferencia
% 3) Alinear por ángulos comunes
% 4) Calcular atenuación:
%         ΔS21 = S21_con_interferencia - S21_sin_interferencia
% 5) Graficar resultados

clc;

%% === 1) Cargar archivo CON interferencia ===
[fileA, pathA] = uigetfile('*.csv', ...
    'Selecciona archivo S21 (CON INTERFERENCIA)');
if isequal(fileA, 0)
    error('No seleccionaste archivo con interferencia.');
end

MA = readmatrix(fullfile(pathA, fileA));

if size(MA, 2) < 2
    error('El CSV debe tener al menos 2 columnas (ángulo, S21).');
end

thetaA = MA(:, 1);
S21A   = MA(:, 2);

fprintf('\nArchivo con interferencia cargado: %s\n', fileA);

%% === 2) Cargar archivo SIN interferencia ===
[fileC, pathC] = uigetfile('*.csv', ...
    'Selecciona archivo S21 (SIN INTERFERENCIA)');
if isequal(fileC, 0)
    error('No seleccionaste archivo sin interferencia.');
end

MC = readmatrix(fullfile(pathC, fileC));

if size(MC, 2) < 2
    error('El CSV debe tener al menos 2 columnas (ángulo, S21).');
end
```

```
thetaC = MC(:, 1);
S21C   = MC(:, 2);

fprintf('Archivo .csv sin dentro del prototipo: %s\n\n', fileC);


%% === 3) Limpiar NaN/Inf ===
vA = isfinite(thetaA) & isfinite(S21A);
vC = isfinite(thetaC) & isfinite(S21C);

thetaA = thetaA(vA);  S21A = S21A(vA);
thetaC = thetaC(vC);  S21C = S21C(vC);

if isempty(S21A) || isempty(S21C)
    error('Uno de los archivos no contiene datos válidos.');
end


%% === 4) Ordenar y alinear por ángulo ===
[thetaA_s, ia] = sort(thetaA);
S21A_s = S21A(ia);

[thetaC_s, ic] = sort(thetaC);
S21C_s = S21C(ic);

% Redondeo para evitar errores de coma flotante
angA = round(thetaA_s, 3);
angC = round(thetaC_s, 3);

[theta_common, iA, iC] = intersect(angA, angC);

if numel(iA) < 2
    error('No hay suficientes ángulos comunes entre archivos.');
end

S21A_common = S21A_s(iA);   % CON interferencia
S21C_common = S21C_s(iC);   % SIN interferencia


%% === 5) Calcular la atenuación ===
% Fórmula general:
%     ΔS21 = S21_con_interferencia - S21_sin_interferencia

diffVec   = S21A_common - S21C_common;
meanDelta = mean(diffVec, 'omitnan');

fprintf('============================================\n');
fprintf('            RESULTADO DE ATENUACIÓN\n');
fprintf('============================================\n');
fprintf('   Atenuación promedio : %.3f dB\n', meanDelta);
fprintf('============================================\n\n');


%% === 6) Gráfica comparativa ===
figure;
ax = axes;
hold(ax, 'on');

plot(ax, thetaA_s, S21A_s, '-ob','LineWidth',1.2, ...
```

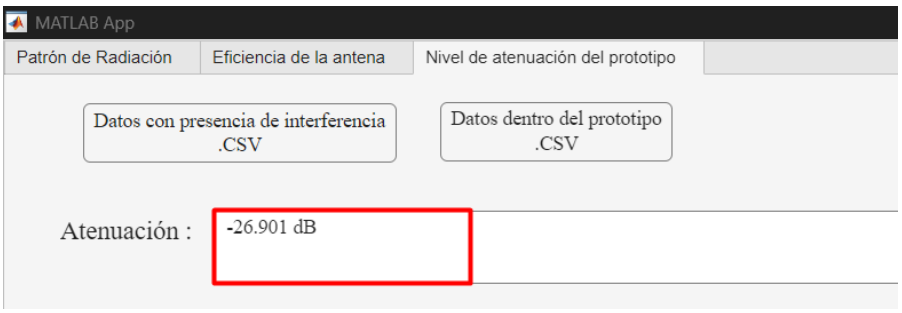
```
    'DisplayName','Con interferencia');
plot(ax, thetaC_s, S21C_s, '-sr','LineWidth',1.2, ...
    'DisplayName','Sin interferencia');
grid(ax, 'on');
xlabel(ax, 'Ángulo (°)','FontWeight','bold');
ylabel(ax, 'S_{21} (dB)','FontWeight','bold');
title(ax, 'Comparación S_{21} (Con vs Sin interferencia)','FontWeight','bold');
legend(ax,'Location','best');

%% Límites de ejes
xmin = min([thetaA_s; thetaC_s]);
xmax = max([thetaA_s; thetaC_s]);
ymin = floor(min([S21A_s; S21C_s])) - 1;
ymax = ceil(max([S21A_s; S21C_s])) + 1;
ax.XLim = [xmin xmax];
ax.YLim = [ymin ymax];
ax.XTick = round(linspace(xmin, xmax, 7), 0);
ax.XTickLabel = arrayfun(@(x) sprintf('%.0f°', x), ax.XTick, 'UniformOutput',
false);
ax.YTick = round(linspace(ymin, ymax, 6), 0);
ax.YTickLabel = arrayfun(@(y) sprintf('%.0f dB', y), ax.YTick, 'UniformOutput',
false);
hold(ax, 'off');
```

- **Atenuación a 2.4 GHz**

Para este caso, se utiliza dos antenas dipolo que operan a 2.4 GHz y se calcula mediante la herramienta Matlab para facilitar el cálculo de manera precisa debido a que se tiene una gran cantidad de datos de aproximadamente 360 mediciones, el resultado se muestra en la Figura 35.

Figura 35

Cálculo de la atenuación del prototipo en 2.4 GHz



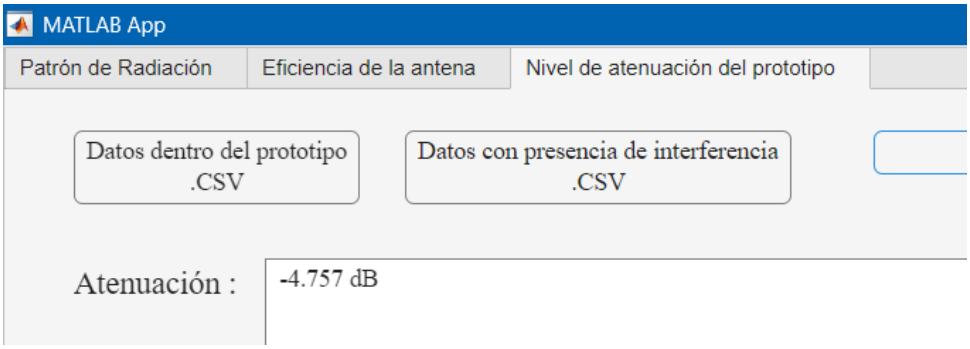
- **Atenuación a 915 MHz**

Para conocer la atenuación a 915 MHz se emplean dos antenas tipo espiral pertenecientes al kit de laboratorio ME1310. Para el análisis, se emplean dos archivos con

extensión .csv obtenidos mediante las mediciones realizadas tanto fuera como dentro del prototipo, manteniendo las mismas condiciones de alineación y distancia entre antenas con el fin de asegurar la comparación de los resultados. Estos datos permiten evaluar cómo se comporta la señal en un entorno libre de interferencias externas frente a un ambiente controlado dentro del prototipo, donde se busca observar el efecto de la malla de aluminio y los materiales absorbentes. El procesamiento de ambas mediciones genera el resultado mostrado en la Figura 36, donde se evidencia el nivel de atenuación que el prototipo es capaz de proporcionar a la frecuencia de 915 MHz.

Figura 36

Cálculo de la atenuación del prototipo en 915 MHz



- **Atenuación en redes móviles**

Mientras que, para el análisis de la atenuación en redes móviles, se revisan las potencias obtenidas en las Figuras 32 y Figura 33. En la Tabla 9 se presentan los valores registrados tanto para la operadora Claro como para Movistar, junto con el nivel de atenuación obtenido en cada caso. Estos resultados permiten comparar el comportamiento de ambas señales al ser ingresadas en el interior del prototipo y evidenciar la eficiencia del sistema para reducir la potencia recibida por los dispositivos móviles.

Tabla 9

Atenuación de potencia en redes móviles Claro y Movistar

Operador móvil	**Nivel de potencia registrada dentro del prototipo**	**Nivel de potencia registrada afuera del prototipo**	$A_{dB} = P_{dentro} - P_{afuera}$	**Resultado**
Movistar	-120 dBm	-75 dBm	$A_{dB} = -120\ dBm - (-75 dBm)$	–45 dB
Claro	-118 dBm	-92 dBm	$A_{dB} = -118\ dBm - (-92\ dBm)$	–26 dB

ANEXO D

Guía del aplicativo desarrollado en MATLAB

Se desarrolla un aplicativo en MATLAB que permite graficar el patrón de radiación en 3D, calcular la eficiencia de la antena y determinar el nivel de atenuación. En la primera interfaz se presentan los datos generales del proyecto, incluyendo el tema de tesis, el nombre del director, asesor y autor. Además, se incorpora un botón que permite generar la gráfica del patrón de radiación, tal como se muestra en la Figura 37.

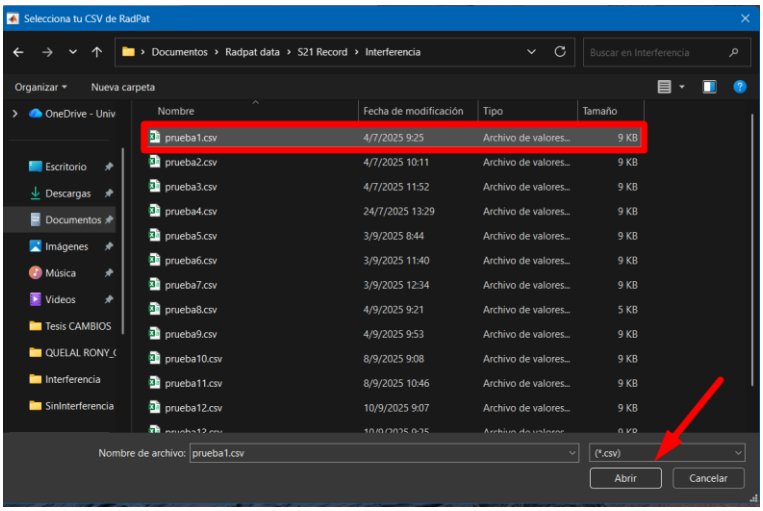
Figura 37

Ventana principal del aplicativo desarrollado en App Designer

Presionando el patrón de radiación 3D, el usuario selecciona un archivo con extensión .csv generado por el software RadPat, correspondiente a las mediciones realizadas en cada escenario. En este caso, se emplea el archivo que contiene los datos obtenidos fuera del prototipo. La Figura 38 muestra el proceso de selección del archivo para su correspondiente procesamiento y graficación.

Figura 38

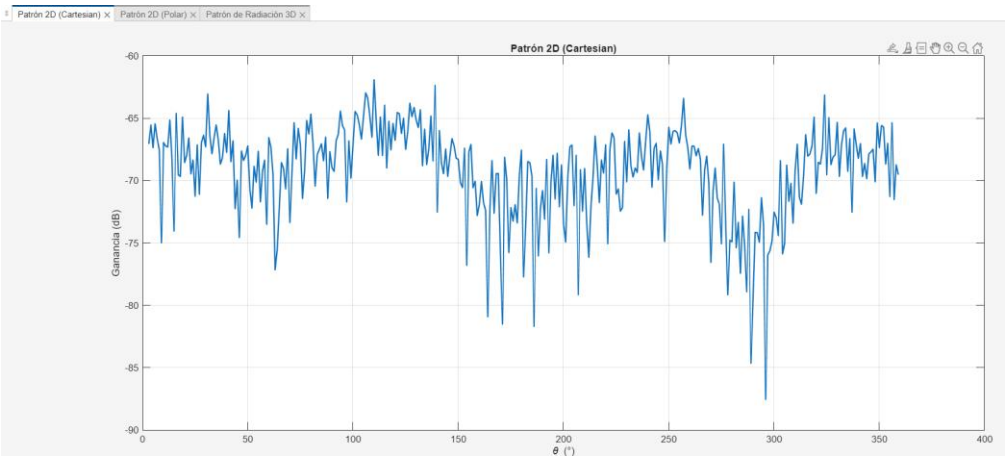
Archivo con extensión .csv para graficar el patrón de radiación en 3D



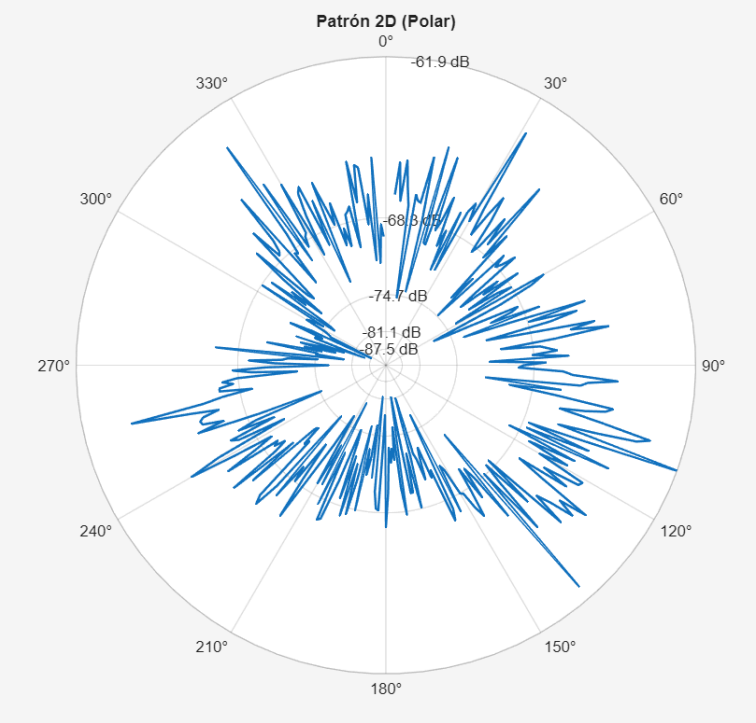
De esta forma, los resultados se despliegan en una ventana Figure. En la Figura 39-a se muestra el patrón de radiación en dos dimensiones representado en forma cartesiana; en la Figura 39-b, el patrón se presenta en coordenadas polares; y finalmente, en la Figura 39-c se visualiza el patrón de radiación en tres dimensiones, acompañado a su derecha por una escala de niveles de potencia correspondiente a los datos recolectados.

Figura 39

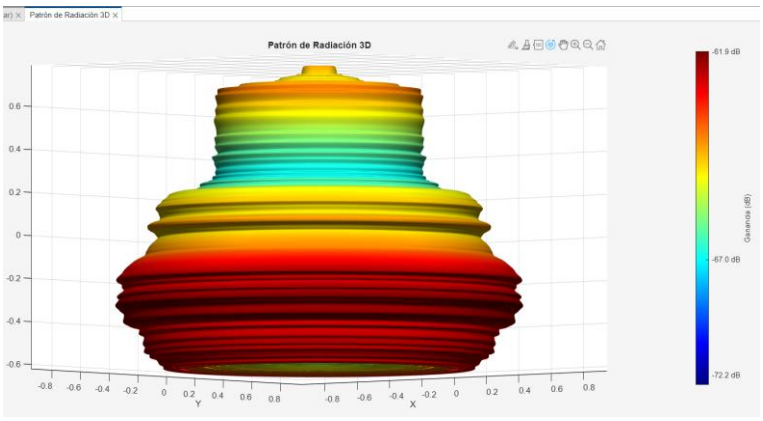
Resultados obtenidos al graficar el patrón de radiación en 3D



(a)



(b)

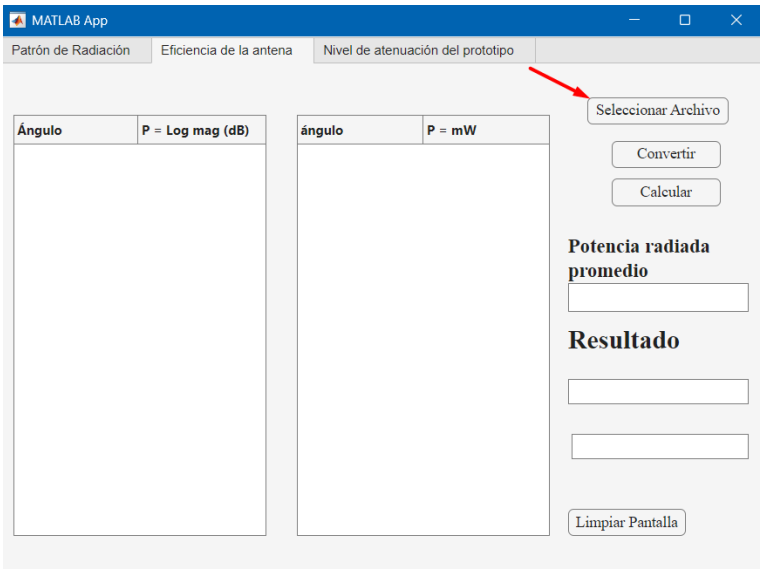


(c)

En la siguiente pestaña del aplicativo se realiza el cálculo de la eficiencia de la antena, tanto en porcentaje como en decibelios (dB). De manera internamente, el sistema aplica las fórmulas presentadas en la Tabla 4 para efectuar dicho cálculo. Como primer paso, es necesario seleccionar el archivo en formato .csv que se va a procesar, utilizando el botón correspondiente, tal como se muestra en la Figura 40.

Figura 40

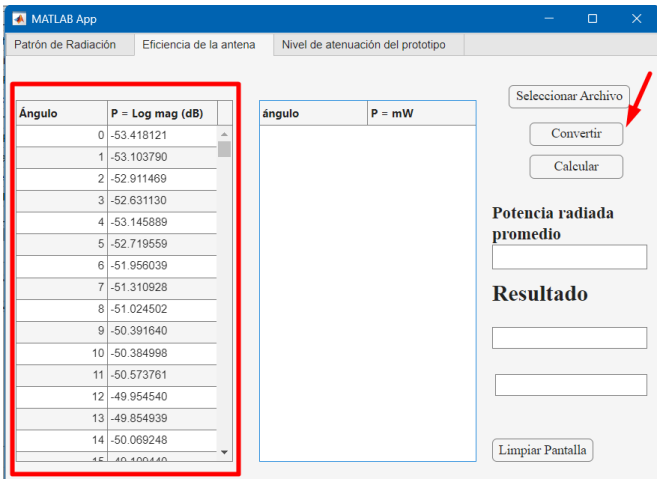
Interfaz de cálculo de la eficiencia de la antena



Se despliegan los datos del archivo seleccionado en dos columnas: la primera corresponde al ángulo (°) y la segunda a la potencia en dB. Posteriormente, mediante la fórmula de conversión a miliwatts (mW), estos valores se transforman para su uso en el cálculo del resultado final. En la Figura 41 se muestra la tabla con los valores provenientes del archivo .csv seleccionado.

Figura 41

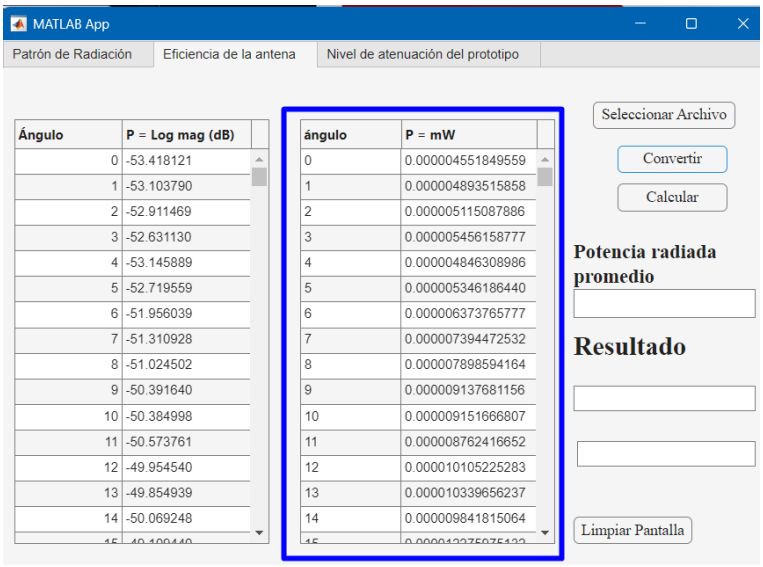
Datos extraídos del archivo .csv medido con RadPat



Al presionar el botón Convertir, la tabla ubicada a la derecha muestra la conversión a miliwatts (mW) de cada valor de potencia correspondiente a cada barrido angular, tal como se observa en la Figura 42. Estos datos son fundamentales para el cálculo de la eficiencia de la antena.

Figura 42

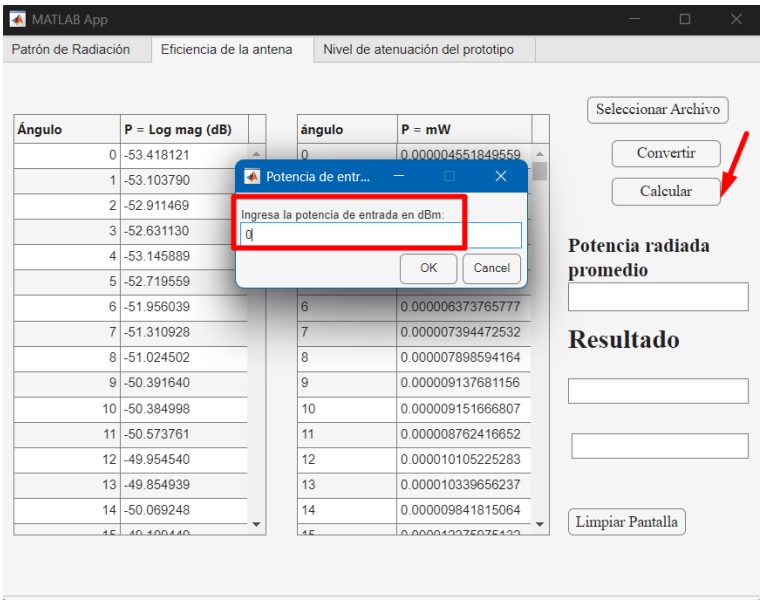
Conversión de los datos a miliwatts



Se muestra una ventana emergente que solicita ingresar la potencia de entrada en dBm. Este parámetro debe conocerse al momento de realizar la medición con el software RadPat, el cual permite configurar valores de potencia de entrada entre 0 y 3 dBm. En este caso, se establece una potencia de entrada de 0 dBm, tal como se muestra en la Figura 43.

Figura 43

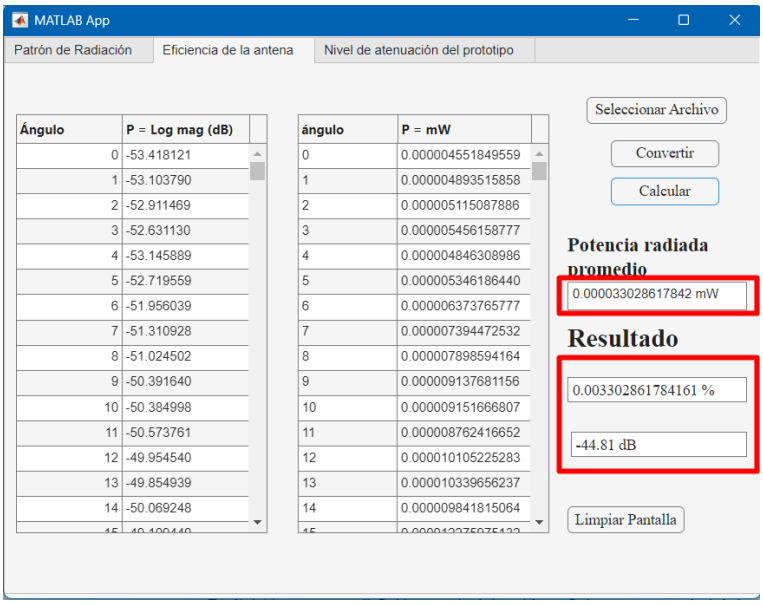
Ingreso de la potencia de entrada en dBm



El valor resultante obtenido es de 0.003311 %, mientras que en decibelios (dB) corresponde a −44.80 dB, tal como se muestra en el recuadro de color rojo de la Figura 44.

Figura 44

Resultado del cálculo de la eficiencia de una antena dipolo



Finalmente, en la pestaña correspondiente al nivel de atenuación del prototipo, se deben seleccionar dos mediciones realizadas con los equipos del laboratorio, específicamente el kit de entrenamiento ME1310 y el analizador de radiofrecuencia Keysight N9913A. Estas mediciones permiten establecer una base de comparación entre los niveles de potencia máximos obtenidos en cada escenario. Posteriormente, se genera un gráfico comparativo de ambos archivos .csv extraídos del software RadPat, tal como se muestra en la Figura 45.

Figura 45

Nivel de atenuación del prototipo