



ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: “DESARROLLO DE UN INTERFAZ GRÁFICO EN PYTHON
PARA OBTENER PATRONES DE RADIACIÓN DE ANTENAS
UTILIZANDO EQUIPOS ANRITSU S362E Y UN SISTEMA DE
POSICIONAMIENTO SINCRONIZADOS MEDIANTE COMANDOS
SCPI Y UN MICROCONTROLADOR”.**

AUTOR: AUZ GUERRA, JOSÉ ANDRÉS

DIRECTOR: ING.DUQUE CAJAS, MANUEL DARÍO Ms.

SANGOLQUÍ

2020



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DESARROLLO DE UN INTERFAZ GRÁFICO EN PYTHON PARA OBTENER PATRONES DE RADIACIÓN DE ANTENAS UTILIZANDO EQUIPOS ANRITSU S362E Y UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO SINCRONIZADOS MEDIANTE COMANDOS SCPI Y UN MICROCONTROLADOR”*** fue realizado por el señor ***Auz Guerra José Andrés***, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 17 de enero del 2020

Ing. Manuel Darío Duque Cajas Ms.



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Auz Guerra José Andrés* declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *“Desarrollo de un interfaz gráfico en python para obtener patrones de radiación de antenas utilizando equipos Anritsu s362e y un sistema de posicionamiento sincronizados mediante comandos scpi y un microcontrolador”* son de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 17 de enero del 2020

José Andrés Auz Guerra

CC: 1714297007




**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Yo, Auz Guerra José Andrés autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “Desarrollo de un interfaz gráfico en python para obtener patrones de radiación de antenas utilizando equipos Anritsu s362e y un sistema de posicionamiento sincronizados mediante comandos scpi y un microcontrolador” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 17 de enero del 2020



José Andrés Auz Guerra

CC: 1714297007

DEDICATORIA

A Dios por ayudarme a equilibrar mis pensamientos.

A mis queridos padres Jaime y Amparito por su amor incondicional y apoyo constante que me ha permitido alcanzar mis objetivos.

A mis hermanos Esteban y Madeline por su cariño y amistad.

A toda mi familia por su amor incondicional.

José Andrés Auz Guerra

AGRADECIMIENTO

A la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” por brindarme las condiciones necesarias para mi crecimiento profesional.

Gracias a mi director de tesis, Ing. Darío Duque por compartir sus conocimientos, por su guía y confianza en mí para desarrollar el proyecto.

Agradezco a todos mis maestros que dedicaron su tiempo para compartir su conocimiento.

Gracias al Ing. Vizcaíno por facilitarme los equipos para hacer mediciones y desarrollar mi proyecto.

José Andrés Auz Guerra

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 General	4
1.3.2 Específicos.....	4

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamento teórico de antenas tipo parche	5
2.1.1 Patrón de radiación de antenas tipo parche	5
2.1.2 Influencia del material en el patrón de radiación de antenas tipo parche.....	7
2.1.3 Directividad	9
2.2 Medición automatizada de patrones de radiación	10
2.2.1 Etapa rotatoria y control	11
2.3 Comandos SCPI para operar el instrumento Anritsu S362E.....	11
2.3.1 Comandos comunes y de consulta SCPI	13
2.3.2 Comandos SCPI para controlar un analizador de espectros.....	14

2.3.3	Principios de la operación remota	15
2.4	Simulador CST Microwave Studio	17
2.4.1	Solucionador en el dominio de la frecuencia.....	20
2.4.2	Solucionador en el dominio del tiempo.....	20
2.5	Cámara anecoica.....	21

CAPITULO III

DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICION, POSTPROCESAMIENTO Y SIMULACIÓN DE ANTENAS DE PRUEBA

3.1	Diseño de la interfaz gráfica para obtener patrones de radiación.....	23
3.1.1	Diagrama de bloques del sistema	23
3.1.2	Elementos del sistema de medición.....	23
3.1.3	Sincronización mediante el microcontrolador.....	25
3.1.4	Estructura de clases del programa	26
3.1.5	Funciones y comunicación entre clases.....	28
3.1.6	Diagrama de flujo para medir patrones de radiación en tiempo real.....	30
3.1.7	Diagrama de flujo para post-procesamiento y obtención de parámetros de antenas.....	31
3.2	Simulación de antena parche de 1 elemento en CST Studio	34
3.3	Simulación de arreglo de antena parche de 2 elementos en CST Studio	37

CAPITULO 4

MEDICIÓN, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

4.1	Obtención de patrones de radiación de antenas utilizando el software creado en Python	41
4.2	Medición de parámetros de radiación de antenas.....	46
4.3	VSWR.....	46
4.4	Pérdidas de cables y conectores	48
4.5	Alineación de antena de transmisión y recepción	55
4.6	Obtención del patrón de radiación real.....	58
4.6.1.1	Patrón de radiación obtenido en el espacio libre para una antena parche de 1 elemento sin compensación de pérdidas.	59

4.6.1.2 Patrón de radiación obtenido en el espacio libre para una antena parche de 1 elemento con compensación de pérdidas	61
4.6.2 Patrón de radiación obtenido en una cámara anecoica para una antena parche de 1 elemento sin compensación de pérdidas.....	63
4.6.3 Patrón de radiación obtenido en una cámara anecoica para una antena parche de 1 elemento con compensación de pérdidas	65
4.6.4 Patrón de radiación obtenido en el espacio libre para un arreglo de antenas parche de 2 elementos sin compensación de pérdidas	67
4.6.5 Patrón de radiación obtenido en el espacio libre para un arreglo de antenas parche de 2 elementos con compensación de pérdidas.....	69
4.6.6 Patrón de radiación obtenido en una cámara anecoica para un arreglo de antenas parche de 2 elementos sin compensación de pérdidas.....	71
4.6.7 Patrón de radiación obtenido en una cámara anecoica para un arreglo de antenas parche de 2 elementos con compensación de pérdidas.	73
4.7 Obtención del patrón de radiación simulado	74
4.7.1 Antena parche de micro línea de 1 elemento.....	75
4.7.2 Antena parche de micro línea de 2 elementos	79
4.8 Análisis de parámetros de antenas.....	81
4.8.1 Parámetros de antenas parche de 1 elemento	83
4.8.2 Parámetros de un arreglo de antenas parche de 2 elementos.....	85
4.8.3 Comparación de Parámetros de antenas parche medidos y simulados.....	88

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.....	93
5.2 Recomendaciones	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	<i>Características de la cámara anecoica</i>	22
Tabla 2:	<i>Elementos utilizados para medir el patrón de radiación.....</i>	24
Tabla 3	<i>Pérdidas en cables a 2.43 GHz para hacer mediciones en el espacio libre</i>	49
Tabla 4	<i>Pérdidas en cables a 2.28 GHz para hacer mediciones en el espacio libre</i>	49
Tabla 5	<i>Pérdidas en cables a 2.43 GHz para hacer mediciones en la cámara anecoica.....</i>	50
Tabla 6:	<i>Pérdidas en cables a 2.28 GHz para hacer mediciones en la cámara anecoica.....</i>	50
Tabla 7	<i>Distancia de separación entre antenas de transmisión y recepción.....</i>	56
Tabla 8	<i>Parámetros de antena parche de 1 elemento medidos en el espacio libre sin compensación de pérdidas</i>	83
Tabla 9	<i>Parámetros de antena parche de 1 elemento medidos en el espacio libre con compensación de pérdidas</i>	83
Tabla 10	<i>Parámetros de antena parche de 1 elemento medidos en una cámara anecoica sin compensación de pérdidas</i>	84
Tabla 11	<i>Parámetros de antena parche de 1 elemento medidos en una cámara anecoica con compensación de pérdidas.....</i>	84
Tabla 12	<i>Parámetros de arreglo de antenas parche de 2 elementos medidos en el espacio libre sin compensación de pérdidas</i>	85
Tabla 13	<i>Parámetros de antena parche de 2 elementos medidos en el espacio libre con compensación de pérdidas</i>	86
Tabla 14	<i>Parámetros de antena parche de 2 elementos medidos en una cámara anecoica sin compensación de pérdidas.....</i>	87
Tabla 15	<i>Parámetros de antena parche de 2 elementos medidos en una cámara anecoica con compensación de pérdidas.....</i>	87
Tabla 16	<i>Parámetros de antena Parche de 1 elemento simulados</i>	88
Tabla 17	<i>Parámetros de un arreglo de antenas parche de 2 elementos simulados</i>	88
Tabla 18	<i>Errores obtenidos al comparar parámetros de antenas parche de 1 elemento con polarización horizontal</i>	89
Tabla 19	<i>Errores obtenidos al comparar parámetros de antenas parche de 1 elemento con polarización vertical.....</i>	89

Tabla 20	<i>Errores obtenidos al comparar parámetros de antenas parche de 2 elementos con polarización horizontal</i>	90
Tabla 21	<i>Errores obtenidos al comparar parámetros de un arreglo de antenas parche de 2 elementos con polarización vertical.....</i>	90
Tabla 22	<i>Análisis de error de la directividad de una antena parche de 1 elemento.....</i>	91
Tabla 23	<i>Análisis de error de la directividad de una antena parche de 2 elementos</i>	92

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Patrón de radiación con plano de tierra igual a 5λ	6
Figura 2	Patrón de radiación con plano de tierra igual a 2λ	6
Figura 3	Pérdidas de retorno utilizando el sustrato FR4	8
Figura 4	Patrón de radiación resultante utilizando el sustrato FR4.....	8
Figura 5	Esquema de un sistema de medición de patrones de radiación automático.....	10
Figura 6	Árbol de comandos	12
Figura 7	Lista de Comandos principales disponibles.....	14
Figura 8	Ventana de configuración de parámetros en Matlab	17
Figura 9	Gráfico del patrón de radiación resultante en coordenadas cartesianas.....	17
Figura 10	Formas disponibles en la sección de modelamiento.....	18
Figura 11	Opciones de visualización de componentes	18
Figura 12	Configuración de puerto tipo guía de onda.....	19
Figura 13	Elementos del sistema de medición.....	23
Figura 14	Proceso para sincronizar el sistema mediante un microcontrolador.....	26
Figura 15	Clases que conforman el programa principal	27
Figura 16	Funciones y señales personalizadas de cada clase.....	29
Figura 17	Diagrama de flujo de la clase live plot	30
Figura 18	Diagrama de flujo para el cálculo del ancho de haz de media potencia en la clase post-procesamiento	31
Figura 19	Diagrama de flujo para el cálculo del ancho de haz entre nulos en la clase post- Procesamiento	32
Figura 20	Hilo principal del sistema de medición.....	33
Figura 21	Lista de parámetros globales	34
Figura 22	Lista de elementos estructurales	34
Figura 23	Parche y alimentación sobre sustrato.....	35
Figura 24	Configuración de rango de frecuencias	35
Figura 25	Parámetros de puerto discreto.....	36
Figura 26	Parámetros de configuración de solucionador en dominio de la frecuencia.....	36
Figura 27	Lista de parámetros globales	37

Figura 28	Lista de elementos estructurales	38
Figura 29	Configuración de rango de frecuencias	38
Figura 30	Parche y alimentación sobre sustrato.....	39
Figura 31	Parámetros de puerto discreto.....	39
Figura 32	Parámetros de configuración de solucionador en dominio de la frecuencia.....	40
Figura 33	Interfaz Gráfica principal del software de medición y post-procesamiento	41
Figura 34	Grupo de elementos de configuración de parámetros de medición	42
Figura 35	Ejemplo de mensaje de advertencia.....	43
Figura 36	Nombre del archivo de Excel especificado para guardar los datos	43
Figura 37	Patrón de radiación generado en tiempo real.....	44
Figura 38	Interfaz de procesamiento de datos almacenados.....	45
Figura 39	Obtención de parámetros de antenas y visualización de patrones de radiación en diferentes sistemas de coordenadas.....	46
Figura 40	VSWR de antena parche rectangular de 1 elemento.....	47
Figura 41	VSWR de arreglo de antenas parche rectangular de 2 elementos	48
Figura 42	Pérdidas de cables en el transmisor a 2.43 GHz para medición en el espacio libre	51
Figura 43	Pérdidas de cables en el receptor a 2.43 GHz para medición en el espacio libre ..	51
Figura 44	Pérdidas de cables en el transmisor a 2.43 GHz para medición en la cámara anecoica.....	52
Figura 45	Pérdidas de cables en el receptor a 2.43 GHz para medición en la cámara anecoica.....	52
Figura 46	Pérdidas de cables en el transmisor a 2.28 GHz para medición en el espacio libre	53
Figura 47	Pérdidas de cables en el receptor a 2.28 GHz para medición en el espacio libre ..	53
Figura 48	Pérdidas de cables en el transmisor a 2.28 GHz para medición en la cámara anecoica.....	54
Figura 49	Pérdidas de cables en el receptor a 2.28 GHz para medición en la cámara anecoica.....	54
Figura 50	Alineamiento de antenas transmisora y receptora	55

Figura 51	Separación entre antenas parche de 1 elemento en el espacio libre.....	56
Figura 52	Separación entre arreglo de antenas parche de 2 elementos en el espacio libre	57
Figura 53	Separación entre antenas parche de 1 elemento dentro de la cámara anecoica	57
Figura 54	Separación entre antenas parche de 2 elementos dentro de la cámara anecoica.....	58
Figura 55	Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en el espacio libre en polarización horizontal sin compensar pérdidas.	59
Figura 56	Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en el espacio libre en polarización vertical sin compensar pérdidas	60
Figura 57	Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en el espacio libre en polarización horizontal con compensación de pérdidas.....	61
Figura 58	Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en el espacio libre en polarización vertical con compensación de pérdidas.....	62
Figura 59	Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en la cámara anecoica en polarización horizontal sin compensar pérdidas	63
Figura 60	Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en la cámara anecoica en polarización vertical sin compensar pérdidas.....	64
Figura 61	Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en la cámara anecoica en polarización horizontal con compensación de pérdidas	65
Figura 62	Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en la cámara anecoica en polarización vertical con compensación de pérdidas	66
Figura 63	Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en el espacio libre en polarización horizontal sin compensar pérdidas	67
Figura 64	Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en el espacio libre en polarización vertical sin compensar pérdidas	68
Figura 65	Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en el espacio libre en polarización horizontal con compensación de pérdidas.....	69
Figura 66	Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en el espacio libre en polarización vertical con compensación de pérdidas	70
Figura 67	Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en la cámara anecoica en polarización horizontal sin compensar pérdidas	71

Figura 68	Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en la cámara anecoica en polarización vertical sin compensar pérdidas.....	72
Figura 69	Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en la cámara anecoica en polarización horizontal con compensación de pérdidas.....	73
Figura 70	Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en la cámara anecoica en polarización vertical con compensación de pérdidas	74
Figura 71	Patrón de radiación en 3 dimensiones de una antena parche de 1 elemento	75
Figura 72	VSWR simulado de antena parche de 1 elemento.....	76
Figura 73	Patrón de radiación simulado de antena parche de 1 elemento con polarización vertical.....	77
Figura 74	Patrón de radiación simulado de antena parche de 1 elemento con polarización horizontal	78
Figura 75	Patrón de radiación en 3 dimensiones de un arreglo de antenas parche de 2 elementos	79
Figura 76	VSWR simulado de un arreglo de antenas parche de 2 elementos.....	79
Figura 77	Patrón de radiación simulado de un arreglo de antenas parche de 2 elementos con polarización vertical.....	80
Figura 78	Patrón de radiación simulado de antena parche de 2 elementos con polarización horizontal	81

RESUMEN

En un sistema inalámbrico las antenas son elementos indispensables, por lo tanto, conocer sus características como el patrón de radiación permite conocer las propiedades de radiación de una antena en función de coordenadas espaciales. Mediante el uso de equipos Anritsu S362E se puede registrar la potencia medida en el modo analizador de espectro, además se puede realizar escalamiento de ejes, ubicar picos, valles y exportar datos de manera manual, es por ello que se plantea operar automáticamente el instrumento mediante comandos SCPI enviados a través de una interfaz gráfica creada en Python que además permitirá sincronizar al sistema de posicionamiento con el instrumento mediante un microcontrolador que detecte señales TTL de forma que se mida la potencia al haber cambiado la posición angular del sistema, también dispondrá de una ventana de procesamiento de datos de manera que se pueda obtener el patrón de radiación en coordenadas polares y cartesianas, el ancho de haz de media potencia, el ancho de haz entre nulos y directividad para posteriormente compararlo con los parámetros obtenidos en un simulador conocido como CST Studio, se trabajará con antenas tipo parche de un elemento y un arreglo de antenas parche de dos elementos para realizar el análisis comparativo.

PALABRAS CLAVE:

- **SCPI**
- **PATRÓN DE RADIACIÓN**
- **ANTENA PARCHE**

ABSTRACT

In a wireless system antennas are indispensable elements, therefore, knowing their characteristics as the radiation pattern allows to know the radiation properties of an antenna based on spatial coordinates. By using Anritsu S362E equipment, the power measured in the spectrum analyzer mode can be recorded, in addition to scaling axes, locating peaks, valleys and exporting data manually, it is therefore considered that the instrument is automatically operated by SCPI commands sent through a graphical interface created in Python that will also allow the positioning system to be synchronized with the instrument through a microcontroller that detects TTL signals so that the power is measured by changing the angular position of the system, it will also have a post-processing window so that the radiation pattern in polar and Cartesian coordinates can be obtained and other antenna parameters like the half power beam width, first null beam width, directivity and later compare it with the parameters obtained in a simulator known as CST Studio, one element patch antennas and an array of two elements patch antennas will be used to perform the comparative analysis.

KEYWORDS:

- **SCPI**
- **RADIATION PATTERN**
- **PATCH ANTENNA**

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las antenas al ser un elemento importante en un sistema inalámbrico de telecomunicaciones; se estudia a este en la carrera de telecomunicaciones a través de una asignatura definida como antenas. en el laboratorio existen diferentes tipos de antenas por lo que los estudiantes pueden relacionar la teoría con la práctica.

El laboratorio de antenas adquirió varios sistemas de antenas en VHF y UHF en el año 2012. de igual manera en el año 2004 se compró un kit de antenas en la banda de 2.4 GHz (incluye antenas tipo parche de un solo elemento y arreglo de dos elementos) así como antenas mono polo en la banda de 914 MHz. En estos sistemas se tienen antenas de diferentes tipos y frecuencias de trabajo, así como acopladores direccionales.

En el laboratorio de sistemas avanzados de telecomunicaciones existe el equipo Anritsu S362E. este equipo tiene tres modos de operación: a) analizador de espectros b) analizador de antena c) analizador de cable. Tiene un ancho de banda de 100 KHz a 6 GHz. Para medir los parámetros de las antenas este equipo se lo ha utilizado en los dos primeros modos de operación. para cumplir con el objetivo del desarrollo de la tesis, se aprovecha de la presencia del puerto USB tipo b que dispone el equipo mediante el cual se puede enviar comandos desde un computador para manipular algunas características del equipo y realizar mediciones de: potencia, vswr, pérdidas de retorno, etc.

Con las mediciones obtenidas en el analizador de espectros se puede procesar estos datos para graficar patrones de radiación con ayuda de herramientas de software como octave o Matlab.

Actualmente en el laboratorio se trabaja con antenas tipo parche especialmente por su bajo costo y gracias a la información teórica disponible para calcular su tamaño, frecuencia de operación y diferentes parámetros de antenas, se puede optar por utilizar simuladores y equipos de medición para contrastar los resultados teóricos y experimentales.

1.2 Justificación

El patrón de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena, generalmente se representa en escala logarítmica o normalizada con respecto a un valor máximo (Balanis, 2005).

El equipo Anritsu s362e incluye el modo analizador de espectros detecta señales en rangos de 100 KHz a 6 GHz (Anritsu, 2009), permite registrar los niveles de potencia medida en diferentes posiciones angulares con ayuda de un sistema de posicionamiento, estos datos requieren ser analizados y ordenados para determinar diferentes parámetros de radiación. Al existir gran cantidad de información de medidas de antenas; para poder automatizar, se requiere procesar mediante algún programa que cuente con módulos para manipular matrices y arreglos; en este caso Python un lenguaje de programación libre que cuenta con estas características. Al sistematizar se puede obtener representaciones en diferentes sistemas de coordenadas de los patrones de radiación medidos, crear representaciones absolutas o relativas de los patrones de radiación.

Además este lenguaje de programación cuenta con paquetes que permiten interactuar con el Anritsu mediante comandos SCPI, gracias a estos comandos se puede obtener respuestas del instrumento, obtener alertas , enviar mensajes de control , escoger entre diferentes modos de medidas como puede ser: modo1 analizador de espectro, modo2 analizador vectorial (Anritsu, 2012) .Utilizando el modo 1 se puede fijar la frecuencia de inicio , parada y frecuencia central ,ubicar marcadores en picos y valles para obtener el nivel de potencia o incluso realizar escalamiento de ejes, un parámetro indispensable que se puede adquirir con este tipo de programación son las alertas o banderas en conjunto con un microcontrolador se puede sincronizar el sistema de posicionamiento ats-10 que produce una señal TTL y el equipo Anritsu utilizando interrupciones de esta forma se puede hacer captura de datos en tiempo real y de forma automática , además las alertas permitirán que un estudiante pueda manipular el equipo desde un computador reduciendo los riesgos de daños en el mismo por una mal manejo.

Es importante validar estos parámetros por lo tanto se utilizará antenas tipo parche de 1 o 2 elementos de marca Manntel cuyos parámetros y especificaciones son conocidas. además, se utilizará simuladores como CST el cual es un paquete de software para análisis y diseño electromagnético en rangos de alta frecuencia que simplifica el proceso de obtención de estructuras como antenas (CST microwawe studio, 2010), utilizando esta herramienta se puede obtener parámetros y patrones de radiación que serán comparados con los producidos por los datos reales medidos y así poder verificar que los resultados estén dentro de los márgenes especificados por el fabricante.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Desarrollar una interfaz gráfica en Python para obtener patrones de radiación y parámetros de antenas utilizando equipos Anritsu S362E y un sistema de posicionamiento con 1 grado de libertad sincronizados mediante comandos SCPI y un microcontrolador

1.3.2 Específicos

- Desarrollar el estado del arte sobre arreglos de antenas tipo parche y su patrón de radiación resultante considerando sus especificaciones técnicas
- Diseñar una interfaz gráfica en Python que permita enviar comandos de control, realizar consultas y recibir alertas de equipos Anritsu S362E mediante comandos SCPI
- Realizar una conexión entre un microcontrolador y un sistema de posicionamiento para sincronizar con el sistema de medida mediante software y comandos SCPI
- Crear una ventana para obtener parámetros de antenas como Directividad, ancho de haz de media potencia, ancho de haz entre nulos, utilizando antenas Parche AMITEC disponibles.
- Crear una ventana de post-procesamiento para graficar patrones de radiación en el plano E y H en diferentes sistemas de coordenadas.
- Realizar una simulación de una antena tipo Parche de 1 y 2 elementos en el programa CST y obtener parámetros de antenas y patrones de radiación en el plano E y H
- Analizar los resultados obtenidos tanto en el simulador como en el programa para verificar que el comportamiento se ajuste a las especificaciones técnicas de la antena de prueba

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamento teórico de antenas tipo parche

En aplicaciones de radio móvil y comunicaciones inalámbricas se utilizan antenas tipo parche caracterizadas por bajos costos, mayor desempeño y fácil instalación su frecuencia de operación permite trabajar en el rango de microondas.

Entre las desventajas de este tipo de antenas se encuentra una baja eficiencia, un ancho de banda angosto, por lo que existen métodos creados para aumentar la eficiencia hasta un 90% y el ancho de banda hasta un 35% incrementando la altura del sustrato (Balanis, 2005).

2.1.1 Patrón de radiación de antenas tipo parche

Las antenas tipo parche se presentan en diferentes formas las más comunes son rectangulares y circulares. Los parches consisten en placas metálicas suspendidas sobre planos de tierra, el tamaño reducido de este tipo de antenas limita el control del patrón de radiación por lo que se recurre al uso de arreglos de antenas.

Cuando se diseña un arreglo de antenas tipo parche al estar los elementos más juntos se ensancha el ancho del haz y se eliminan los nulos a lo largo del plano de tierra, existe una relación conocida que indica que al aumentar el ancho del parche se incrementa la directividad reduciéndose el ancho de haz en el plano H (Milligan , 2005).

Para controlar el patrón de radiación de este tipo de antenas se utiliza un plano de tierra de dimensión finita, dependiendo de la dimensión del plano de tierra se producen diferentes casos.

Un plano de tierra de diámetro igual a 5λ produce un mayor rizado y la separación angular entre rizados disminuye mientras que un plano de tierra con un diámetro de 2λ produce el efecto contrario como se observa en la figura 1 y 2. (Milligan , 2005)

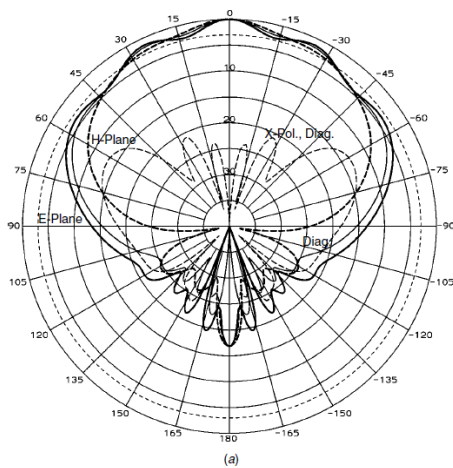


Figura 1. Patrón de radiación con plano de tierra igual a 5λ
Fuente: (Milligan , 2005)

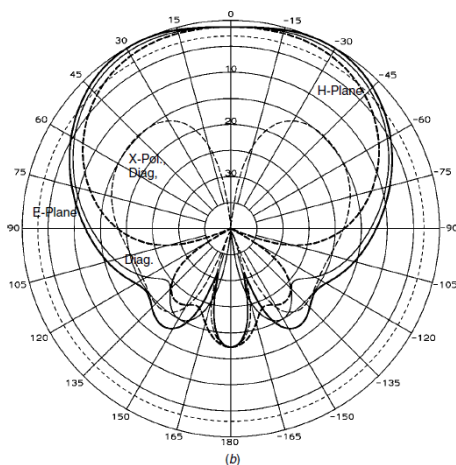


Figura 2. Patrón de radiación con plano de tierra igual a 2λ
Fuente: (Milligan , 2005)

2.1.2 Influencia del material en el patrón de radiación de antenas tipo parche

El patrón de radiación dependerá de varios factores que incluyen el material utilizado en el sustrato, las dimensiones del parche, número de elementos, la directividad es una función del ancho del parche y la constante dieléctrica, para una antena parche normal la directividad está entre 6-8 dB (Patil & Kharade , 2012) .

La elección de un sustrato adecuado es un parámetro importante en el proceso de diseño ya que el grosor y la constante dieléctrica influyen en el ancho, longitud del parche como también en el ancho de la micro línea, frecuencia de operación, ancho de banda, por lo que a manera de ejemplo escogiendo un sustrato con una constante dieléctrica de 2.2 y un grosor de 1.588 mm se obtiene una directividad de 7.5 dB y una ganancia de 6.85 dB además de un coeficiente de reflexión igual a -11 dB . (Shivani , Neha, & Niti , 2014).

Al aumentar el número de elementos se forma un arreglo de antenas parche lo que produce un aumento en la directividad y un mayor tamaño, al utilizar un sustrato con una constante dieléctrica de 2.2 y un grosor de 1.588 mm se obtiene una directividad de 8.7 dB y una ganancia de 9.33 dB además de un coeficiente de reflexión igual a -17 dB (Shivani , Neha, & Niti , 2014) siendo evidente que al aumentar el número de elementos a 2 se obtiene un patrón de radiación con mayor directividad y una disminución del coeficiente de reflexión en la frecuencia de resonancia de 2.4 GHz en el caso de este estudio.

En otro estudio de un artículo técnico se menciona que: al utilizar como sustrato el material epoxi de vidrio FR4 con una constante dieléctrica $\epsilon_r = 4.4$ se diseñó una antena con frecuencia de operación de 4.1 GHz.

La técnica de alimentación consiste en conectar el borde del parche de microcinta a la tira conductora dando como resultado un coeficiente de reflexión menor a -10 dB entre 3 y 5 GHz como se observa en la figura 3 y una directividad de 6.5dB como se observa en la figura 4 (Houda , Khaoula , Mondher , Mongi , & Hamadi , 2016)

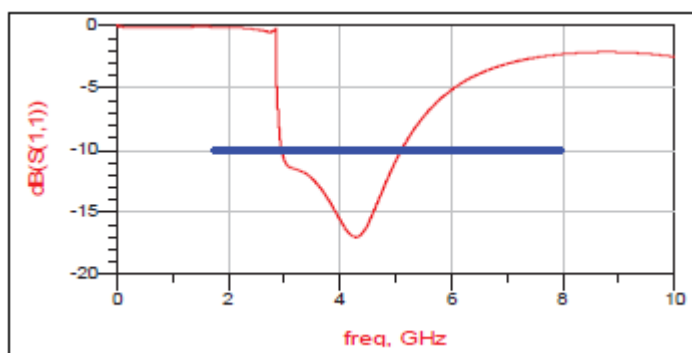


Figura 3. Pérdidas de retorno utilizando el sustrato FR4

Fuente: (Houda , Khaoula , Mondher , Mongi , & Hamadi , 2016)

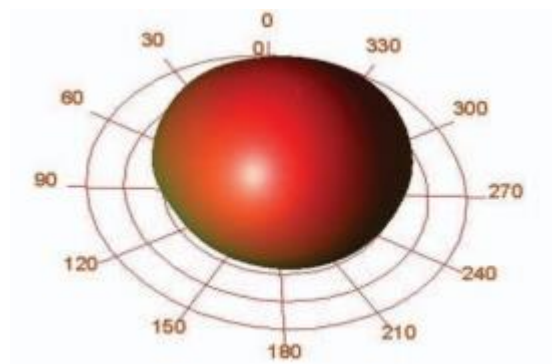


Figura 4. Patrón de radiación resultante utilizando el sustrato FR4

Fuente: (Houda , Khaoula , Mondher , Mongi , & Hamadi , 2016)

2.1.3 Directividad

La directividad es el incremento de la densidad de potencia en una dirección determinada a una distancia fija de la antena transmisora relativa a la densidad de potencia que presenta el mismo valor en toda dirección, usualmente el valor máximo de la directividad es requerido y se expresa como la razón de potencias en dBi (Stutzman, 1998). La estimación de la ganancia y la directividad puede realizarse recurriendo a simples fórmulas disponibles en libros o revistas, se puede evaluar si el patrón de radiación $F(\theta, \varphi)$ es conocido para todos los ángulos usando la siguiente expresión $D = \frac{4\pi}{\Omega}$ donde Ω representa el haz de ángulo sólido y $F(\theta, \varphi)$ representa el patrón de radiación normalizado al pico unitario, el principal problema se presenta por el hecho de que no siempre se disponen de los datos del patrón de radiación completos por lo que la directividad se calcula utilizando esta información limitada mediante la siguiente fórmula:

$$D = \frac{DB}{HP_x HP_y} \quad (1)$$

Donde HP_x y HP_y representan el ancho de haz de media potencias en el plano x o y , DB dependerá del patrón de radiación, por ejemplo, para un patrón con lóbulos de radiación estrechos y lóbulos menores se utiliza la siguiente expresión:

$$D = \frac{32.383}{HP_{Eo} HP_{Ho}} \quad (2)$$

En caso de Patrones que no poseen lóbulos de radiación menores toda la radiación se concentra en el lóbulo principal por lo que se puede aproximar el haz de ángulo sólido como: $\Omega = HP_{Eo} HP_{Ho}$ (Stutzman, 1998) ,dando como resultado la siguiente directividad:

$$D = \frac{4 \pi}{HP_{E^\circ} HP_{H^\circ}} \quad (3)$$

Donde HP_{E° representa el ancho de haz de media potencia en el plano E y HP_{H° representa el ancho de haz de media potencia en el plano H .

2.2 Medición automatizada de patrones de radiación

Para agilizar la medición de patrones de radiación se recurre al uso de herramientas de software y hardware que permiten realizar mediciones precisas y más rápidas, existen distintos esquemas que permiten alcanzar este objetivo como el mostrado en la figura 5

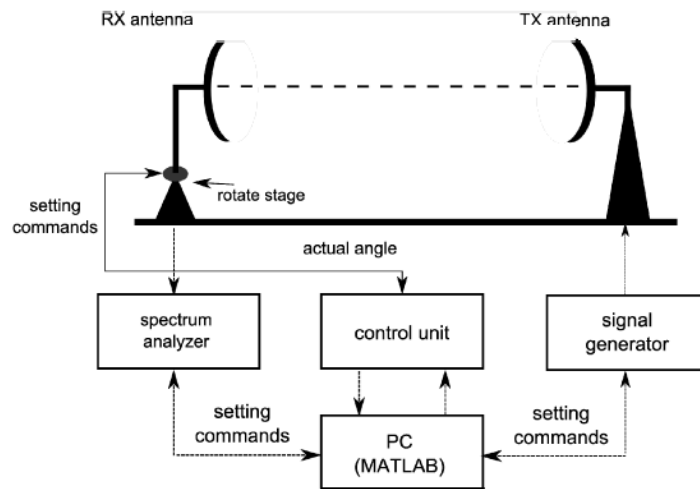


Figura 5. Esquema de un sistema de medición de patrones de radiación automático

Fuente: (Tomas , Matej , Tomas , Jan, & Ludek , The Workplace for Automatic Measurement of Antennas Radiation Patterns, 2014)

En el esquema de la figura 5 la antena transmisora y receptora son fáciles de distinguir, la antena se monta en un eje que le permite girar sobre su propio eje y la rotación se controla y monitorea con ayuda de una unidad de control que se comunica con la aplicación en este caso realizada en Matlab vía un puerto virtual USB.

La aplicación también puede enviar instrucciones hacia la unidad de control mediante la misma vía, el analizador de espectros y el generador se conectan a la pc mediante ethernet. (Tomas , Matej , Tomas , Jan, & Ludek , The Workplace for Automatic Measurement of Antennas Radiation Patterns, 2014).

2.2.1 Etapa rotatoria y control

Los componentes principales en esta etapa son los motores a pasos que representan la parte de potencia, mientras que la unidad de control envía pulsos al motor a pasos y consiste en utilizar un microcontrolador STM32F100 y el controlador A4982 para el motor a pasos.

Para monitorear la posición del motor se recurre a utilizar un encoder que se conecta al microcontrolador mediante SPI, entre las características del microcontrolador este debe contar con una interfaz USB.

2.3 Comandos SCPI para operar el instrumento Anritsu S362E

Muchos instrumentos de medición pueden ser operados mediante el uso de comandos SCPI los mismos que permiten disponer de un entorno para el desarrollo de aplicaciones, estos son comandos que una vez enviados le indican al instrumento que cumpla con ciertas tareas específicas (Anritsu, 2012).

Entre las características de estos comandos se presenta:

- Los comandos consisten entre uno o más palabras clave
- Excepto para comandos comunes cada palabra clave tiene un formato corto y largo
- Algunos comandos tienen un valor numérico para diferenciarlos entre características que

comparten los instrumentos

Los comandos SCPI presentan una estructura jerárquica en el estándar se lo conoce como el árbol de comandos, las palabras claves que controlan las funciones principales se ubican en la parte superior como se observa en la figura 6.

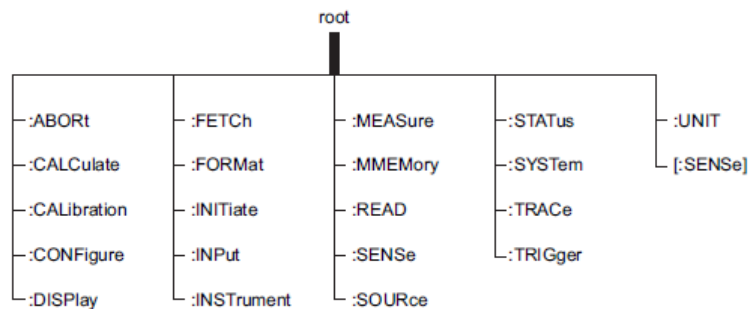


Figura 6. Árbol de comandos
Fuente: (Anritsu, 2012)

Todos los comandos SCPI cuentan con uno o más subcomandos y estos últimos también pueden contar con subcomandos por lo que cada uno añade una capa al árbol de comandos, en resumen, el comando y subcomandos forman una parte del árbol denominado subsistema.

En un comando se debe enviar valores denominados parámetros y dependerán del tipo de función del instrumento que se desea controlar, los parámetros pueden ser:

- Numérico: Comprende valores enteros o números en notación científica
- Numérico extendido: Incluyen valores como Máximo y Mínimo

- Discretos: Incluyen valores como internal y external y se usan para establecer valores predefinidos finitos

- Booleanos: Representan estados como ON, OFF o condiciones binarias como 1, 0

2.3.1 Comandos comunes y de consulta SCPI

Algunos comandos son definidos en el estándar IEEE-488.2 y se denominan comunes porque son utilizados en todos los instrumentos que soportan comandos SCPI y permiten controlar el registro de estado del instrumento por ejemplo se tiene las siguientes sentencias.

“*IDN?”: permite realizar una consulta retornando información en formato cadena de texto el nombre del fabricante, modelo, serial, firmware.

“*RST”: Restablece los parámetros y opciones del sistema al estado de fabrica

“: INSTRument: CATalog:FULL?”: Retorna una lista de los modos disponibles en el instrumento de medición por ejemplo modo analizador de espectros, modo analizador vectorial , modo analizador de cable y antenas

“: INSTRument [: SElect]<string>”: Este comando permite elegir el modo de operación deseado y en el parámetro <string> se debe ingresar cualquier elemento de la lista obtenido en el comando anterior.

También existen los denominados comandos de consulta y existe una característica todos los comandos disponibles tienen un formato de consulta y se lo obtiene añadiendo el símbolo de interrogación al final, cuando se recibe este tipo de comandos la característica relacionada con el mismo se envía al buffer de salida.

2.3.2 Comandos SCPI para controlar un analizador de espectros

Existe una lista completa de todos los comandos disponibles que agrupan la mayor parte de sentencias para control y consulta como se observa en la figura 7.

:ABORt	:FETCh	:MEASure	:TRACe
:CALCulate	:FORMat	:MMEMory	:TRIGger
:CALibration	:INITiate	:READ	:UNIT
:CONFigure	:INPut	:SENSe	: [SENSe]
:DISPlay	:INSTrument	:SOURce	

Figura 7. Lista de Comandos principales disponibles
Fuente: (Anritsu, 2012)

Es importante considerar que existen comandos de subsistema estos controlan las funciones del instrumento y algunas funciones de propósito genérico se los puede identificar por el uso de dos puntos entre palabras clave.

En el modo analizador espectros para la operación remota y obtención de patrones de radiación se puede utilizar los siguientes subsistemas y respectivos comandos:

Subsistema Display: Permite modificar la forma en que se presentan los datos al usuario, entre sus funciones permite establecer el nivel de referencia para el eje y en dB, establecer una escala de visualización en dB/división para el eje y.

Subsistema Initiate: Permite controlar el inicio del proceso de mediciones, el tipo de barrido si es continuo o simple.

Subsistema de Unidades: Permite modificar las unidades de potencia por defecto como puede ser en dBm, dBv, dBmV, dBuV, W, BW, A, DBA, WCM2.

Subsistema Sense: Permite especificar la resolución de ancho de banda cuyo valor por defecto es de 3 MHz, además cuenta con la opción de determinar este valor automáticamente en función del span de frecuencia. Conociendo ciertos parámetros como la frecuencia de operación de una antena este subsistema permite establecer la frecuencia central, frecuencia de parada, frecuencia inicial, span en Hz por defecto. Posee la función de atenuación de potencia automática al establecer el argumento como “ON” o 1 permitiendo que la atenuación de entrada se acople al nivel de referencia. Otro subsistema útil para la medición del patrón de radiación es el subsistema calculate que permite ubicar marcadores en el valor máximo.

2.3.3 Principios de la operación remota

Los componentes de hardware son una parte esencial dentro del esquema del sistema de medición como también lo es la fase de software encargada del control de los equipos de medición. El control remoto de los instrumentos es esencial, muchos de los instrumentos de medición están equipados con funciones que permiten que los usuarios puedan extraer información con precisión, pero también se presentan algunas desventajas como el limitado tamaño de la pantalla por lo que muchas funciones solo pueden ser accedidas a través de menús y submenús y no es posible personalizar la interfaz de usuario para cada persona pues es una tarea engorrosa para el fabricante.

Otra Desventaja es el traspaso de información desde el instrumento hacia el computador que requiere utilizar dispositivos de almacenamiento externos como memoria flash o disco duro, para solventar todos estos inconvenientes se puede crear un programa personalizado que combine la fase de rotación y control con la fase de comunicación con los instrumentos, para lograrlo la aplicación debe comunicarse con el instrumento utilizando comandos SCPI.

Estos comandos son estandarizados para instrumentos programables y deben funcionar con cualquier instrumento independiente del fabricante (Tomas , Matej , Tomas , Jan, & Ludek , The Workplace for Automatic Measurement of Antennas Radiation Patterns, 2014).

Para trabajar con comandos SCPI se necesita cumplir 2 condiciones, primero se requiere instalar arquitectura de software para instrumentos virtuales denominado VISA el cual es un estándar para configurar, programar sistemas de instrumentación que tienen interfaces GPIB , VXI, PXI, serial , etc. (National Instruments, 2014) , segundo es necesario tener una barra de herramientas de control de instrumentos instalado.

La conexión con los instrumentos también puede efectuar mediante una conexión ethernet, en este caso se necesitaría conocer la dirección IP de los instrumentos, una vez efectuada la conexión un identificador del tipo de instrumento es necesario para lo cual se requiere utilizar comandos comunes SCPI, en este caso “*IDN?” permite realizar una consulta retornando información en formato cadena de texto el nombre del fabricante, modelo, serial, firmware separado por comas.

La interfaz gráfica puede ser generado utilizando diferentes lenguajes de programación o más comúnmente un entorno de desarrollo integrado conocido como Matlab, entre las características que presenta la interfaz es la creación de áreas de texto para ingresar el valor de la frecuencia central, span, nivel de referencia de la señal como se observa en la figura 8, y la gráfica del patrón de radiación resultante en un sistema de coordenadas cartesianas como se observa en la figura 9.

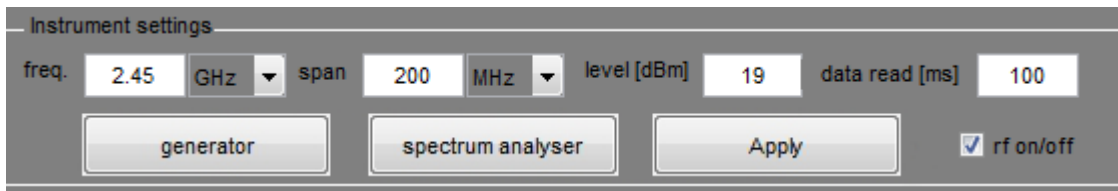


Figura 8. Ventana de configuración de parámetros en Matlab

Fuente:(Tomas, Matej, Tomas, Jan, & Ludek, The Workplace for Automatic Measurement of Antennas Radiation Patterns, 2014)

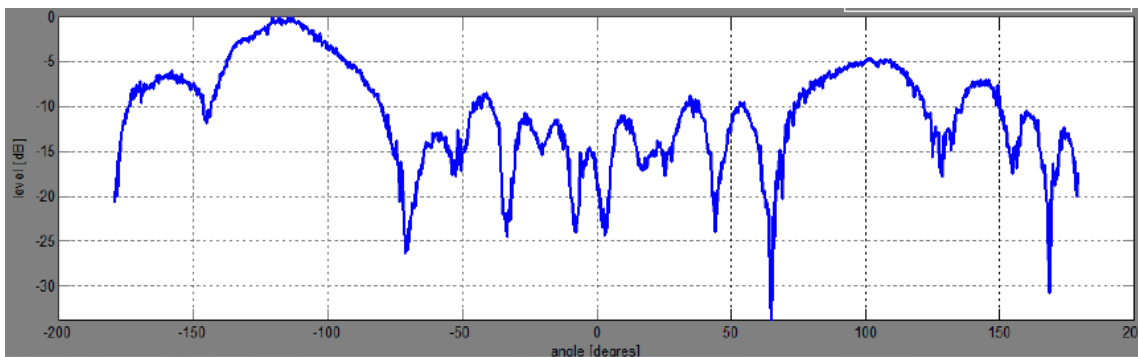


Figura 9. Gráfico del patrón de radiación resultante en coordenadas cartesianas

Fuente:(Tomas, Matej, Tomas, Jan, & Ludek, The Workplace for Automatic Measurement of Antennas Radiation Patterns, 2014)

Además, el sistema tiene la capacidad de interrumpir el proceso de medición de datos en caso de ser necesario, guardar los datos obtenidos y manipular diferentes marcadores y parámetros del instrumento de medición en una ventana emergente.

2.4 Simulador CST Microwave Studio

Es un programa que es diseñado para realizar análisis y diseño de componentes como antenas, filtros, líneas de transmisión, acopladores, conectores entre otros.

Para realizar un diseño o simulación se sigue un proceso que consiste en varias etapas, primero al crear un nuevo proyecto se presentan una variedad de plantillas de acuerdo al componente seleccionado, con ayuda de una ventana de guía rápida se elige entre diferentes tipos de analizadores, por defecto se suele seleccionar analizador transiente.

Posteriormente se definen las unidades por defecto para unidades métricas se asignan milímetros, para frecuencias en GHz. Se define el tipo de material de fondo de acuerdo a la plantilla utilizada se escoge el material automáticamente, en caso de requerir un cambio se lo hace dentro de la pestaña modelamiento escogiendo la opción background.

Posteriormente se requiere crear la estructura mediante la selección del tipo de figura requerida como se puede observar en la figura 10, en la pestaña modelamiento se puede seleccionar bloques, esferas, conos, cilindros y toroides, es importante seleccionar el sistema de coordenadas que se utilizará, de esta forma se puede generar las figuras especificando sus coordenadas e incluso se puede rotar el sistema de coordenadas especificando el número de grados y el sentido horario o anti-horario. (CST microwawe studio, 2010)

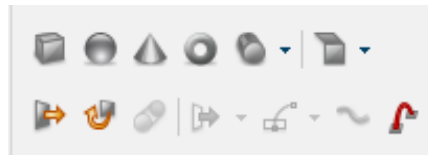


Figura 10. Formas disponibles en la sección de modelamiento

Para facilitar y monitorear el proceso de diseño se puede acceder a la pestaña visualizar como se observa en la figura 11 entre sus opciones se puede rotar a los componentes en el plano seleccionado, rotar con respecto al origen, calcular las dimensiones de las figuras creadas, ampliar la vista del plano o desplazarse.

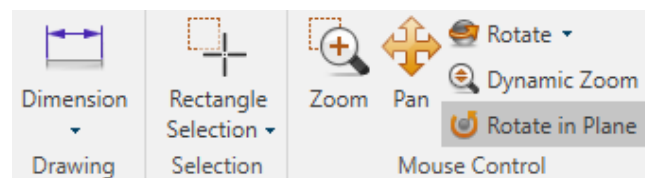


Figura 11. Opciones de visualización de componentes

La siguiente etapa consiste en definir el rango de frecuencias dentro de la pestaña simulación se escoge la opción frecuencias y se especifica el valor mínimo y máximo en el que se realizará la simulación posteriormente.

Luego se definen puertos a través de los cuales ingresa la energía, para lo cual se requiere escoger la opción “Pick-Face” que permite escoger la cara correspondiente antes de ingresar a la ventana de diálogo y especificar las características del puerto tipo guía de onda como se observa en la figura 12 especificando las coordenadas mínimas, máximas y la normal al plano.

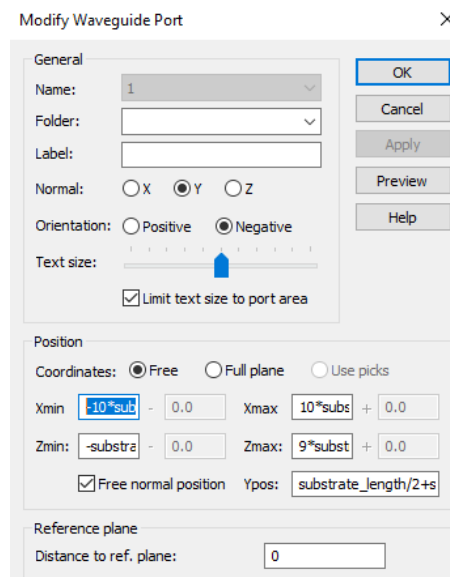


Figura 12. Configuración de puerto tipo guía de onda

También existen puertos de tipo discreto en los cuales se puede especificar coordenadas en donde se ubicará el puerto.

Finalmente se hace consideraciones del tipo de material utilizado en cada estructura y se termina con la elección del tipo de solucionador adecuado por lo que es necesario conocer los parámetros que influyen en la precisión de los resultados como se observara en la siguiente sección.

2.4.1 Solucionador en el dominio de la frecuencia

CST microwave studio ofrece una variedad de solucionadores en el dominio de la frecuencia optimizados para problemas específicos. Se diferencian en el algoritmo implementado y en el tipo de malla utilizada que pueden ser hexaedros o tetraedros. (Cst Microwave Studio, 2006).

El diseño puede ser mejorado tomando en cuenta el material de la estructura utilizada, es menos eficiente cuando se utiliza láminas que presenten un espesor que no es igual a cero por lo que se puede redimensionar el espesor de la estructura como en el caso de líneas de alimentación de microcinta.

A diferencia del solucionador en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia aplicando tetraedros como la malla se sugiere marcar la opción de refinamiento adaptativo.

Al utilizar una malla con tetraedros la precisión en los resultados se ve afectada por la resolución finita de la malla (Cst Microwave Studio, 2006) por lo que por defecto se activa la opción de refinamiento adaptativo para mejorar la precisión de los resultados.

Cuando los resultados alcanzados no son satisfactorios se puede aplicar un nuevo refinamiento de la malla ejecutando el simulador sin cambiar ningún parámetro.

2.4.2 Solucionador en el dominio del tiempo

El analizador transiente emplea una malla con hexaedros, en el cálculo de parámetros S se ve principalmente afectado por falta de precisión numérica debido a tiempos de simulación finitos y la resolución de la malla finita, el solucionador calcula las variaciones de la distribución de campos que resulta al aplicar un pulso gaussiano en el puerto de entrada, por lo tanto las señales en el puerto son la fuente principal para el cálculo de los parámetros S calculados usando la transformada de Fourier.

Usando este método se asume que la señal en el tiempo decae a cero y si este no es el caso se producen errores de truncamiento y se añade rizado a los parámetros S perjudicando los resultados, para evitar este error se suele configurar el parámetro de precisión con valores menores o iguales a -30dB (Cst Microwave Studio, 2006).

El error considerando la resolución de la malla es difícil estimar por lo que se suele aumentar la resolución de la malla para conseguir mejores resultados o activando la opción de refinamiento adaptativo de la malla hasta alcanzar un nivel de precisión de 2% esto conlleva a un aumento en el tiempo de simulación

2.5 Cámara anecoica

La función de la cámara anecoica es proveer un ambiente que aisle a las antenas de prueba de interferencias externas y reducir fuentes de reflexión especulares al interior de la misma.

En el laboratorio de antenas se encuentra una cámara anecoica diseñada para hacer mediciones en el rango de 2-3 GHz, el tamaño físico de la cámara se ve influenciado por este rango y el tamaño de la antena patrón y antena de prueba utilizadas en el análisis de múltiples trayectos en el interior (Brito & López , 2006). En la tabla 1 se resumen las especificaciones de la cámara.

Para el diseño de esta cámara se utilizó la técnica de las imágenes donde se representa a cada rayo reflejado como una imagen de la antena patrón, luego aplicando geometría simple se calcula el ángulo de incidencia sobre el material absorbente y con este dato se calcula el espesor de los conos con la ayuda de curvas experimentales.

Tabla 1:
Características de la cámara anecoica

Característica	Valor
Ancho	3 m
Largo	4.8 m
Alto	2.6 m
Frecuencia de operación mínima	2 GHz
Frecuencia de operación máxima	3 GHz
Espesor de los conos	21 cm y 30 cm

Fuente: (Brito & López , 2006)

CAPITULO III

DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICION, POSTPROCESAMIENTO Y SIMULACIÓN DE ANTENAS DE PRUEBA

3.1 Diseño de la interfaz gráfica para obtener patrones de radiación

3.1.1 Diagrama de bloques del sistema

El sistema mostrado en la figura 13 muestra una representación general de todos los elementos necesarios para crear el sistema de medición.

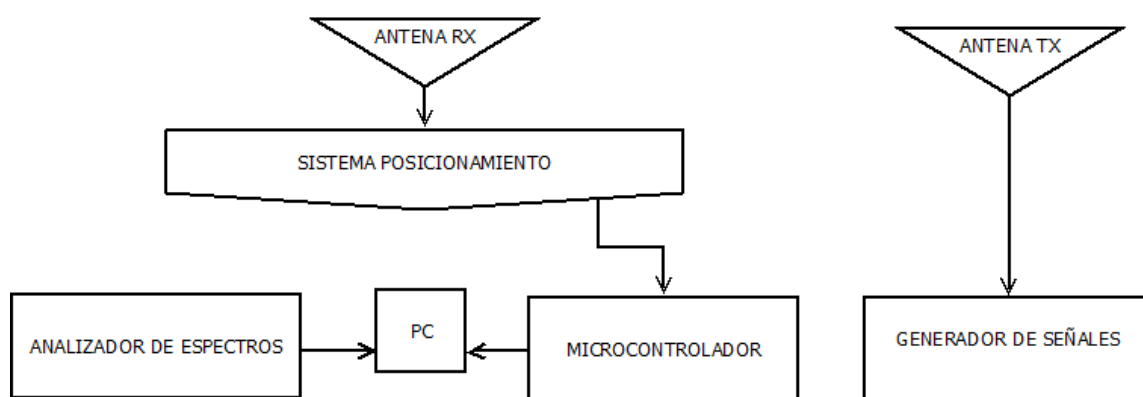


Figura 13. Elementos del sistema de medición

3.1.2 Elementos del sistema de medición

El sistema de medición estará conformado por los elementos mostrados en la tabla 2

Tabla 2:*Elementos utilizados para medir el patrón de radiación*

	Especificaciones Técnicas
Antena parche de 1 elemento	<ul style="list-style-type: none"> • Frecuencia de Operación: 2.28 GHz • Material del Sustrato: FR4 • Altura del sustrato: 1.6 mm • Tangente de pérdidas: 0.025
Arreglo de antenas parche 2 de elementos	<p>Especificaciones Técnicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Frecuencia de Operación: 2.43 GHz • Material del Sustrato: FR4 • Altura del sustrato: 1.6 mm • Tangente de pérdidas: 0.025
Controlador de Motor a pasos ATS-10	<p>Especificaciones Técnicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rotación: 0 – 359 grados • Selección de pasos: 1, 5 ,10 ,45 grados • Modo: Automático o Manual • Salida: TTL - 5V
ANRITSU S362E	<p>Especificaciones Técnicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analizador de Espectros: 100 KHz – 6 GHz • Analizador de cable y antenas: 2 MHz – 6 GHz • Memoria flash externa USB
Generador de señales Agilent N9310A	<p>Especificaciones Técnicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conector RF-out: Conector tipo-N hembra, impedancia igual a 50 Ohm • Rango de frecuencia: 9 kHz to 3 GHz • Nivel de Potencia :-127 hasta +20 dBm

Microcontrolador: El microcontrolador ATmega328 se utilizará para enviar datos por el puerto serial hacia el computador cada vez que reciba una señal de TTL 5V producida por cambios de posición del sistema de posicionamiento.

Sistema de posicionamiento: El sistema de posicionamiento utilizado será el controlador de motor a pasos ATS-10 el cual posee un terminal de salida que envía una señal TTL de 5V cada vez que cambia de posición, permite especificar sentidos de giro horario y anti horario, barrido lento o rápido, pasos de giro de 1, 5 ,10 y 45 grados y un modo de trabajo automático o manual.

Generador de señales: El generador de señales Agilent N9310A permite generar señales cuya frecuencia alcanza rangos hasta 3GHz y potencias de transmisión entre -127 dBm y 20 dBm

Analizador de Espectros: El analizador de espectros utilizado es el ANRITSU S362E que permite ser operado remotamente enviando comandos SCPI desde un computador para automatizar el proceso de medición.

PC: En el computador se ejecuta un programa en Python el cual recibe los datos enviados por el puerto serial permitiendo sincronizar el tiempo para el envío de comandos de consulta SCPI desde la interfaz gráfica para la adquisición de datos.

3.1.3 Sincronización mediante el microcontrolador

El microcontrolador ATmega328 permite utilizar interrupciones externas que pueden ser configuradas para activarse en dos estados.

Flanco ascendente: Esta interrupción se activa cuando el nivel lógico en el terminal de interrupción cambia de un nivel bajo (GND) a un nivel alto (VCC)

Flanco descendente: Esta interrupción se activa cuando el nivel lógico en el terminal de interrupción cambia de un nivel alto (VCC) a un nivel bajo (GND)

Para configurar el tipo de interrupción primero se utilizan librerías disponibles en el IDE de arduino las cuales permiten configurar el pin seleccionado para activar interrupciones, asignar la función que se llamará cuando se detecte la interrupción, seleccionar el estado en el cual se activará la interrupción. Además, se configura el pin como una entrada pull-up gracias a que el chip atmega cuenta con resistencias pull-up de 20k que se pueden acceder mediante software, en la figura 14 se puede observar el proceso seguido para crear el programa.

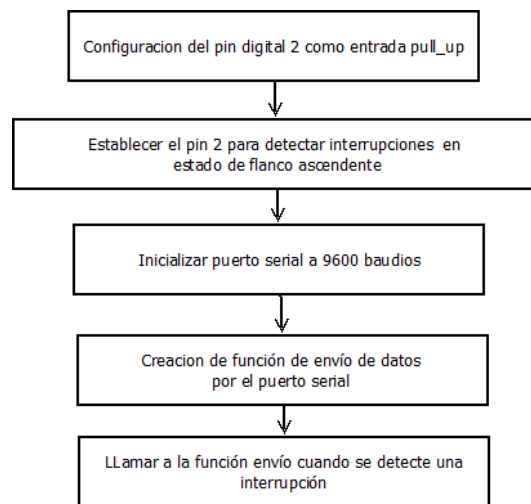


Figura 14. Proceso para sincronizar el sistema mediante un microcontrolador

Una vez configurado el microcontrolador se procede a realizar pruebas conectando un cable bnc-lagarto al sistema de control de motor a pasos y los cables tipo lagarto al terminal de interrupción del microcontrolador y a tierra, se abre el terminal serial y se observa que se envíe un dato por el terminal serial cada vez que se produzca un cambio de posición.

3.1.4 Estructura de clases del programa

El programa principal está estructurado en diferentes clases, 4 de ellas provienen de paquetes externos como numpy, matplotlib, scipy y csv.

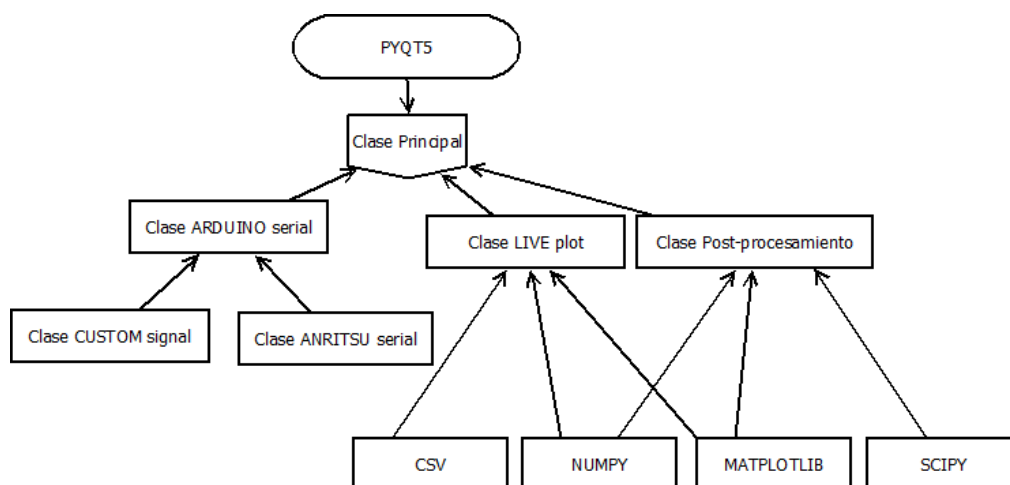


Figura 15. Clases que conforman el programa principal

En la figura 15 se puede observar la estructura del programa, la clase principal hereda diferentes clases del paquete PYQT5 permitiendo crear objetos como botones, deslizadores, listas, líneas de edición y etiquetas de esta forma se puede crear una interfaz gráfica que permita al usuario interactuar con el equipo de medición y hacer análisis de datos con ayuda de una ventana de post-procesamiento.

El funcionamiento del programa se logra gracias a las clases ubicadas bajo la clase principal que son la Clase Arduino Serial que funciona con ayuda de un hilo que se ejecuta dentro del proceso de la clase principal el cual se analizará con más detalle en un diagrama de flujo.

La clase Live Plot que igualmente se ejecuta en otro hilo cuando el usuario presione un botón y está basado en la creación de animaciones continuas para observar cómo se forma el patrón de radiación en tiempo real y la clase Post-Procesamiento que consiste en obtener parámetros de antenas con la ayuda de varios paquetes externos como:

- Matplotlib un paquete que permite representar los datos gráficamente y se estructura jerárquicamente, en la parte superior se encuentra el módulo pyplot con el que se puede añadir elementos como imágenes, textos, líneas en ejes de figuras creadas . (Hunter, Dale, Firing, & Droettboom, 2019).
- CSV es un paquete que implementa clases para leer y escribir datos en formato separado por comas CSV (The Python Standard Library, 2013).
- Numpy es una librería de Python que proporciona un arreglo multidimensional de objetos y varias rutinas para efectuar operaciones con matrices o vectores (NumPy community, 2019)
- Scipy proporciona una colección de algoritmos matemáticos utilizando clases que permiten procesar y manipular datos y es usado para crear programas especializados (SciPy community, 2013).

3.1.5 Funciones y comunicación entre clases

El objetivo de dividir el programa principal en varias clases fue reducir el tiempo para corregir errores y crear clases que cumplan una función específica, entre las clases más importantes que se puede encontrar es la llamada custom signal en la que se crearon varias señales personalizadas, el propósito de estas es permitir la comunicación entre clases diferentes y fue necesario ya que el flujo normal de ejecución de una clase no se interrumpe utilizando esta forma de compartir información.

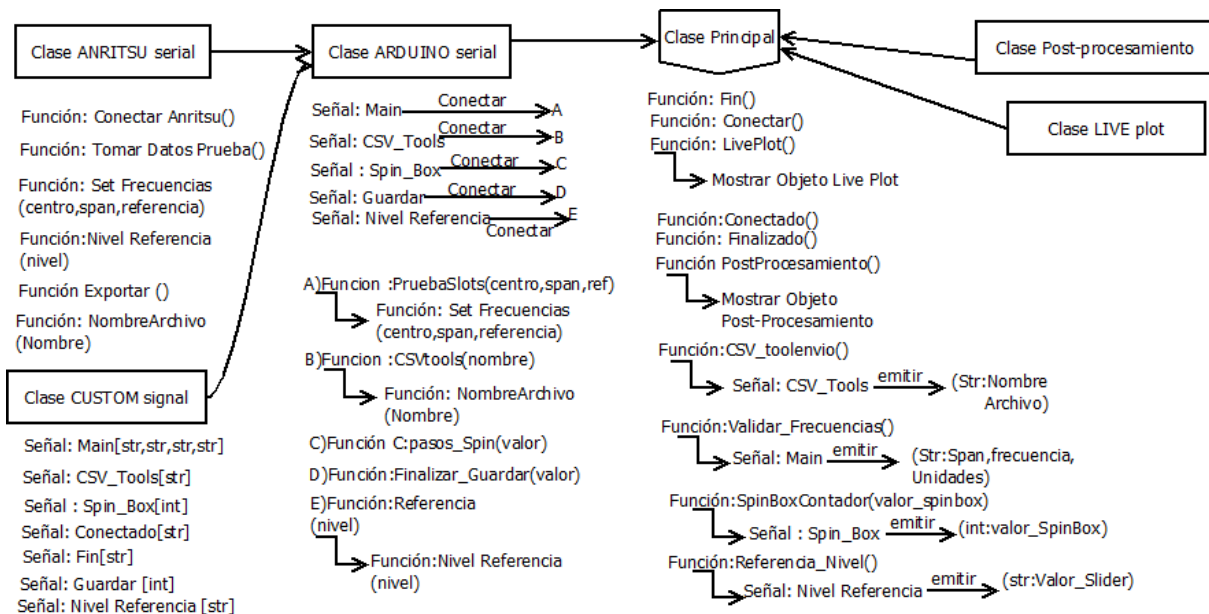


Figura 16. Funciones y señales personalizadas de cada clase

En la figura 16 se observa un resumen de las funciones y señales creadas. La clase custom signal permite crear objetos de tipo signal y se puede especificar el tipo de dato que se enviará para comunicarse con otra clase, en el programa se utilizó datos de tipo string y enteros.

En la clase anritsu serial se crearon funciones para conectar al analizador de espectros y la computadora, tomar datos mediante envío de comandos de consulta SCPI al instrumento, establecer frecuencia central, span, nivel de referencia, exportar archivos en formato xlsx y funciones para cambiar el nombre del archivo Excel.

En la clase arduino serial se importa las clases Anritsu Serial y Custom Signal y se crea dos objetos de estas clases, de esta forma se puede usar todas las funciones descritas en el párrafo anterior. En esta clase se observa algunas señales conectadas a varias funciones etiquetadas con las letras A, B, C, D, E. El funcionamiento es el siguiente cuando se emite una señal proveniente de otra clase la señal que tenga la palabra conectar hace una llamada a la función etiquetada entonces se ejecuta el código sin afectar la ejecución del programa.

En la clase Principal se importa la clase Arduino serial y se crea un objeto que permita emitir señales hacia la clase importada; como se puede notar existen funciones que emiten la señal enviando como argumentos información que debe tener el mismo tipo de dato especificado en la clase custom signal, esta información se recibe cuando se hace una llamada a la función.

La clase post-procesamiento y live plot se explicarán en las siguientes secciones mediante diagramas de flujo debido a que en esta clase se utilizó paquetes externos.

3.1.6 Diagrama de flujo para medir patrones de radiación en tiempo real

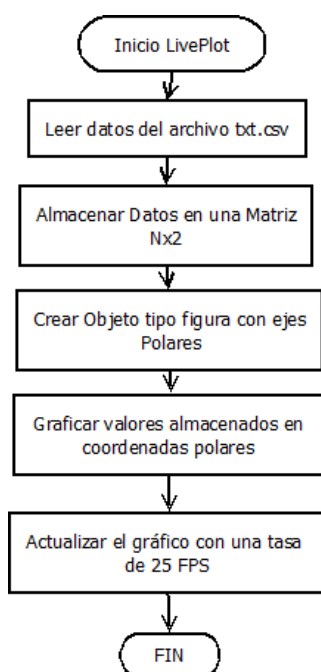


Figura 17. Diagrama de flujo de la clase live plot

Para crear una ventana para visualizar como se genera el patrón de radiación en tiempo real se utilizó el proceso descrito en la figura 17, este proceso se ejecuta en un hilo independiente cuando el usuario presiona el botón live-plot. El proceso consiste en leer los datos que se presentan en un formato separado por comas , almacenar los datos en una matriz N (Filas) x 2 (Columnas) , la primera columna representa la posición angular y la segunda la potencia, se crea un objeto de la

clase pyplot del paquete matplotlib especificando ejes de tipo polar , luego se utiliza la clase Funcanimation cuyo objetivo consiste en llamar repetidamente a una función que actualiza el gráfico con una tasa de 25 FPS que es detectable por el ojo humano como movimiento.

3.1.7 Diagrama de flujo para post-procesamiento y obtención de parámetros de antenas

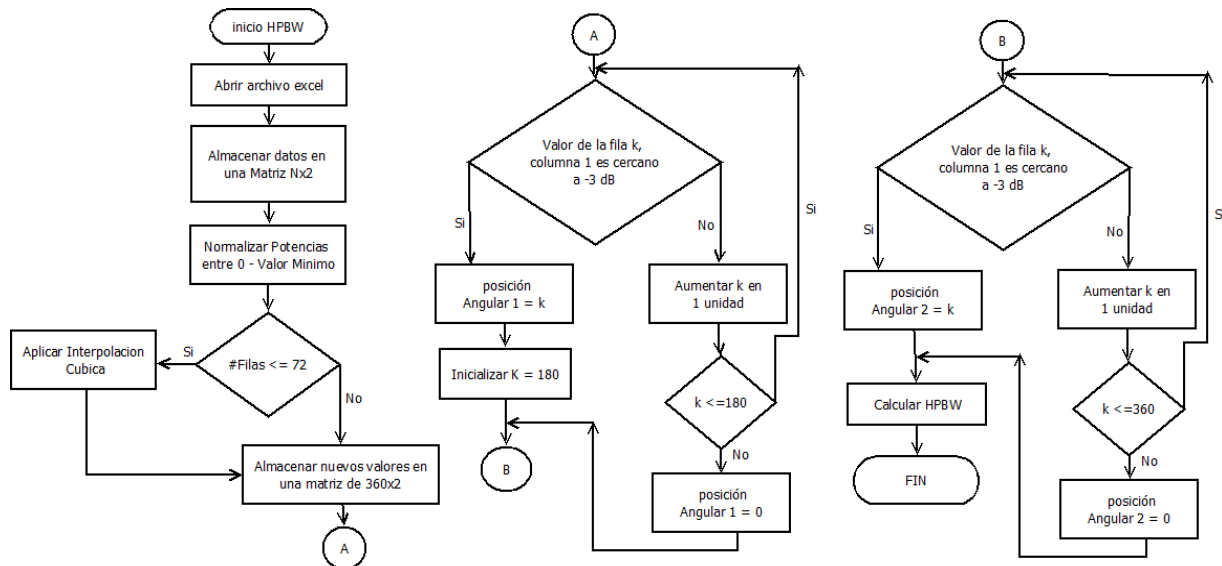


Figura 18. Diagrama de flujo para el cálculo del ancho de haz de media potencia en la clase post-procesamiento

En la figura 18 se presenta el proceso que se utilizó para calcular el ancho de haz de media potencia, se trabaja con los datos almacenados en una hoja de Excel y con ayuda del paquete numpy se crea una matriz de $N \times 2$ elementos, los valores de potencia se normalizan entre 0 – Valor Mínimo, cero corresponde al valor máximo registrado. El programa permite analizar mediciones con pasos de 1 o 5 grados, en el caso del último se pudo comprobar que al aplicar interpolación cubica se puede encontrar los datos faltantes y el ancho de haz de media potencia es similar a los valores calculados con pasos de 1 grado. El proceso continuo con la ubicación de la primera posición angular a -3dB entre 0 – 180 grados.

La segunda posición angular entre 180-360 grados. Cuando no se encuentra ningún valor se almacena un cero como la posición angular.

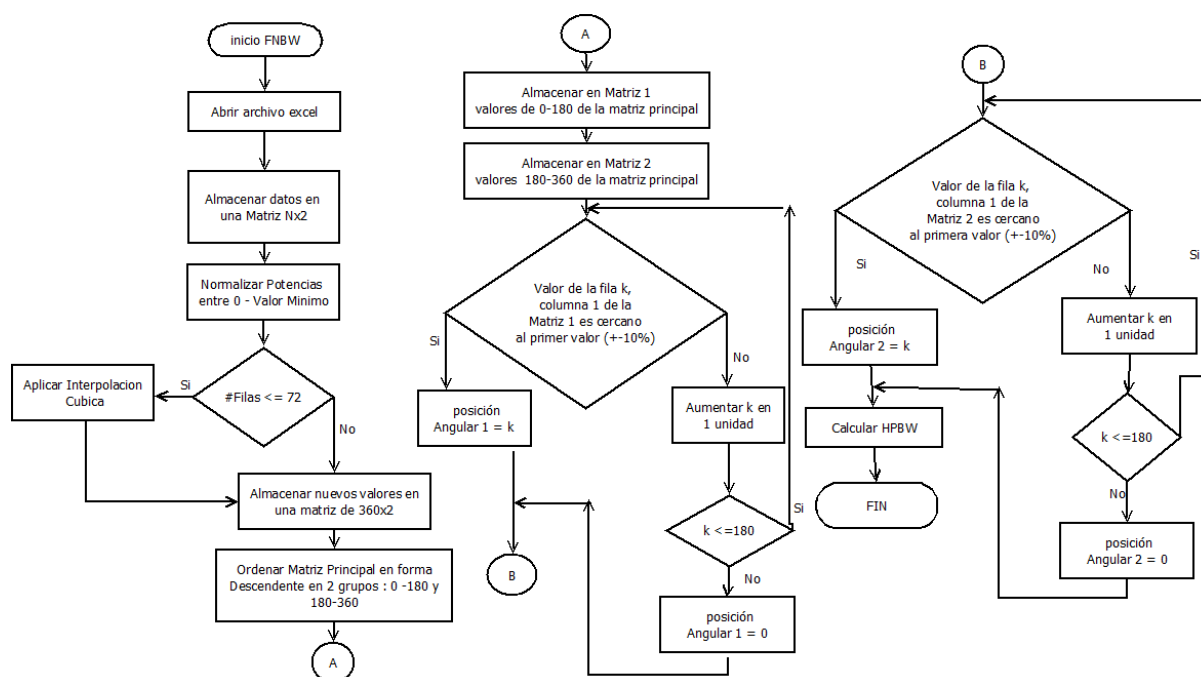


Figura 19. Diagrama de flujo para el cálculo del ancho de haz entre nulos en la clase post-procesamiento

En la figura 19 se puede observar el proceso para calcular el ancho de haz entre nulos con los datos obtenidos en las mediciones, el proceso inicial consiste en almacenar los datos en una matriz de Nx2 elementos, normalizarlos entre 0 y el valor mínimo, cuando el número de elementos es igual a 72 quiere decir que se han registrado datos en pasos de 5 grados y se aplica interpolación cubica a los datos de esta manera se obtiene una función que ayuda a encontrar datos faltantes para calcular la posición de los primeros nulos con mayor precisión, los datos se almacenan en orden descendente en 2 matrices, la primera guarda valores entre 0 y 180 grados, la segunda entre 180 y 360 grados, luego se utiliza una estructura iterativa para analizar los elementos de las matrices que presenten un nivel mínimo +/- 10% y que se encuentren más cercanos a 0 o 360 grados.

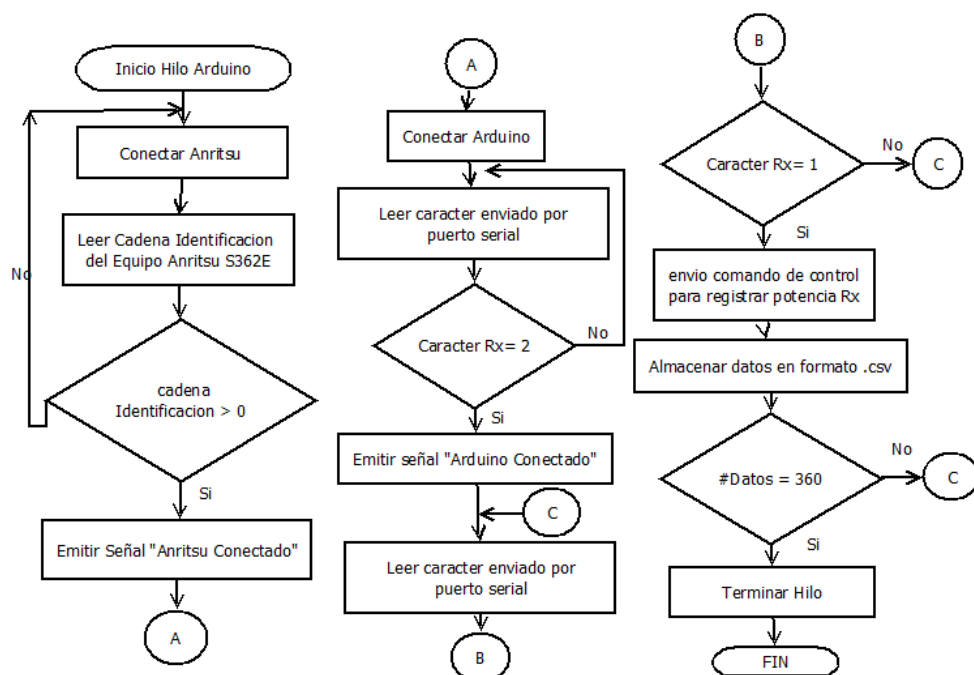


Figura 20. Hilo principal del sistema de medición

En la figura 20 se observa uno de los hilos principales que permiten obtener el patrón de radiación, primero se establece la comunicación con el instrumento, para verificar una conexión correcta se envía un comando de consulta al analizador de espectros y se recibirá una cadena que contiene el nombre del equipo, modelo y serie, en caso de una conexión exitosa se emite una señal que cambiará el nombre de una etiqueta en la ventana principal indicando el mensaje “conectado”.

Luego se conecta el microcontrolador arduino y se ejecuta una función que abre una conexión en el puerto serial, cuando se recibe el carácter ‘2’ se emite una señal que mostrará el mensaje conectado en la ventana principal.

Posteriormente el programa esperará a recibir el carácter ‘1’ cuando se detecte un pulso transmitido desde el controlador del motor a pasos, al recibir este dato se envía un comando de consulta para obtener la potencia recibida, estos datos se almacenarán en formato CSV, la toma de datos finalizara cuando se alcanzan 360 grados o el usuario presiona el botón Finalizar.

3.2 Simulación de antena parche de 1 elemento en CST Studio

En las siguientes figuras se resume el proceso para diseño y simulación de una antena parche de 1 elemento.

Name	Expression	Value	Description
wp	= 64	64	ancho del parche
lg	= 70	70	largo del plano de tierra
lp	= 30	30	largo del parche
wg	= 120	120	ancho del plano de tierra
la1	= 9	9	largo de línea alimentacion 1
sh	= 1.6	1.6	espesor del sustrato
wa1	= 1	1	ancho de la línea alimentacion

Figura 21. Lista de parámetros globales

Primero se registró en la lista de parámetros globales las dimensiones físicas de la antena como se observa en la figura 21.

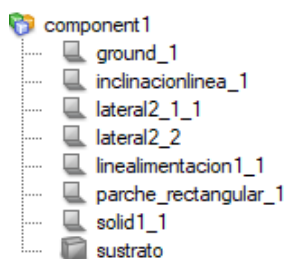


Figura 22. Lista de elementos estructurales

Luego se creó un bloque que represente el sustrato FR-4, sobre él se creó elementos que representan la línea de alimentación, parche y en la parte posterior el plano de tierra utilizando láminas de cobre que tienen un espesor igual a cero.

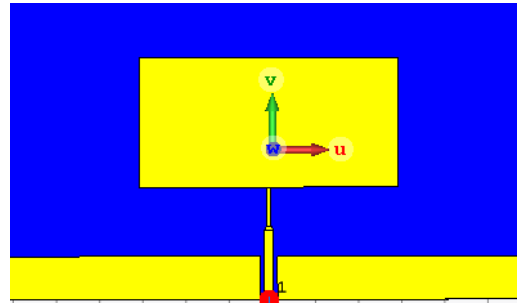


Figura 23. Parche y alimentación sobre sustrato

El diseño final se puede observar en la figura 23 aquí se puede notar un punto rojo en la línea de alimentación de micro línea que representa un puerto de tipo discreto conectado entre la línea de alimentación y el plano de tierra.

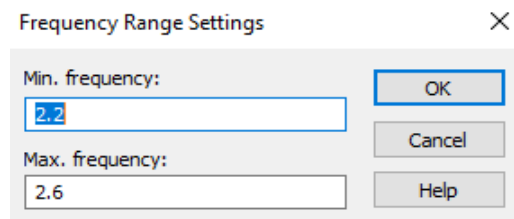


Figura 24. Configuración de rango de frecuencias

En la figura 24 se observa el rango de frecuencias establecidos para la simulación. El rango mínimo y máximo se utilizó inicialmente para determinar la frecuencia de resonancia de la antena y posteriormente crear monitores, luego se redujo el rango para reducir el tiempo de simulación.

En la figura 26 se observan los parámetros de configuración utilizando el solucionador en el dominio de la frecuencia se especifica el tipo de elementos que formarán la malla en este caso tetraedros, se especifica un rango de frecuencias en las cuales se ejecutará la simulación; se escoge 7 muestras de manera automática entre 2.3 y 2.5 GHz, al mantener un número de muestras no elevado y un rango cercano a la frecuencia de operación estimada se reduce considerablemente el tiempo de simulación.

3.3 Simulación de arreglo de antena parche de 2 elementos en CST Studio

En las siguientes figuras se resumen el proceso para diseño y simulación de un arreglo de antenas parche de 2 elementos.

Name	Expression	Value	Description
wg	= 210	210	ancho del plano de tierra
lg	= 145	145	largo del plano de tierra
wlateral	= 103	103	ancho de elemento lateral
la3	= 69-Lunion	54	largo de línea 3
wp	= 64	64	ancho del parche
wa2	= 58	58	longitud de línea alimentación 2
Llateral	= 35	35	largo de elemento lateral
lp	= 30	30	largo del parche
la1	= 16	16	largo de línea alimentación 1
Lunion	= 15	15	Longitud Union 2 parches
Wunion	= 4	4	Ancho Union 2 parches
wa3	= 2	2	Ancho línea alimentación 3
sh	= 1.6	1.6	espesor del sustrato
wa1	= 1	1	espesor de la línea alimentación

Figura 27. Lista de parámetros globales

Primero se registró en la lista de parámetros globales las dimensiones físicas de la antena como se observa en la figura 27, al usar la lista el proceso de diseño es más eficiente ya que se puede cambiar dimensiones sin abrir cada componente y se puede crear descripciones del tipo de variable que se representa.

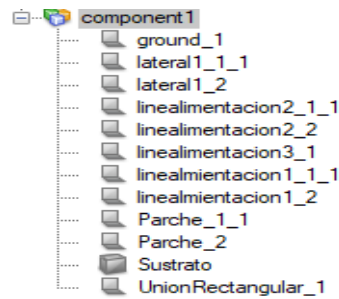


Figura 28. Lista de elementos estructurales

En la figura 28 se observan los elementos que forman el arreglo, se creó un bloque que corresponde al sustrato FR-4, sobre él se creó elementos que representan la línea de alimentación, parche y en la parte posterior el plano de tierra utilizando láminas de cobre que tienen un espesor igual a cero, se debe mencionar que existe la herramienta transformar que permite desplazar, rotar, copiar en el caso de arreglos es útil para crear copias de los elementos del arreglo.

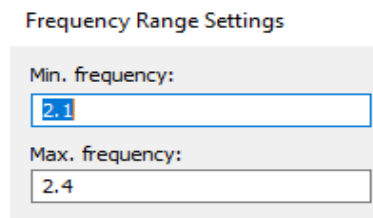


Figura 29. Configuración de rango de frecuencias

En la figura 29 se observa el rango de frecuencias establecidos para la simulación el rango mínimo y máximo se utilizó inicialmente para determinar la frecuencia de resonancia de la antena y posteriormente crear monitores en esta frecuencia se redujo el rango para reducir el tiempo de simulación

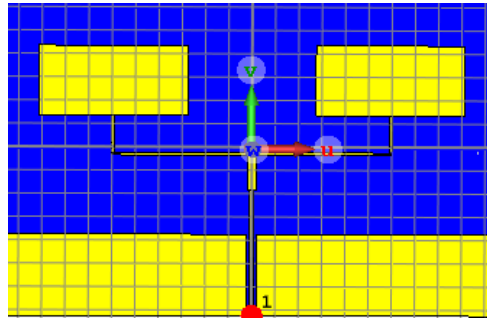


Figura 30. Parche y alimentación sobre sustrato

Discrete Edge Port

Properties

Port type: S-Parameter Voltage Current

Name: 1

Folder: [dropdown]

Label: [input]

Impedance: 50.0 Ohm

Radius: 0.0

Monitor voltage and current

Location

Type: Coordinates Wire

U1	V1	W1
-1.42108547152	-72.5	0
U2	V2	W2
0	-72.5	-1.6

Figura 31. Parámetros de puerto discreto

En la figura 31 se muestra los parámetros de configuración del puerto discreto donde se establece una resistencia de 50 ohm, se monitorean parámetros S y al marcar el tipo de localización como “coordenadas” es más sencillo ubicar el puerto utilizando la herramienta seleccionar se crea 2 puntos el primero en la línea de alimentación y el segundo en el plano de tierra así las coordenadas se calculan automáticamente.

Method

Broadband sweep:
General purpose

Mesh type:
Tetrahedral

Results

Store result data in cache

Calculate port modes only

Normalize S-parameter to
50 Ohm

Excitation

Source type: Port 1

Mode: Select...

Frequency samples

Active	Type	Adapt.	Samples	From	To	Unit
<input checked="" type="checkbox"/>	Max. Range			2.1	2.4	GHz
<input checked="" type="checkbox"/>	Monitors					GHz
<input checked="" type="checkbox"/>	Automatic	<input type="checkbox"/>	8	2.1	2.4	GHz
<input type="checkbox"/>	Single	<input type="checkbox"/>	1			GHz
<input type="checkbox"/>	Single	<input type="checkbox"/>	1			GHz

Figura 32. Parámetros de configuración de solucionador en dominio de la frecuencia

En la figura 32 se observan los parámetros de configuración utilizando el solucionador en el dominio de la frecuencia se especifica el tipo de elementos que formaran la malla en este caso tetraedros, se asigna un rango de frecuencias en las cuales se ejecutará la simulación se escoge 8 muestras de manera automática entre 2.1 y 2.4 GHz, al mantener un número de muestras no elevado y un rango cercano a la frecuencia de operación estimada se reduce considerablemente el tiempo de simulación.

CAPITULO 4

MEDICIÓN, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Obtención de patrones de radiación de antenas utilizando el software creado en Python

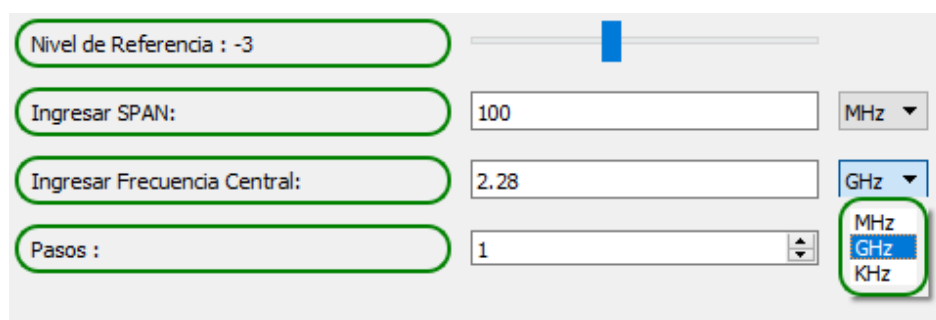
Para obtener el patrón de radiación se utilizó el programa creado en Python como se puede observar en la figura 33 tienen 2 secciones la primera con el nombre grupo de estados que permite conectar el analizador de espectros y el microcontrolador con el programa principal e indica el estado de conexión y la segunda sección denominada grupo Anritsu tiene botones para especificar el nombre del archivo en Excel para almacenar los datos, cambiar el nivel de referencia que se mostrará en la pantalla del equipo.

The screenshot displays a software interface with two main sections:

- GRUPO ESTADOS:** Contains buttons for 'CONECTAR EQUIPOS', 'CONECTANDO ARDUINO..', 'STATUS ANRITSU', 'LIVE PLOT', and 'POSTPROCESAMIENTO'.
- GRUPO ANRITSU:** Contains a 'CONFIRMAR NOMBRE DE ARCHIVO' button, a text input field, a 'Nivel de Referencia : -3' slider, 'Ingresar SPAN:' and 'Ingresar Frecuencia Central:' input fields with 'MHz' dropdown menus, a 'Pasos :' dropdown menu set to '1', and 'FINALIZAR' and 'CONFIRMAR FRECUENCIAS' buttons.

Figura 33. Interfaz Gráfica principal del software de medición y post-procesamiento

El usuario debe conocer de antemano la frecuencia de operación de las antenas que se utilizarán. Como se puede observar en la figura 34 se debe ingresar este dato en el campo frecuencia central especificando las unidades que pueden estar en el orden de MHz, KHz y GHz además se debe especificar el span o la variación de frecuencia con respecto a la frecuencia central , el nivel de referencia por defecto es de -3 dB pero se puede variar este valor entre -15 y 15 dB y se puede escoger el número de pasos que puede ser 1 o 5 , este dato debe coincidir con el número de pasos configurado en el sistema de control de motor a pasos ATS-10.



The image shows a software configuration window with the following elements:

- A slider control for "Nivel de Referencia : -3" with a blue bar indicating the current value.
- An input field for "Ingresar SPAN:" containing the value "100" and a dropdown menu set to "MHz".
- An input field for "Ingresar Frecuencia Central:" containing the value "2.28" and a dropdown menu set to "GHz".
- An input field for "Pasos :" containing the value "1" and a dropdown menu with options "MHz", "GHz", and "KHz".

Figura 34. Grupo de elementos de configuración de parámetros de medición

Una vez especificado la configuración de los parámetros se confirma presionando el botón confirmar frecuencias. El programa verificará que los datos ingresados sean los correctos, caso contrario se presentarán diferentes mensajes de advertencia como se observa en la figura 35 al ingresar una frecuencia superior al rango de operación permitido por el equipo se sugiere revisar los datos ingresados.

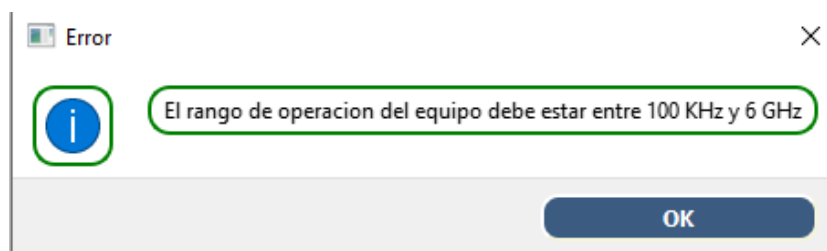


Figura 35. Ejemplo de mensaje de advertencia

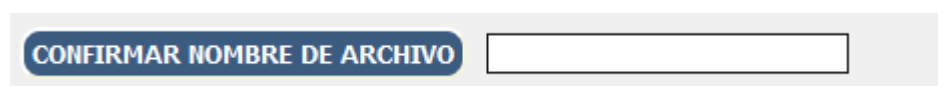


Figura 36. Nombre del archivo de Excel especificado para guardar los datos

El usuario debe especificar un nombre y confirmar dando clic en el botón azul como se observa en la figura 36, con este nombre se guardarán los datos en un archivo de tipo Excel que permitirá hacer un análisis de los datos al finalizar cada medición, en caso de no especificar un nombre por defecto se asigna el nombre dato.xlsx

Una vez completado la configuración sin inconvenientes se puede dar clic en el botón Live Plot que permite mostrar en tiempo real como se va generando el patrón de radiación en coordenadas polares como se observa en la figura 37. Se puede ubicar el cursor sobre el gráfico y observar el nivel de potencia o el ángulo en la posición deseada.

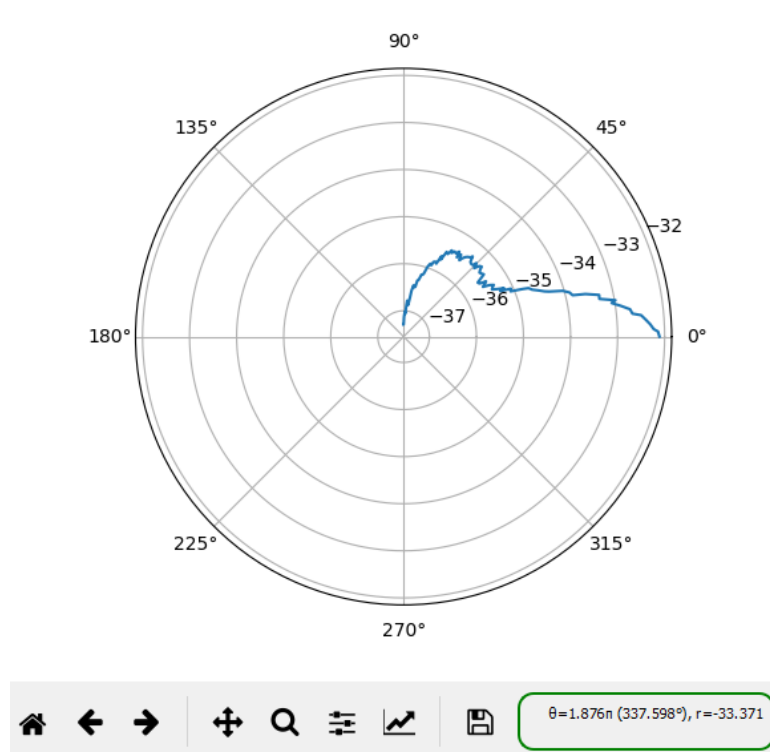


Figura 37. Patrón de radiación generado en tiempo real

Cuando se complete el barrido de 360 grados el usuario debe dar clic en el botón finalizar para que estos datos tomados se almacenen en un archivo de Excel para su posterior análisis, en la sección grupo estados se mostrará un mensaje con fondo rojo indicando el mensaje fin.

Para realizar un análisis de diferentes parámetros de antenas como ancho de haz de media potencia, ancho de haz entre nulos y directividad se debe dar clic en el botón post-procesamiento el cual generará una interfaz gráfica nueva como se observa en la *figura 38*, se puede escoger el archivo Excel haciendo clic en el botón abrir y seleccionando el directorio, además se puede presentar varias graficas en el mismo plano para hacer comparaciones marcando con visto en el cuadro a lado izquierdo del botón parámetros.

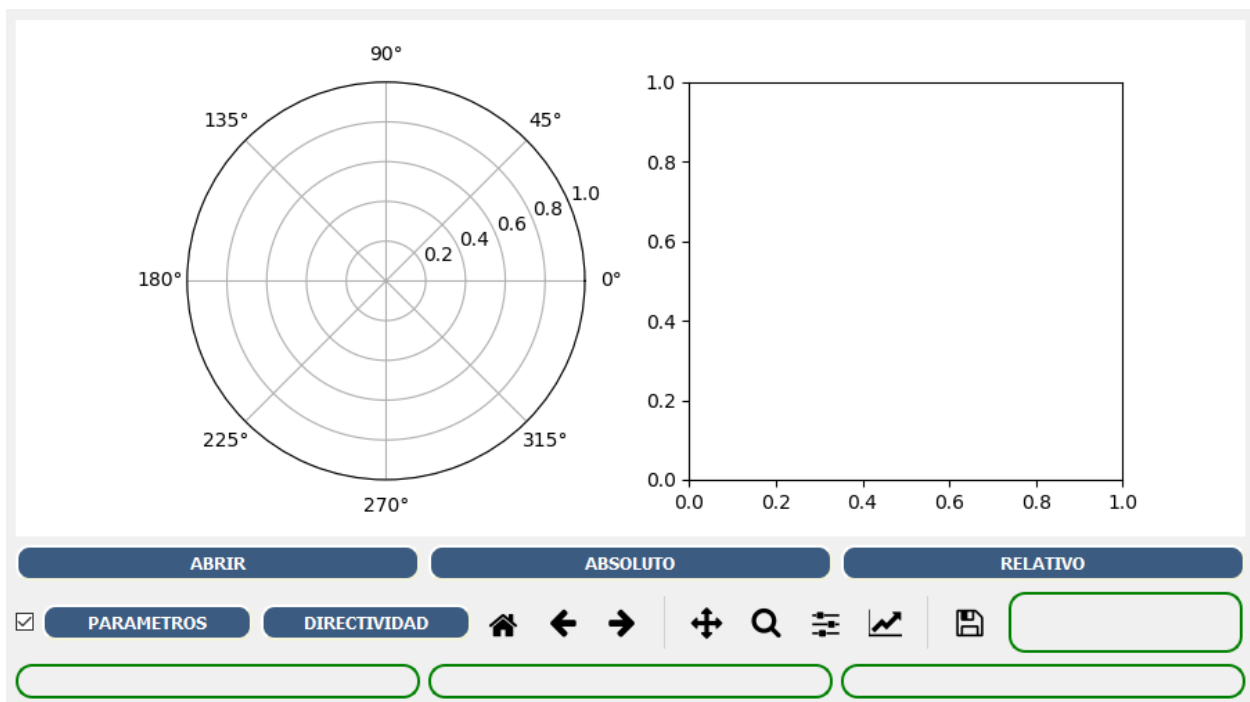


Figura 38. Interfaz de procesamiento de datos almacenados.

Al observar la figura 39 se puede notar que los datos se graficarán en sistema de coordenadas polares y cartesianas, se puede escoger entre un patrón de radiación absoluto que representa el patrón con los datos exactos tomados en tiempo real y el relativo presentando los datos normalizados, donde 0 dB es el valor máximo, este valor se obtiene al considerar el valor máximo de potencia y restarlo del resto de valores, los cuales estarán por debajo de 0 dB. Al presionar sobre el botón parámetros se llamará a funciones que calcularán el ancho de haz de media potencia y ancho de haz entre nulos, en el caso de la directividad se utilizó una formula aproximada que requiere escoger mediciones realizadas en el plano E y H por lo cual se creó un botón independiente para que el usuario pueda escoger los archivos correspondientes.

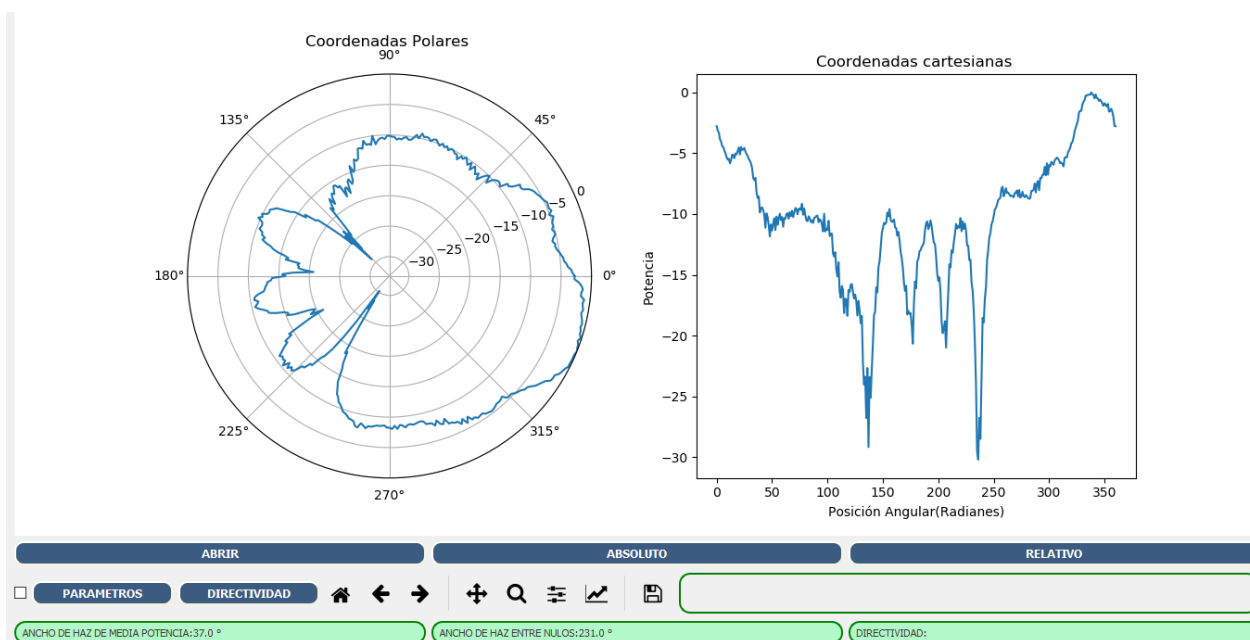


Figura 39. Obtención de parámetros de antenas y visualización de patrones de radiación en diferentes sistemas de coordenadas

4.2 Medición de parámetros de radiación de antenas

Previamente a montar todos los elementos en el lugar de pruebas se realizó la medición de la frecuencia de operación de las antenas de prueba, se midió las pérdidas de los cables y posteriormente se realizaron consideraciones como el alineamiento, altura y distancia entre antenas transmisoras y receptoras

4.3 VSWR

Para tener en cuenta el nivel de desacoplamiento entre la línea de transmisión y la antena de prueba se debe considerar la relación de onda estacionaria de voltaje o VSWR, un valor igual a 1 indica un acoplamiento perfecto ya que el coeficiente de reflexión sería igual a cero.

Se utilizó el equipo ANRITSU S362E en modo analizador de cables y antenas, en el caso de la antena parche de 1 elemento se puede observar en la figura 40 que el menor valor de VSWR es de 1.31 y se sitúa en 2.43 GHz, en el caso del arreglo de antenas parche de 2 elementos se observa en la figura 41 que el menor VSWR es de 1 y se ubica en 2.28 GHz , estos resultados permiten confirmar que la frecuencia de operación de estos elementos coincide con las características proporcionadas por el fabricante.



Figura 40. VSWR de antena parche rectangular de 1 elemento.



Figura 41. VSWR de arreglo de antenas parche rectangular de 2 elementos.

4.4 Pérdidas de cables y conectores

El nivel de pérdidas se mide en dB y es importante considerarlos antes de hacer mediciones del patrón de radiación, las pérdidas dependen de varios factores entre ellos tenemos la longitud del cable que se conecta entre el generador y la antena transmisora o la longitud entre la antena receptora y el analizador de espectros, dependerá también de la frecuencia y su estado. El procedimiento seguido para calcular las pérdidas fue el siguiente:

- Se configuró el generador de señales Agilent N9310A con una potencia de 0 dBm y la frecuencia igual a la de operación de la antena parche.
- Se conecta un conector Tipo-N a SMA en el terminal RF – out del generador de señales y en el otro extremo se utiliza el conector tipo-N a SMA en el terminal RF –in del analizador de espectros, luego se conecta el cable entre estos conectores.

- Se configuró el analizador de espectros con una frecuencia central igual al valor de operación de la antena de prueba, con un span y ancho de banda de resolución adecuados. Los resultados obtenidos para mediciones en el espacio libre se muestran en la tabla 3 y 4 para la antena parche de 1 elemento y 2 elementos respectivamente, en la tabla 5 y 6 se muestran las pérdidas registradas para cables utilizados en la cámara anecoica.

Tabla 3*Pérdidas en cables a 2.43 GHz para hacer mediciones en el espacio libre*

Ancho de banda de Resolución (RB)	SPAN	Pérdidas en cable de Transmisión	Pérdidas en cable de Recepción
1 MHz	1 MHz	-3 dB	-4.30 dB
1 MHz	10 MHz	-3.07 dB	-4.50 dB
1 MHz	100 MHz	-3.09 dB	-4.40 dB
100 KHz	1 MHz	-3.1 dB	-4.58 dB
100 KHz	10 MHz	-3.2 dB	-4.60 dB
100 KHz	100 MHz	-3.2 dB	-4.60 dB
PROMEDIO		-3,11 dB	-4,49 dB

Tabla 4*Pérdidas en cables a 2.28 GHz para hacer mediciones en el espacio libre*

Ancho de banda de Resolución (RB)	SPAN	Pérdidas en cable de Transmisión	Pérdidas en cable de Recepción
1 MHz	1 MHz	-3.54 dB	-3.92 dB
1 MHz	10 MHz	-3.60 dB	-4.00 dB
1 MHz	100 MHz	-3.62 dB	-3.89 dB
100 KHz	1 MHz	-3.74 dB	-4.00 dB
100 KHz	10 MHz	-3.71 dB	-3.96 dB
100 KHz	100 MHz	-3.77 dB	-4.04 dB
PROMEDIO		-3.66 dB	-3.97 dB

Tabla 5*Pérdidas en cables a 2.43 GHz para hacer mediciones en la cámara anecoica*

Ancho de banda de Resolución (RB)	SPAN	Pérdidas en cable de Transmisión	Pérdidas en cable de Recepción
1 MHz	1 MHz	-3,98 dB	-4.04 dB
1 MHz	10 MHz	-3.96 dB	-4.12 dB
1 MHz	100 MHz	-4.01 dB	-4.04 dB
100 KHz	1 MHz	-4.12 dB	-4.18 dB
100 KHz	10 MHz	-4.16 dB	-4.16 dB
100 KHz	100 MHz	-4.19 dB	-4.22 dB
PROMEDIO		-4,07 dB	-4,12 dB

Tabla 6:*Pérdidas en cables a 2.28 GHz para hacer mediciones en la cámara anecoica*

Ancho de banda de Resolución (RB)	SPAN	Pérdidas en cable de Transmisión	Pérdidas en cable de Recepción
1 MHz	1 MHz	-3.48 dB	-3.89 dB
1 MHz	10 MHz	-3.49 dB	-3.95 dB
1 MHz	100 MHz	-3.48 dB	-3.99 dB
100 KHz	1 MHz	-3.51 dB	-4.18 dB
100 KHz	10 MHz	-3.56 dB	-4.16 dB
100 KHz	100 MHz	-3.57 dB	-4.19 dB
PROMEDIO		-3,515 dB	-4,06 dB

El valor ponderado de las pérdidas en cables se tomará en cuenta para determinar la potencia de transmisión necesaria para compensar las pérdidas. Es necesario destacar que el programa está diseñado para configurar el ancho de banda de resolución de manera automática y el span se configura desde la interfaz de usuario. En las siguientes figuras se mostrará las pérdidas registradas tomando en cuenta que el span escogido fue de 100 MHz.

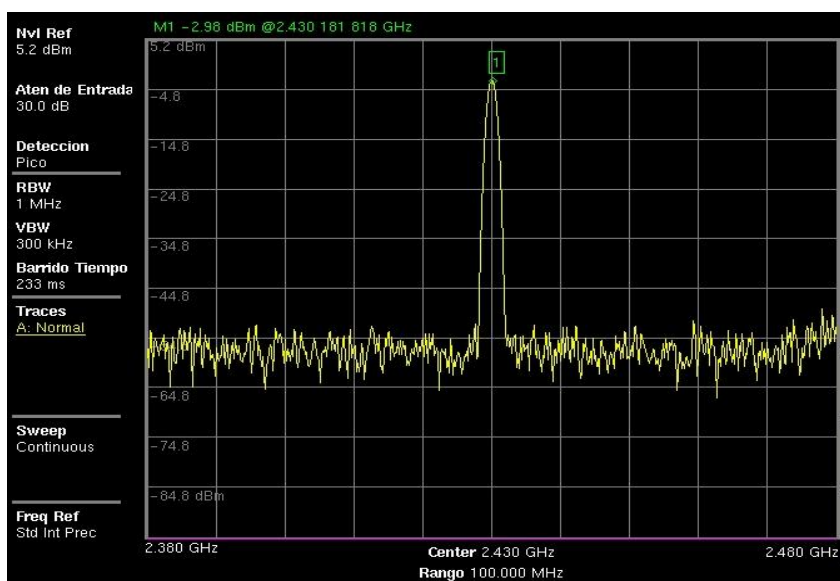


Figura 42. Pérdidas de cables en el transmisor a 2.43 GHz para medición en el espacio libre

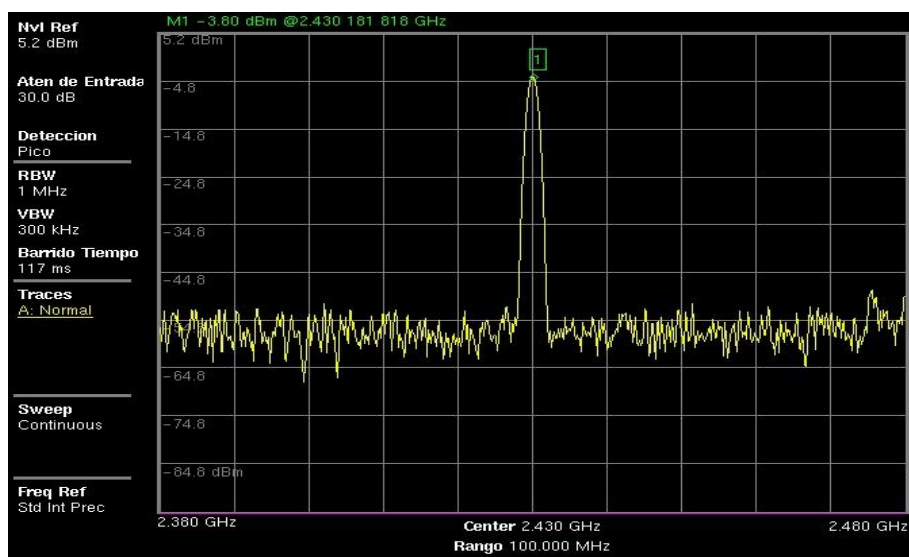


Figura 43. Pérdidas de cables en el receptor a 2.43 GHz para medición en el espacio libre

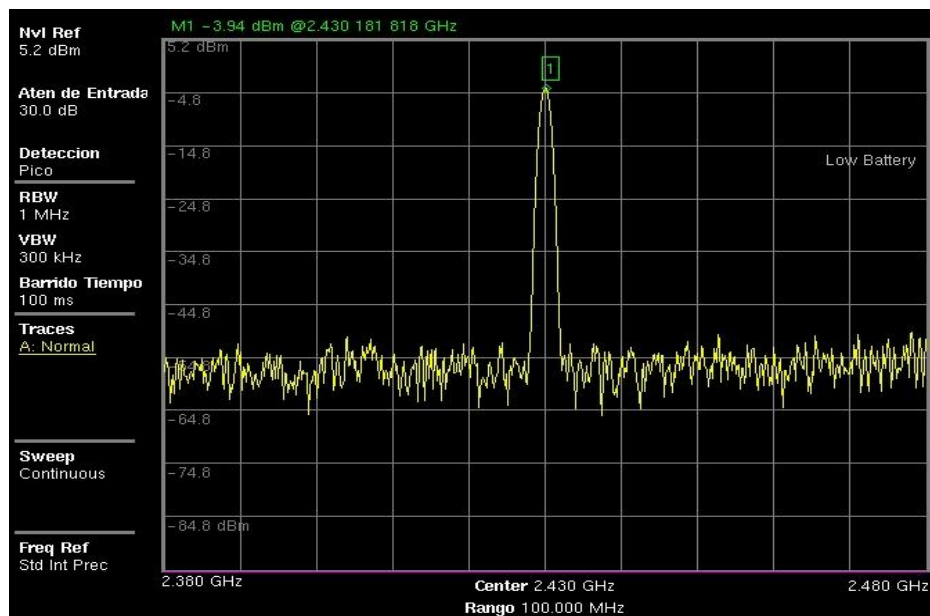


Figura 44. Pérdidas de cables en el transmisor a 2.43 GHz para medición en la cámara anecoica

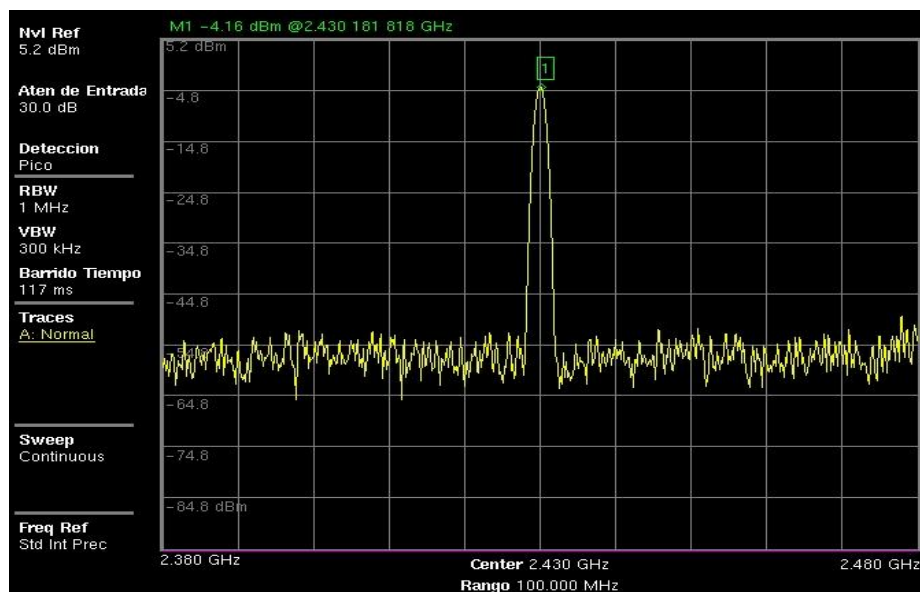


Figura 45. Pérdidas de cables en el receptor a 2.43 GHz para medición en la cámara anecoica

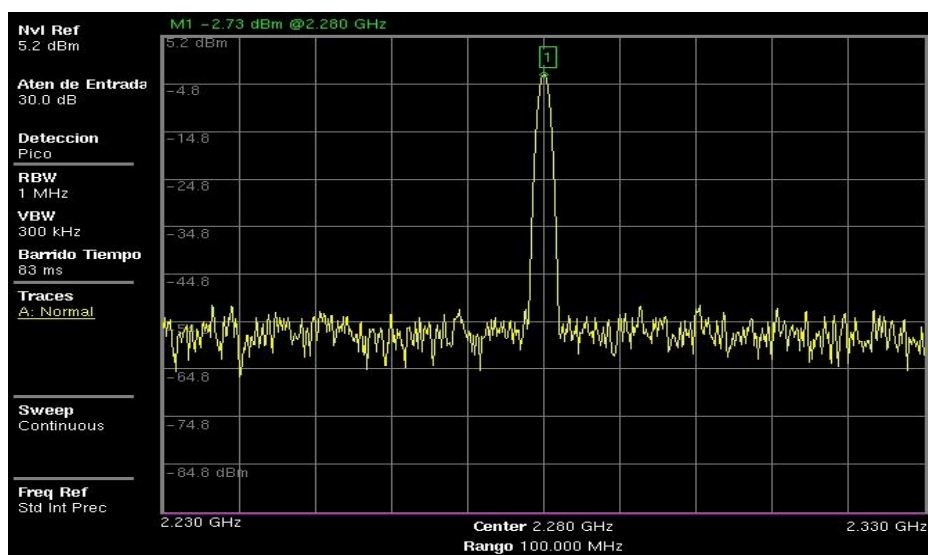


Figura 46. Pérdidas de cables en el transmisor a 2.28 GHz para medición en el espacio libre

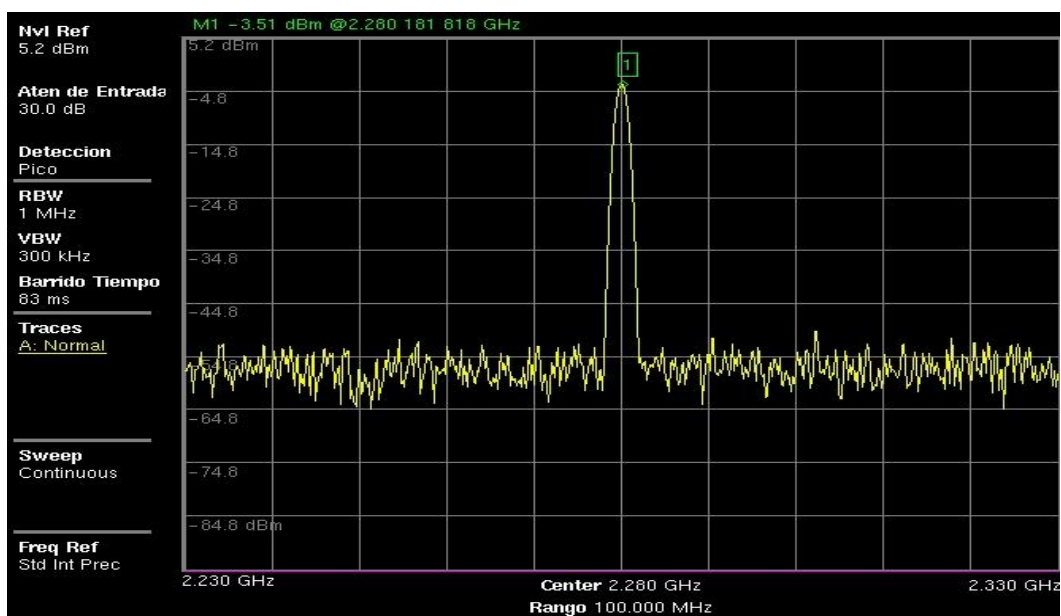


Figura 47. Pérdidas de cables en el receptor a 2.28 GHz para medición en espacio libre

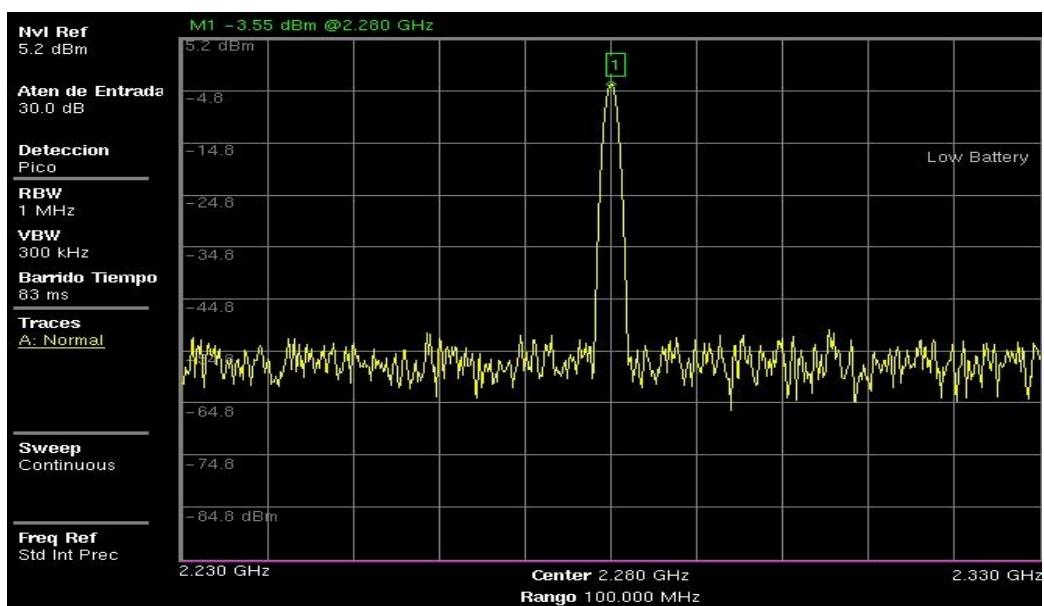


Figura 48. Pérdidas de cables en el transmisor a 2.28 GHz para medición en la cámara anecoica

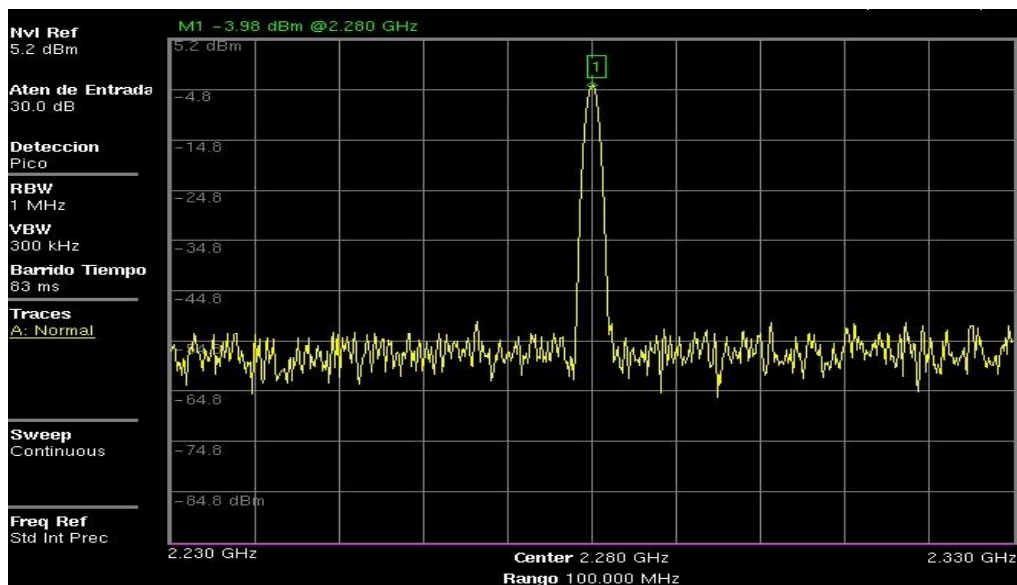


Figura 49. Pérdidas de cables en el receptor a 2.28 GHz para medición en la cámara anecoica

4.5 Alineación de antena de transmisión y recepción

Es importante calcular el espacio de separación entre la antena transmisora y receptora, el objetivo es que la onda que incide sobre la antena sea aproximadamente plana.

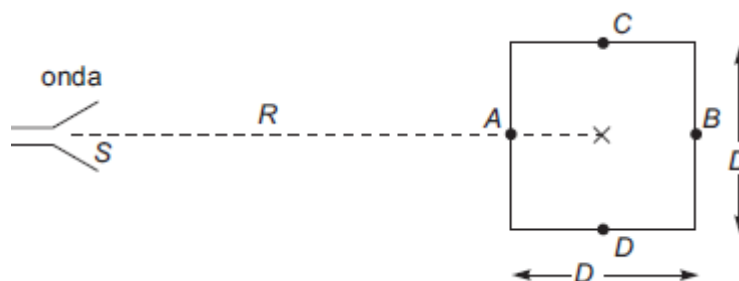


Figura 50. Alineamiento de antenas transmisora y receptora
Fuente: (Cardama, Jofre, Rius, & Romeu, 2002)

Es conocido que las desviaciones de fase entre una onda esférica y una onda plana provocan errores en el patrón de radiación por lo cual se intenta reducir estas desviaciones tomando en cuenta el siguiente criterio:

$$R > \frac{2 * D^2}{\lambda} \quad (4)$$

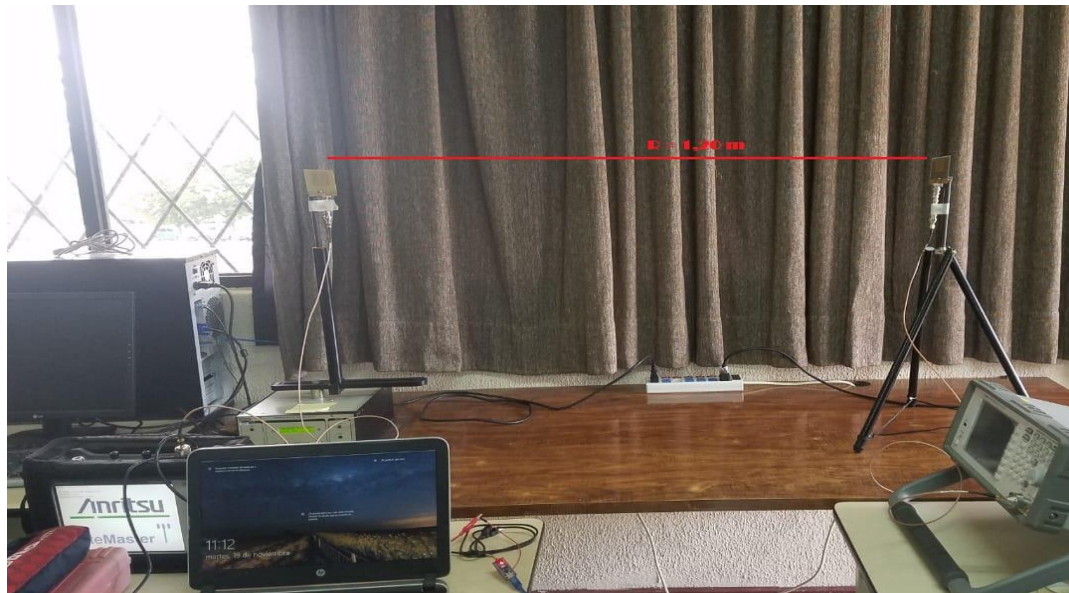
La ecuación 4 indica que la separación R entre ambas antenas debe ser mayor al producto de 2 veces la dimensión de la antena más grande al cuadrado, para este caso el de la antena parche dividido para la longitud de onda a su frecuencia de operación, como se puede observar en la figura 50. Otro aspecto importante es el ángulo visto por la sonda entre el punto central X y el extremo C o el punto central X y el extremo D, se debe buscar que estos ángulos formados sean similares para evitar variaciones transversales de la amplitud y fase que afecten al diagrama de radiación.

Tomando en cuenta estas recomendaciones se calculó esta separación resumida en la tabla 7.

Tabla 7*Distancia de separación entre antenas de transmisión y recepción*

Antena	Frecuencia	Longitud de Onda (λ)	Diámetro (D)	distancia (d)
Arreglo de antenas parche de 2 elementos	2.28 GHz	0.1315 m	0.21 m	0.67
Antena Parche de 1 elemento	2.43 GHz	0.1234 m	0.12 m	0.23

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos R debe ser mayor que la distancia calculada por lo que se decidió separar los elementos 1.20 metros para realizar las pruebas como se puede observar en las figuras 51 y 52 en el espacio libre se ubicaron los elementos a una altura de 1.3 metros y una distancia R ya calculada anteriormente, mientras que en la figura 53 y 54 se ubicaron los elementos dentro de la cámara anecoica para evitar la influencia de señales externas y considerando la misma separación de los elementos

**Figura 51.** Separación entre antenas parche de 1 elemento en el espacio libre

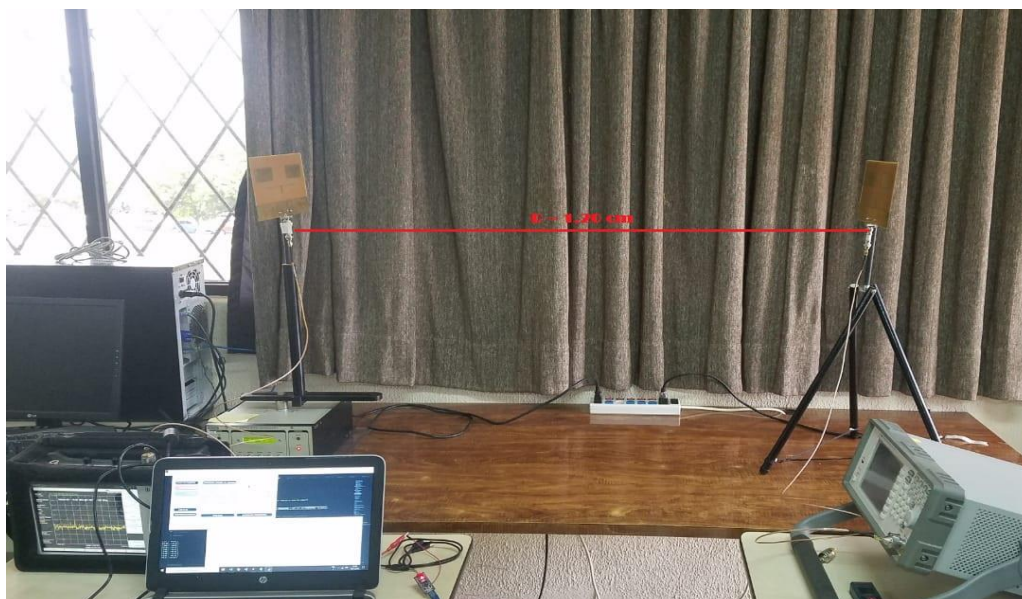


Figura 52. Separación entre arreglo de antenas parche de 2 elementos en el espacio libre

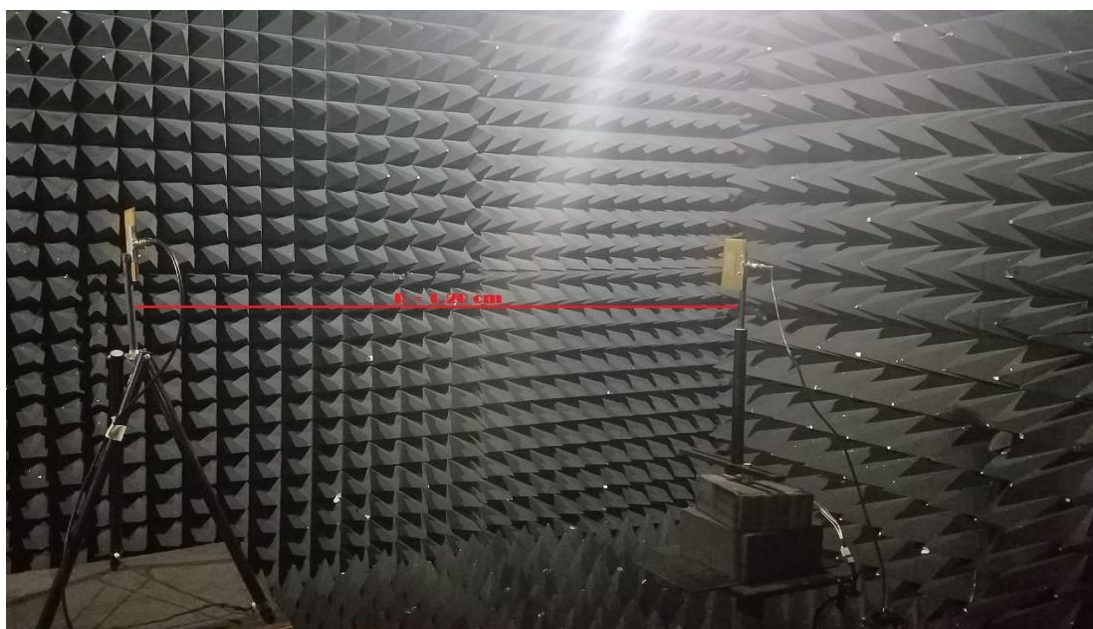


Figura 53. Separación entre antenas parche de 1 elemento dentro de la cámara anecoica

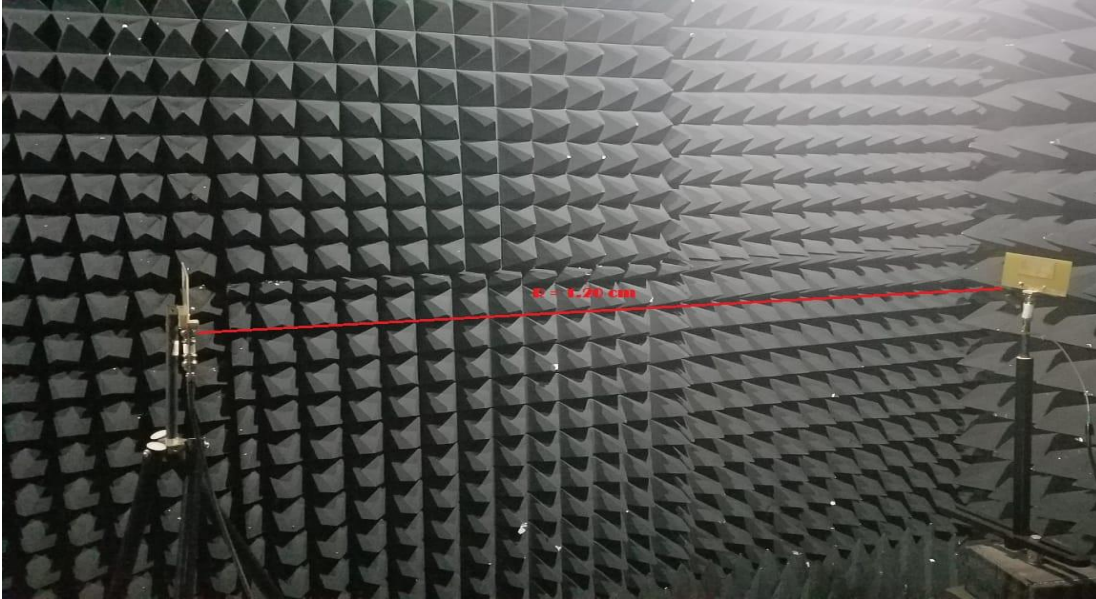


Figura 54. Separación entre antenas parche de 2 elementos dentro de la cámara anecoica

4.6 Obtención del patrón de radiación real

El patrón de radiación permite representar la potencia recibida por la antena en diferentes posiciones angulares y será el objeto de medición principal del software.

A partir de este diagrama se busca obtener otros parámetros como el ancho de haz de media, ancho de haz entre nulos y directividad, ganancia y eficiencia de la antena.

En las figuras siguientes se presentará el patrón de radiación obtenido con las antenas de prueba en el espacio libre y dentro de la cámara anecoica con polarización horizontal y vertical, además se graficaron patrones de radiación relativos para identificar con mayor facilidad el ancho de haz de media potencia a -3dB , posteriormente se realizan algunos ajustes para compensar las pérdidas en cables aumentando la potencia de transmisión un total de 8 dBm dado que se registró en la tabla 2 aproximadamente pérdidas cercanas a 8 dB .

En las siguientes mediciones se realizó el mismo procedimiento con la antena parche de 1 y el arreglo de 2 elementos , para obtener una polarización vertical la línea de alimentación de microcinta se alinea verticalmente permitiendo que el campo eléctrico se oriente en el mismo sentido , mientras que para obtener polarización horizontal se rota 90 grados la línea de alimentación de microcinta permitiendo que el campo eléctrico este orientado horizontalmente, posteriormente al revisar que las antenas estén alineadas correctamente se registró la potencia rotando la antena de recepción 360 grados con pasos de 1 o 5 grados y se procedió a realizar una representación del patrón de radiación relativo en coordenadas polares.

El objetivo es determinar el patrón de radiación de la antena bajo prueba en recepción. En transmisión se ha utilizado el mismo tipo de antena para facilitar cálculos de eficiencia y ganancia considerándola como antena patrón.

4.6.1.1 Patrón de radiación obtenido en el espacio libre para una antena parche de 1 elemento sin compensación de pérdidas.

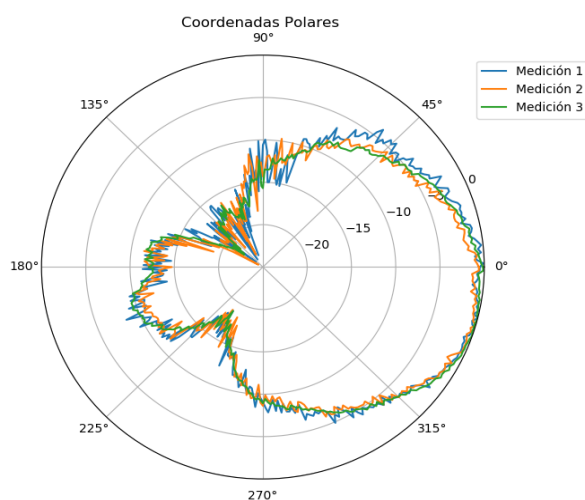


Figura 55. Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en el espacio libre en polarización horizontal sin compensar pérdidas.

En la figura 55 se puede observar que existe simetría tanto en el hemisferio superior e inferior especialmente en el lóbulo de radiación principal, el nivel del lóbulo de radiación posterior es aproximadamente igual a -10 dB, al comparar las 3 mediciones se observa que la potencia registrada en diferentes posiciones angulares es similar a pesar de que existen oscilaciones producto de interferencias y reflexiones en el espacio libre.

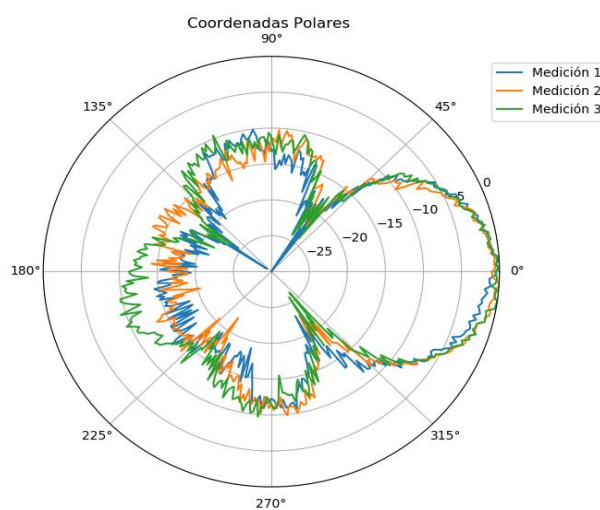


Figura 56. Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en el espacio libre en polarización vertical sin compensar pérdidas

En la figura 56 se puede observar el patrón de radiación en polarización vertical se evidencia que existe simetría en el lóbulo de radiación principal lo que resultará beneficioso para calcular el ancho de haz de media potencia, no se presenta una variación significativa en la posición angular de los lóbulos laterales por lo que el ancho de haz entre nulos será similar en las 3 mediciones.

4.6.1.2 Patrón de radiación obtenido en el espacio libre para una antena parche de 1 elemento con compensación de pérdidas

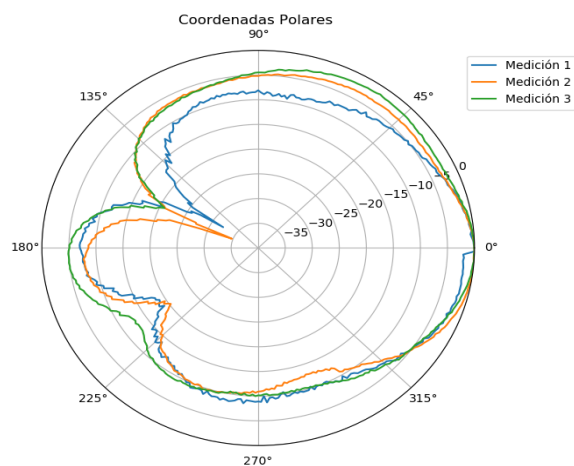


Figura 57. Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en el espacio libre en polarización horizontal con compensación de pérdidas

En la figura 57 se puede observar que en la medición 1 y 2 el lóbulo posterior presenta un nivel de -7.5 , el lóbulo de radiación principal de la medición 2 y 3 presenta un nivel de potencia similar, en la medición 1 se presenta una disminución del nivel del lóbulo de radiación principal cercano a -3 dB, a pesar de estas variaciones la forma de los 3 patrones es similar.

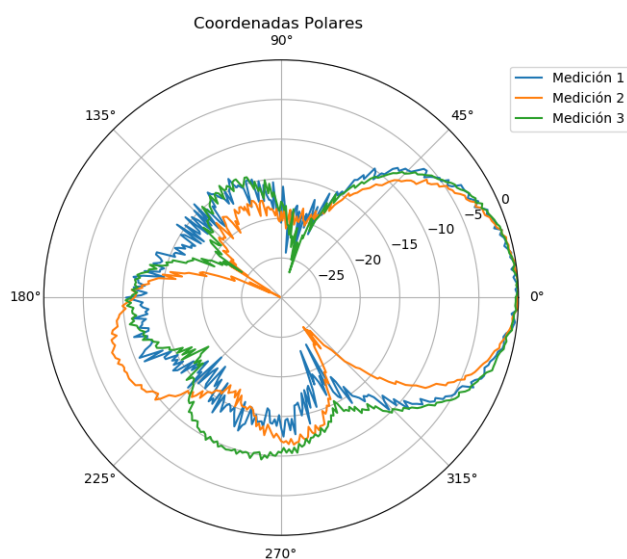


Figura 58. Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en el espacio libre en polarización vertical con compensación de pérdidas

En la figura 58 se puede notar que el lóbulo de radiación principal es similar especialmente en la medición 1 y 3, el lóbulo de radiación posterior presenta un nivel cercano a -10 dB, se presentan variaciones en la posición angular de los lóbulos de radiación laterales por lo que el ancho de haz entre nulos presentara diferentes valores este efecto se debe a reflexiones en objetos provocando rizados en el patrón de radiación y variaciones en la posición angular de los lóbulos laterales.

4.6.2 Patrón de radiación obtenido en una cámara anecoica para una antena parche de 1 elemento sin compensación de pérdidas

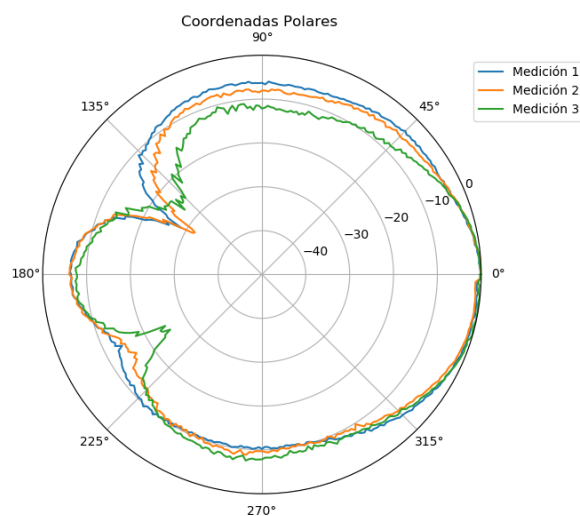


Figura 59. Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en la cámara anecoica en polarización horizontal sin compensar pérdidas

En la figura 59 se puede observar que los patrones de radiación presentan una forma similar en las 3 mediciones y un lóbulo de radiación posterior cercano a -10 dB, en la tercera medición el patrón obtenido resulto ser más simétrico entre el hemisferio superior e inferior, se puede notar que las oscilaciones producidas por interferencias externas se han reducido debido a que las antenas se encuentran dentro de la cámara anecoica permitiendo eliminar señales externas.

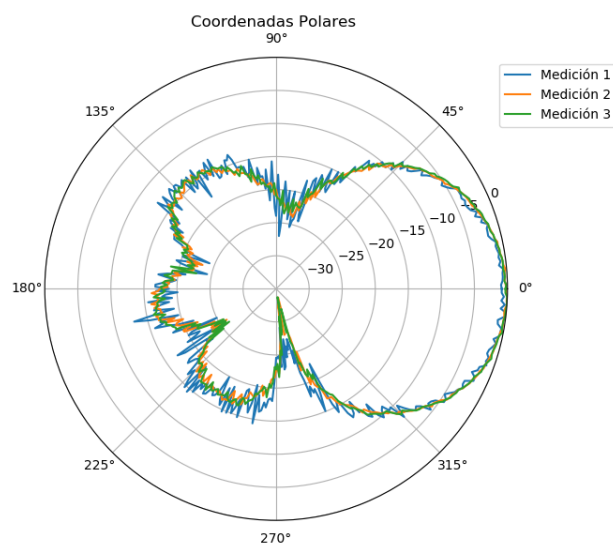


Figura 60. Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en la cámara anecoica en polarización vertical sin compensar pérdidas

En la figura 60 se puede observar que el lóbulo de radiación posterior presenta un nivel de -15 dB a simple vista se puede notar que la forma es similar a la obtenida en el espacio libre mostrada en la figura 56 aunque se presentan más suavizadas debido a la reducción de interferencias externas dentro de la cámara anecoica con excepción de la primera medición que presentan mayor cantidad de oscilaciones.

4.6.3 Patrón de radiación obtenido en una cámara anecoica para una antena parche de 1 elemento con compensación de pérdidas

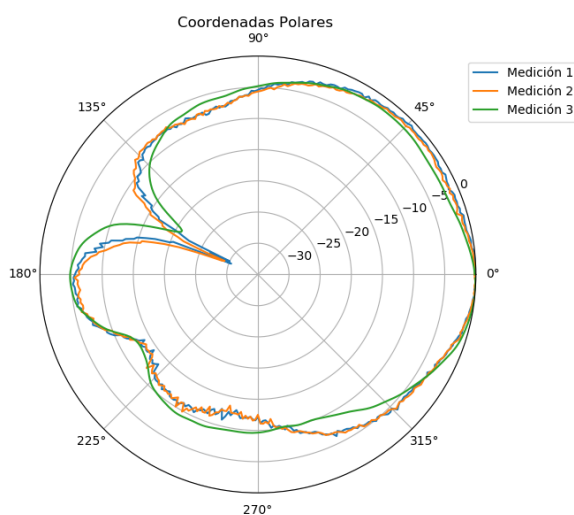


Figura 61. Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en la cámara anecoica en polarización horizontal con compensación de pérdidas

En la figura 61 se puede notar que la forma en las 3 mediciones se presenta más suavizada debido a que la reducción de señales externas, además se puede ver que la forma es similar a la obtenida en la cámara anecoica sin compensar pérdidas, aunque existen diferencias en los parámetros de antena que se analizaran en otra sección.

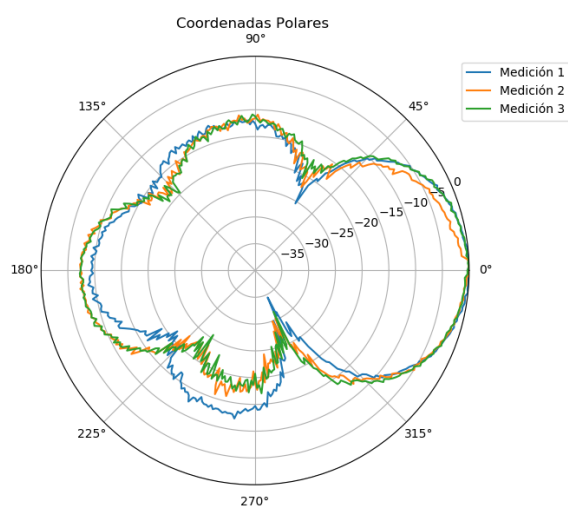


Figura 62. Patrones de radiación de antenas parche de 1 elemento obtenidos en la cámara anecoica en polarización vertical con compensación de pérdidas

En la figura 62 se puede notar que el lóbulo principal es bastante simétrico entre el hemisferio superior e inferior, se presentan lóbulos de radiación laterales alrededor de 90 grados y 270 grados y su posición angular coincide en las 3 mediciones por lo que el ancho de haz entre nulos será similar.

4.6.4 Patrón de radiación obtenido en el espacio libre para un arreglo de antenas parche de 2 elementos sin compensación de pérdidas

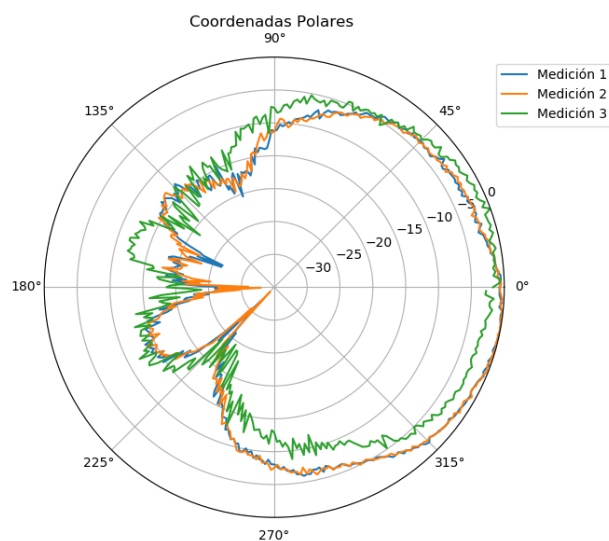


Figura 63. Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en el espacio libre en polarización horizontal sin compensar pérdidas

En la figura 63 se aprecia la simetría que existe en el lóbulo de radiación principal, en el segundo cuadrante el primer nulo no alcanza un valor mínimo al igual que en el 3 cuadrante esto se debe generalmente a variaciones transversales de la fase. Las mediciones 1 y 2 son muy similares, además se muestran oscilaciones en los patrones de radiación debido a que se realizó la medición en el espacio libre donde existen fuentes de interferencias.

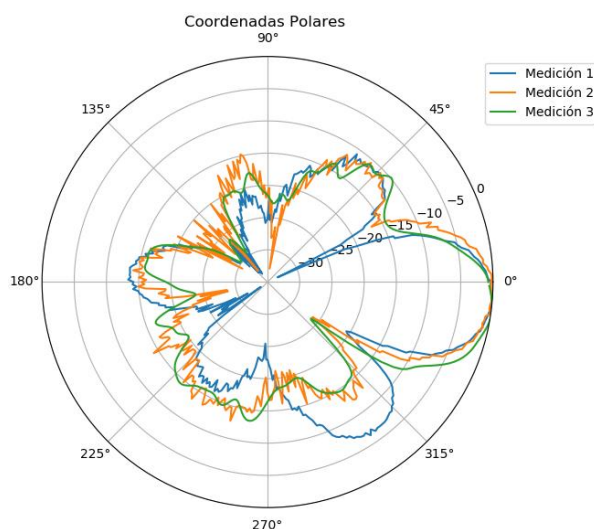


Figura 64. Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en el espacio libre en polarización vertical sin compensar pérdidas

En la figura 64 se puede observar varias mediciones en las 2 primeras se observa que el patrón es simétrico en la tercera se mantiene la forma del lóbulo principal aunque se puede notar que se pierde la simetría esto se debe a que esta última se realizó en pasos de 5, grados el nivel del lóbulo posterior es de aproximadamente -15 dB en todas las mediciones, también se puede notar que la posición angular de los primeros nulos no varía mucho en las 3 mediciones por lo que el ancho de haz entre nulos presentará un valor similar.

4.6.5 Patrón de radiación obtenido en el espacio libre para un arreglo de antenas parche de 2 elementos con compensación de pérdidas

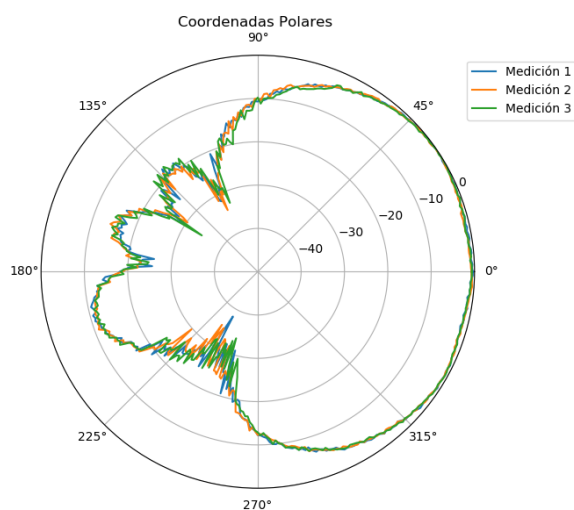


Figura 65: Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en el espacio libre en polarización horizontal con compensación de pérdidas

En la figura 65 se puede notar que se presenta simetría en el lóbulo de radiación principal lo cual es beneficioso para calcular el ancho de haz de media potencia, se puede observar que en 225 grados se suprime un lóbulo de radiación lateral por lo que se pierde simetría entre el 2 y 3 cuadrante.

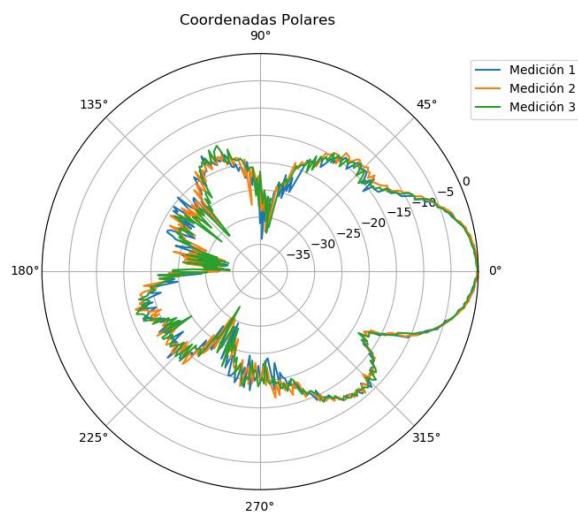


Figura 66: Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en el espacio libre en polarización vertical con compensación de pérdidas

En la figura 66 como se ha repetido en otros experimentos se observa que el lóbulo de radiación principal es más simétrico en el primer y cuarto cuadrante, mientras que los lóbulos laterales tienden a perder parte de su simetría.

Las 3 mediciones son similares, la presencia de rizado especialmente en el 2 y 3 cuadrante se debe a reflexiones que se pueden producir en objetos cercanos en la zona de prueba o incluso a la velocidad del controlador del motor a pasos.

4.6.6 Patrón de radiación obtenido en una cámara anecoica para un arreglo de antenas parche de 2 elementos sin compensación de pérdidas.

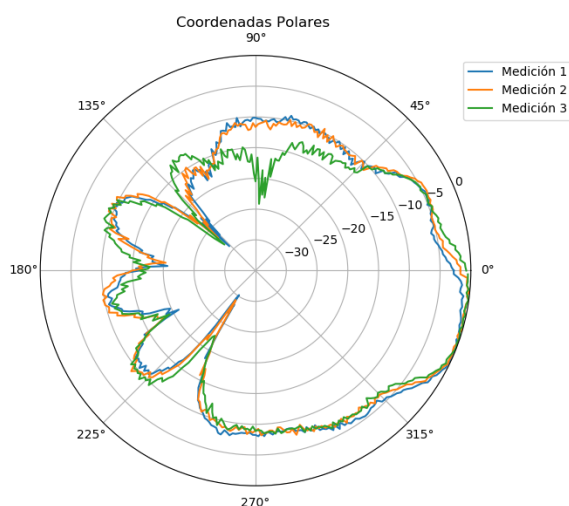


Figura 67: Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en la cámara anecoica en polarización horizontal sin compensar pérdidas

En la figura 67 se observa el patrón obtenido el cual es similar en las 2 primeras mediciones, existe una diferencia en la tercera medición y es que aparece un nulo a 90 grados por lo cual se pierde la simetría en esta medición.

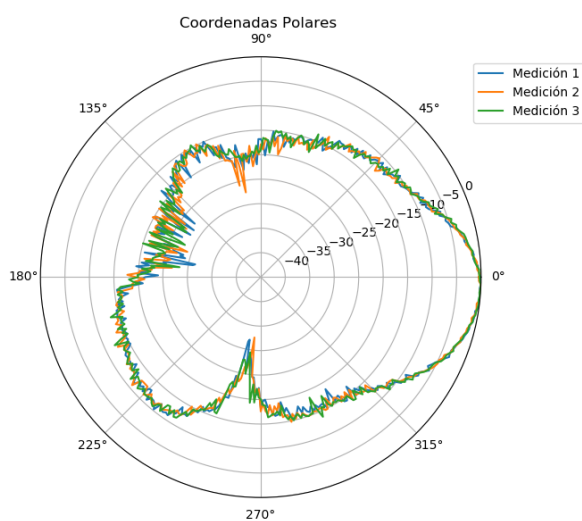


Figura 68. Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en la cámara anecoica en polarización vertical sin compensar pérdidas

En la figura 68 se puede observar que el lóbulo principal mantiene su simetría en las 3 mediciones al comparar los lóbulos de radiación laterales a 105 grados y a 270 grados se puede notar que el primero presenta un nivel menor debido a que en esta zona se presenta una menor cantidad de material absorbente de radiación.

4.6.7 Patrón de radiación obtenido en una cámara anecoica para un arreglo de antenas parche de 2 elementos con compensación de pérdidas.

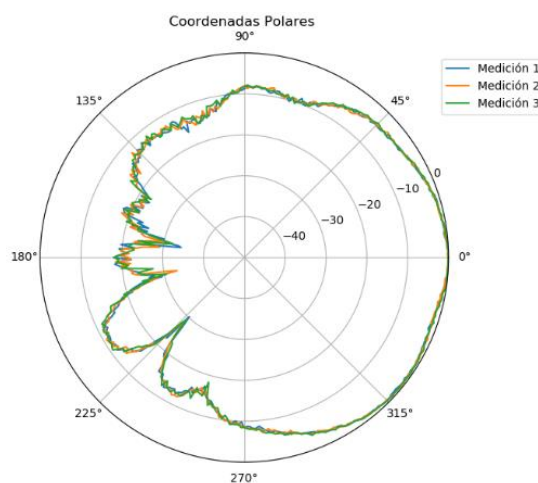


Figura 69. Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en la cámara anecoica en polarización horizontal con compensación de pérdidas

Se puede observar en la figura 69 que la forma del patrón presenta menos oscilaciones, al comparar las 3 mediciones se puede notar que la estructura del patrón es muy similar, se puede ver que los lóbulos de radiación laterales ubicados a la derecha e izquierda del lóbulo posterior presentan una diferencia en su nivel debido a que existe una menor cantidad de material absorbente a 270 grados del punto de alineación de las antenas

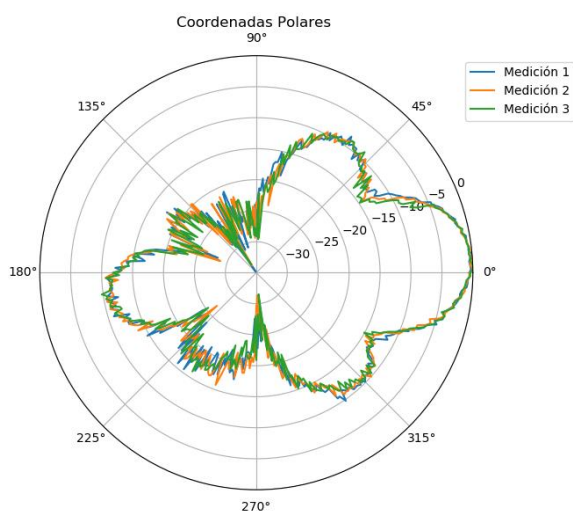


Figura 70. Patrones de radiación de arreglo de 2 elementos obtenidos en la cámara anecoica en polarización vertical con compensación de pérdidas

En la figura 70 se observa que las mediciones conservan la simetría entre el hemisferio superior e inferior especialmente el lóbulo principal y los lóbulos secundarios por lo que el cálculo del ancho de haz de media potencia y ancho de haz entre nulos presentara un valor similar.

4.7 Obtención del patrón de Radiación Simulado

Para obtener el patrón de radiación en campos lejanos como se vio en el capítulo 3 primero se creó la estructura con las dimensiones medidas de la antena de prueba y se importó el material del parche, línea de alimentación de microcinta, tierra y sustrato, posteriormente se encontró información del simulador CST Studio en el que se analizó el tipo de solucionador que se empleará.

Para obtener el patrón de radiación en campos lejanos existen varias opciones de simulación, pero el más adecuado para el estudio es el solucionador en el dominio de la frecuencia el cual emplea el método de elementos finitos utilizando tetraedros como elementos de una malla y es recomendable para usarse en el análisis de estructuras eléctricamente pequeñas y que presenten un ancho de banda angosto.

En la simulación realizada se orientó la antena parche de 1 elemento y el arreglo de 2 elementos verticalmente y horizontalmente y se alimentó con un puerto de tipo discreto permitiendo polarizar a las antenas en estas direcciones, posteriormente para obtener los patrones de radiación en 2 dimensiones se realizó un corte en el patrón de radiación en 3 dimensiones fijando un valor constante de 90 grados en theta y un barrido de 360 grados en phi.

4.7.1 Antena parche de micro línea de 1 elemento

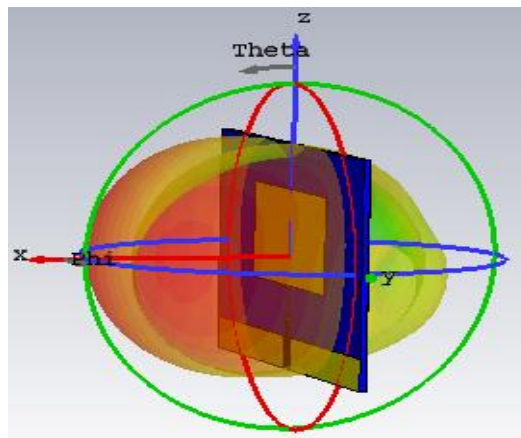


Figura 71. Patrón de radiación en 3 dimensiones de una antena parche de 1 elemento

El patrón de radiación resultante en 3 dimensiones y en coordenadas esféricas se observa en la figura 71 puede notarse que la radiación es perpendicular al plano que contiene al parche y es mayor en comparación a la radiación posterior debido a la presencia de un plano de tierra con material conductor de cobre.

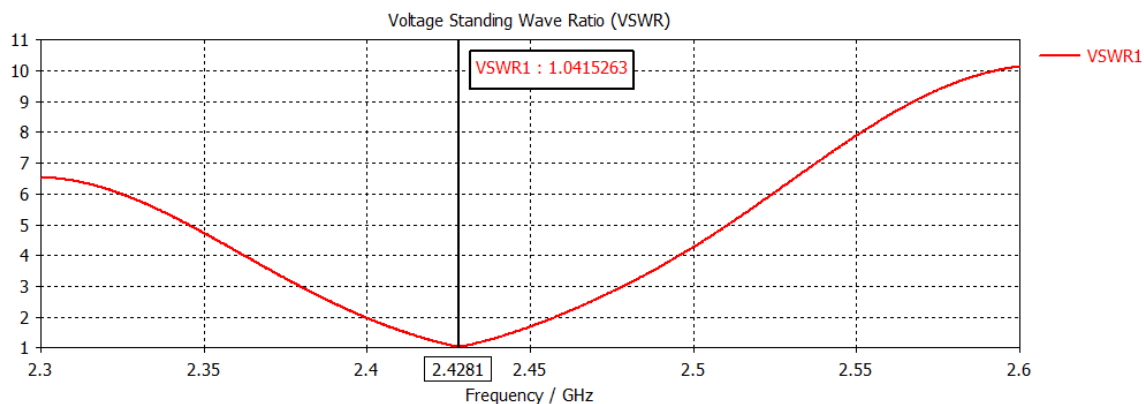


Figura 72. VSWR simulado de antena parche de 1 elemento

En la figura 72 se obtuvo una gráfica del VSWR, se ubicó el valor mínimo en 2.4281 GHz que representa un valor cercano de la frecuencia de operación de la antena de prueba, el VSWR es igual a 1.04 en este punto y es un indicador de un buen acoplamiento de impedancias entre la línea de transmisión y la antena.

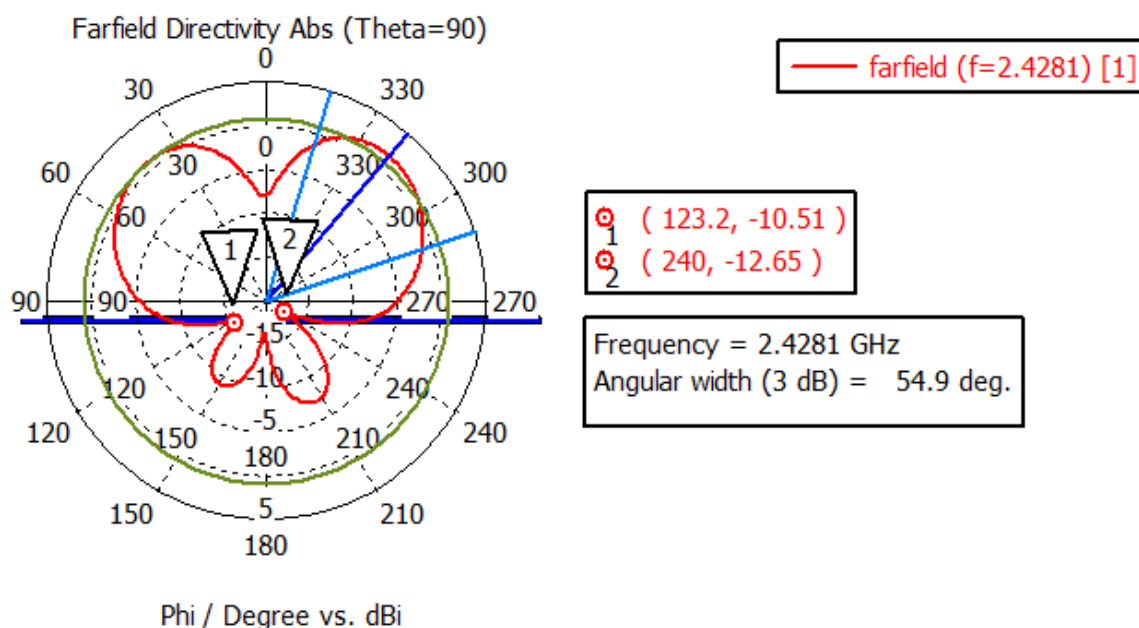


Figura 73. Patrón de radiación simulado de antena parche de 1 elemento con polarización vertical

En La figura 73 se representa el Patrón de radiación vertical y también se observa el ancho de haz de media potencia que tiene un valor de 54,9 grados, para obtener el ancho de haz entre nulos se colocó dos cursores en la dirección de los nulos registrándose en 240 y 123.2 grados por lo que el ancho de haz entre nulos es igual a 243,23 como se muestra a continuación:

$$FNBW = (360^\circ - 240^\circ) + 123.2^\circ = 243.2^\circ$$

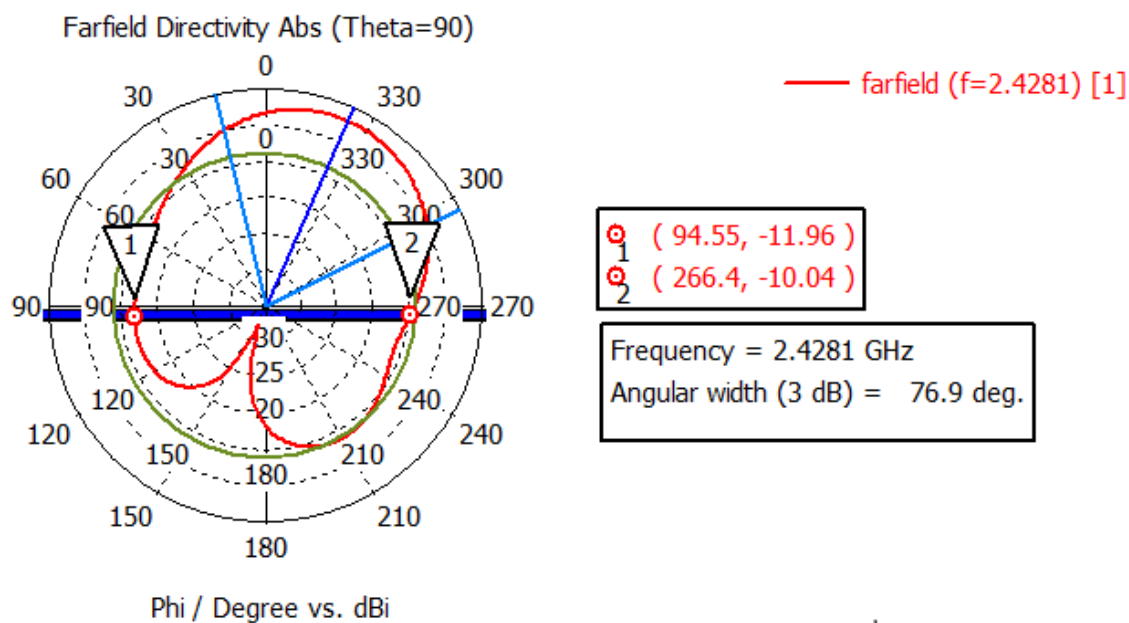


Figura 74. Patrón de radiación simulado de antena parche de 1 elemento con polarización horizontal

En la figura 74 se representa el patrón de radiación horizontal, se observa el ancho de haz de media potencia que presenta un valor de 76,9 grados, para obtener el ancho de haz entre nulos se colocó dos cursores en la dirección del patrón donde se presenta menor potencia registrándose en 251.4 y 94.55 grados por lo que el ancho de haz entre nulos es igual a 288,15 grados.

$$FNBW = (360^\circ - 266.4^\circ) + 94.55^\circ = 188.15^\circ$$

4.7.2 Antena parche de micro línea de 2 elementos

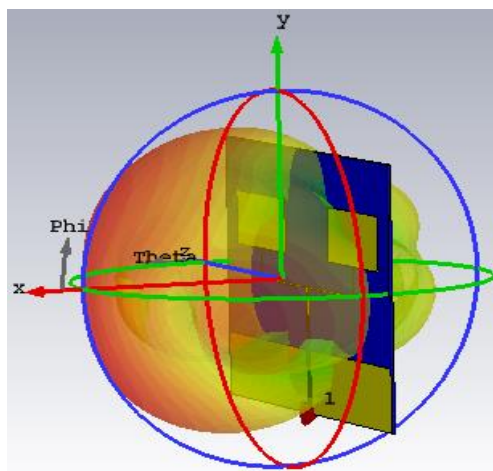


Figura 75. Patrón de radiación en 3 dimensiones de un arreglo de antenas parche de 2 elementos

En la figura 75 se presenta el patrón de radiación en coordenadas esféricas la mayor parte de la radiación se ubica perpendicularmente al plano que contiene los parches, en la parte posterior la radiación es menor debido a la presencia de un plano de tierra compuesto de una lámina de cobre.

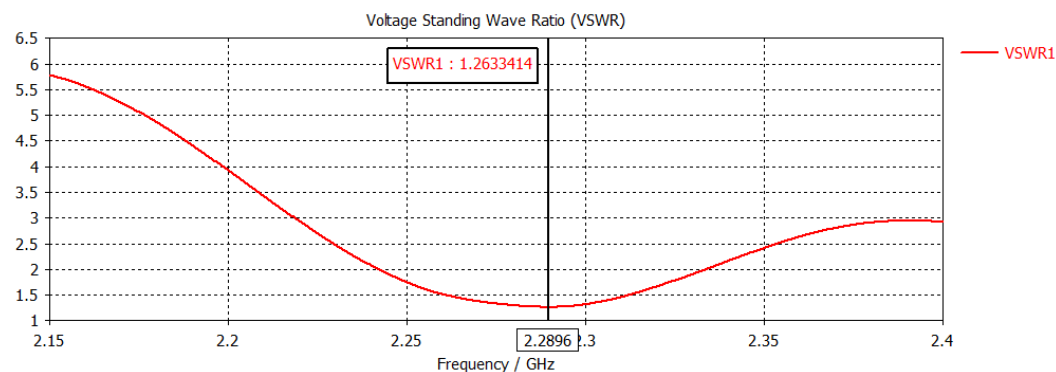


Figura 76. VSWR simulado de un arreglo de antenas parche de 2 elementos

En la figura 76 se observa el VSWR de acuerdo a la teoría un acoplamiento perfecto se obtiene con valores cercanos a 1 en este caso se obtuvo un valor de 1.26 en 2.2896 GHz que corresponde a la frecuencia de operación de la antenna simulada.

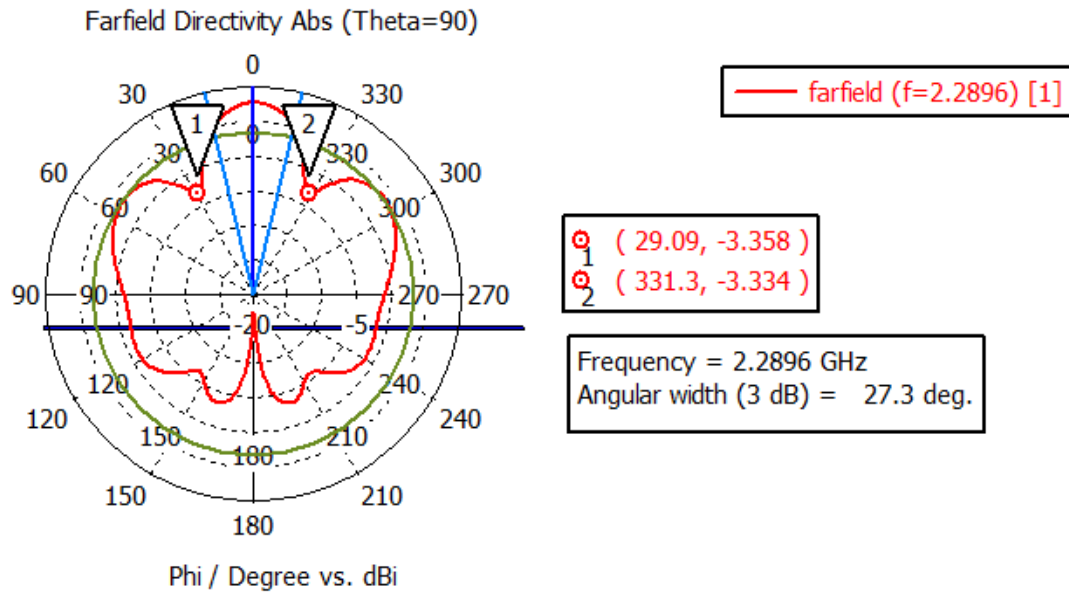


Figura 77. Patrón de radiación simulado de un arreglo de antenas parche de 2 elementos con polarización vertical

En la figura 77 se indica el patrón de radiación vertical y se obtiene el ancho de haz de media potencia con un valor igual a 27.3 grados, en el caso del ancho de haz entre nulos se ubicaron dos cursores en las posiciones seleccionadas en 331.3 y 29.09 grados como resultado el ancho de haz entre nulos es igual a 57.79 grados como se muestra a continuación:

$$FNBW = (360^\circ - 331.3^\circ) + 29.09^\circ = 57.79^\circ$$

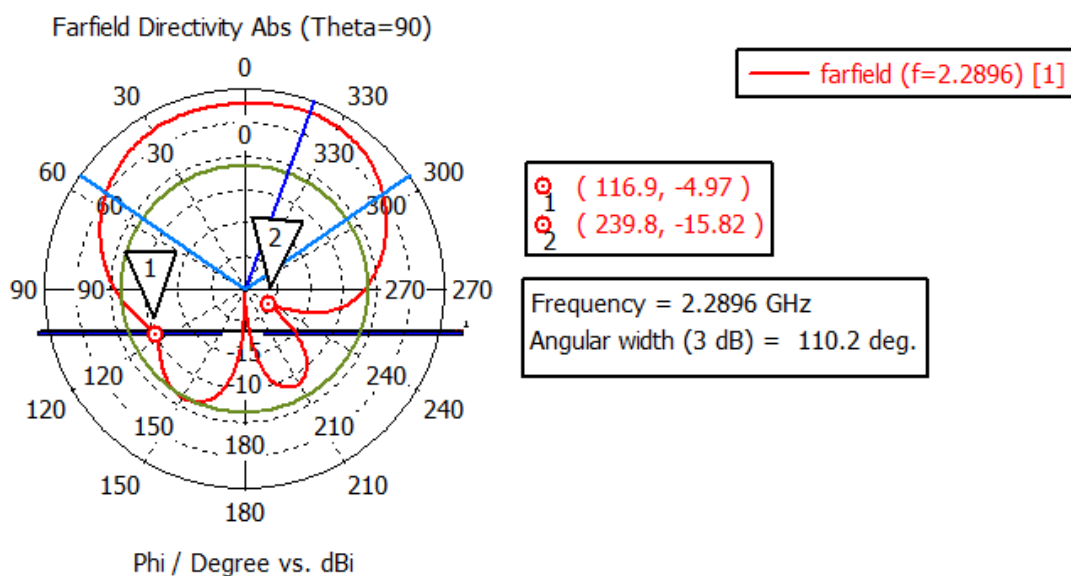


Figura 78. Patrón de radiación simulado de antena parche de 2 elementos con polarización horizontal

En la figura 78 se observa el patrón de radiación horizontal y el ancho de haz de media potencia registrado igual a 110.2 grados, para obtener el ancho de haz entre nulos se ubicó 2 cursores en los nulos ubicados en 239.8 y 116.9 grados dando como resultado un ancho de haz entre nulos igual a 237.1 grados como se muestra a continuación.

$$FNBW = (360^\circ - 239.8^\circ) + 116.9^\circ = 237.1^\circ$$

4.8 Análisis de parámetros de antenas

En esta sección se realizará un análisis de parámetros de radiación de antenas como es la directividad ancho de haz entre nulos y ancho de haz de media potencia, como base se tomó los patrones de radiación analizados en la sección 4.7, el análisis comparativo se lo realiza con los resultados obtenidos en el simulador CST que proporciona las características de radiación que se desean analizar en esta sección.

En las tablas que se mostraran en la siguiente subsección se presenta el resumen de los parámetros de antenas obtenidos con ayuda del programa de post-procesamiento es importante resaltar que la directividad medida se basa en una fórmula aproximada que considera al ancho de haz de media potencia en el plano vertical y horizontal por lo que ambos parámetros estarán relacionados y la precisión del ancho de haz de media potencia influencia en esta medida, ventajosamente el lóbulo de radiación principal en la mayor parte de las mediciones realizadas presento simetría y menos perturbaciones por lo que el ancho de haz de media potencia no presenta una variación elevada entre mediciones realizadas en un mismo entorno y bajo las mismas condiciones de compensación de pérdidas, el análisis entre valores medidos se realizara tomando en consideración el valor promedio de los parámetros obtenidos en 3 mediciones. La fórmula utilizada para medir la Directividad es la siguiente $D = \frac{4\pi}{\Delta\theta_{-3dB}^E \times \Delta\theta_{-3dB}^H}$ y como podrá notarse es inversamente proporcional al producto del ancho de haz de media potencia en el plano Horizontal y Vertical.

Se puede destacar que al aumentar el número de parches el ancho de haz de media potencia en todos los entornos de prueba disminuyo en comparación a los resultados obtenidos con antenas parche de 1 elemento lo que equivale a un aumento de la directividad.

4.8.1 Parámetros de antenas parche de 1 elemento

Tabla 8

Parámetros de antena parche de 1 elemento medidos en el espacio libre sin compensación de pérdidas

Polarización	Pasos	Ancho de Haz de Media Potencia (Grados)	Ancho de Haz entre Nulos (Grados)	Directividad Medida (Adimensional)
Horizontal	1	66	240	
Horizontal	1	60	235	
Horizontal	1	63	268,09	16,50780312
PROMEDI		63	247,6966667	
Vertical	1	41	113	
Vertical	1	41	103	
Vertical	1	37	119,56	
PROMEDIO		39,66666667	111,8533333	

Tabla 9

Parámetros de antena parche de 1 elemento medidos en el espacio libre con compensación de pérdidas

Polarización	Pasos	Ancho de Haz de Media Potencia (Grados)	Ancho de Haz entre Nulos (Grados)	Directividad Medida (Adimensional)
Horizontal	1	49	147,49	
Horizontal	1	52	226,2	
Horizontal	1	99	223,66	12,80265517
PROMEDIO		66,66666667	199,1166667	
Vertical	1	52	134	
Vertical	1	43	122,45	
Vertical	1	50	129,15	
PROMEDIO		48,33333333	128,5333333	

En la tabla 8 se resume las mediciones realizadas en el espacio libre sin reducir las pérdidas en cables, en la tabla 9 se realizó las mediciones en el mismo entorno, pero con la diferencia que se compenso las pérdidas con un aumento de potencia de transmisión.

Los resultados en donde se compenso las pérdidas presentan los siguientes cambios se puede observar que el ancho de haz de media potencia en polarización horizontal aumento en 3 grados y aumento en 8.64 grados en polarización vertical, en cuanto al ancho de haz entre nulos en el plano horizontal se presenta una disminución de 48,5 grados y en el plano vertical un aumento de 16,68 grados, en cuanto a la directividad este cambio producido en el ancho de haz de media potencia provoco una reducción en la directividad en 3.7 unidades aproximadamente.

Tabla 10

Parámetros de antena parche de 1 elemento medidos en una cámara anecoica sin compensación de pérdidas

Polarización	Pasos	Ancho de Haz de Media Potencia (Grados)	Ancho de Haz entre Nulos (Grados)	Directividad Medida (Adimensional)
Horizontal	1	58	303	
Horizontal	1	55	296	
Horizontal	1	56	290,52	15,371402
PROMEDIO		56,5	299,5	
Vertical	1	48	157	
Vertical	1	47	156,19	
Vertical	1	47	157,32	
PROMEDIO		47,5	156,595	

Tabla 11

Parámetros de antena parche de 1 elemento medidos en una cámara anecoica con compensación de pérdidas

Polarización	Pasos	Ancho de Haz de Media Potencia (Grados)	Ancho de Haz entre Nulos (Grados)	Directividad Medida (Adimensional)
Horizontal	1	102	251,737	
Horizontal	1	98	259,28	
Horizontal	1	101	229,88	8,39100956
PROMEDIO		100,3333333	246,9656667	
Vertical	1	50	123,33	
Vertical	1	48	129,6255	
Vertical	1	52	134,66	
PROMEDIO		49	126,47775	

En la tabla 10 se resume las mediciones realizadas en el interior de una cámara anecoica sin reducir las pérdidas en los cables , en la tabla 11 se realizó las mediciones en el mismo entorno pero con la diferencia que se compenso las pérdidas con un aumento de potencia de transmisión, los resultados en donde se compenso las pérdidas presentan los siguientes cambios se puede observar que el ancho de haz de media potencia en polarización horizontal aumento en 43.83 grados y aumento aproximadamente en 1.5 grados en el plano vertical en cuanto al ancho de haz entre nulos en el plano horizontal se presenta una disminución de 52.54 grados y en el plano vertical una disminución de 30.12 grados, en cuanto a la directividad este cambio producido en el ancho de haz de media potencia provoco una reducción en la directividad en 6.98 unidades aproximadamente.

4.8.2 Parámetros de un arreglo de antenas parche de 2 elementos

Tabla 12

Parámetros de arreglo de antenas parche de 2 elementos medidos en el espacio libre sin compensación de pérdidas

Polarización	Pasos	Ancho de Haz de Media Potencia (Grados)	Ancho de Haz entre Nulos (Grados)	Directividad Medida (Adimensional)
Horizontal	1	70	242	19,96971816
Horizontal	1	71	241,33	
Horizontal	1	83	276	
PROMEDIO		74,66666667	253,11	
Vertical	1	26	57	
Vertical	1	29	65,39	
Vertical	5	28	67	
PROMEDIO		27,66666667	63,13	

Tabla 13

Parámetros de antena parche de 2 elementos medidos en el espacio libre con compensación de pérdidas

Polarización	Pasos	Ancho de Haz de Media Potencia (Grados)	Ancho de Haz entre Nulos (Grados)	Directividad Medida (Adimensional)
Horizontal	1	115	234,62	
Horizontal	1	113	239,14	
Horizontal	1	116	219,59	13,3246124
PROMEDIO		114,6666667	231,1166667	
Vertical	1	27	68,05	
Vertical	1	27	68,88	
Vertical	1	27	73	
PROMEDIO		27	69,9766667	

En la tabla 12 se resume las mediciones realizadas en el espacio libre sin reducir las pérdidas en cables, en la tabla 13 se realizó las mediciones en el mismo entorno pero con la diferencia que se compenso aumentando la potencia de transmisión, los resultados en donde se compenso las pérdidas presentan los siguientes cambios se puede observar que el ancho de haz de media potencia en polarización horizontal aumento en 40 grados y en polarización vertical disminuyo 0.66 grados, en cuanto al ancho de haz entre nulos se presentó una disminución de 22 grados y un aumento en 6 grados en polarización vertical por lo que no presenta una gran variación en este plano, en cuanto a la directividad este cambio producido en el ancho de haz de media potencia provoco una reducción en la directividad en 6.64 unidades aproximadamente

Tabla 14

Parámetros de antena parche de 2 elementos medidos en una cámara anecoica sin compensación de pérdidas

Polarización	Pasos	Ancho de Haz de Media Potencia (Grados)	Ancho de Haz entre Nulos (Grados)	Directividad Medida (Adimensional)
Horizontal	1	37	260,6	32,38069074
Horizontal	1	39	262,68	
Horizontal	1	41	262	
PROMEDIO		39	261,76	
Vertical	1	32	113,14	
Vertical	1	32	116,2	
Vertical	1	34	88,83	
PROMEDIO		32,66666667	106,0566667	

Tabla 15

Parámetros de antena parche de 2 elementos medidos en una cámara anecoica con compensación de pérdidas

Polarización	Pasos	Ancho de Haz de Media Potencia (Grados)	Ancho de Haz entre Nulos (Grados)	Directividad Medida (Adimensional)
Horizontal	1	93	221,009	15,72941027
Horizontal	1	93	217,37	
Horizontal	5	95	253,53	
PROMEDIO		93,66666667	230,6363333	
Vertical	1	29	69,42	
Vertical	1	28	64,72	
Vertical	5	27	63,89	
PROMEDIO		28	66,01	

En la tabla 14 se resume las mediciones realizadas en el interior de una cámara anecoica sin reducir las pérdidas en cables, en la tabla 15 se realizó las mediciones en el mismo entorno pero con la diferencia que se compenso las pérdidas aumentando la potencia de transmisión, los resultados en donde se compenso las pérdidas presentan los siguientes cambios se puede observar que el ancho de haz de media potencia en polarización horizontal aumento en 54,66 grados y disminuyo en 4.66 grados en el plano vertical .

Con respecto al ancho de haz entre nulos en el plano horizontal se presenta una disminución de 31.13 grados y en el plano vertical una disminución 40.04 grados, en cuanto a la directividad este cambio producido en el ancho de haz de media potencia provoco una reducción en la directividad en 16.6 unidades aproximadamente.

4.8.3 Comparación de Parámetros de antenas parche medidos y simulados

Para realizar el análisis comparativo primero se resume en la tabla 16 y 17 los parámetros de antenas simulados, se debe señalar que la directividad se calculó utilizando la siguiente aproximación:

$$D = \frac{4\pi}{\Delta\theta_{-3dB}^E \times \Delta\theta_{-3dB}^H}$$

$\Delta\theta_{-3dB}^E$ representa el ancho de haz de media potencia simulado en el plano horizontal (HPBW Horizontal).

$\Delta\theta_{-3dB}^H$ representa el ancho de haz de media potencia simulado en el plano vertical (HPBW Vertical).

Tabla 16

Parámetros de antena Parche de 1 elemento simulados

POLARIZACION	HPBW	FNBW	DIRECTIVIDAD
HORIZONTAL	76,9	188,15	9,771401366
VERTICAL	54,9	243,2	

Tabla 17

Parámetros de un arreglo de antenas parche de 2 elementos simulados

POLARIZACION	HPBW	FNBW	DIRECTIVIDAD
HORIZONTAL	110,2	237,1	13,71233123
VERTICAL	27,3	57,79	

Tabla 18

Errores obtenidos al comparar parámetros de antenas parche de 1 elemento con polarización horizontal

Entorno	Polarización	Ancho de Haz de Media Potencia (Error %)	Ancho de Haz entre Nulos (Error %)
Espacio libre	horizontal	18,07542263	31,6485074
Espacio libre sin pérdidas	horizontal	13,30732553	5,828682789
Cámara anecoica	horizontal	26,52795839	59,18150412
Cámara anecoica sin pérdidas	horizontal	30,0390117	31,2599876

En la tabla 18 se resume el cálculo de errores entre los parámetros reales y los simulados en CST de una antena parche de 1 elemento polarizada horizontalmente. En el espacio libre se puede observar una reducción en el porcentaje de error al compensar las pérdidas, se disminuye en 4.76 % el error del ancho de haz de media potencia y en 25.82% en el error del ancho de haz entre nulos. Al reducir las pérdidas en la cámara anecoica el error en el ancho de haz de media potencia se mantuvo alrededor del 30 %, mientras que se presentó una disminución de 27.92% en el error del ancho de haz entre nulos.

Tabla 19

Errores obtenidos al comparar parámetros de antenas parche de 1 elemento con polarización vertical

Entorno	Polarización	Ancho de Haz de Media Potencia (Error %)	Ancho de Haz entre Nulos (Error %)
Espacio libre	Vertical	27,74741955	54,00767544
Espacio libre sin pérdidas	Vertical	11,96114147	47,14912281
Cámara anecoica	Vertical	13,47905282	35,61060855
Cámara anecoica sin pérdidas	Vertical	10,74681239	47,99434622

En la tabla 19 se muestra el cálculo de errores en los parámetros de una antena parche de 1 elemento polarizada verticalmente. Al compensar las pérdidas en el espacio libre se puede observar una reducción de 15.78 % en el error del ancho de haz de media potencia y una reducción de 7% en el ancho de haz entre nulos.

En la cámara anecoica al reducir las pérdidas el error disminuye en 2.73 % en el ancho de haz de media potencia, en cuanto al ancho de haz entre nulos se presenta un aumento del 12.28% de error, puede notarse que el ancho de haz de media potencia presento menor porcentaje de errores ya que el lóbulo de radiación principal de donde se extrae este parámetro presento mayor simetría y menos perturbaciones durante las pruebas.

Tabla 20

Errores obtenidos al comparar parámetros de antenas parche de 2 elementos con polarización horizontal

Entorno	Polarización	Ancho de Haz de Media Potencia (Error %)	Ancho de Haz entre Nulos (Error %)
Espacio libre	Horizontal	32,24440411	6,752425137
Espacio libre sin pérdidas	Horizontal	4,05323654	2,523548432
Cámara anecoica	Horizontal	64,60980036	10,40067482
Cámara anecoica sin pérdidas	Horizontal	15,0030248	2,726135245

En la tabla 20 se presenta el porcentaje de error obtenido en diferentes entornos con una antena parche de 2 elementos polarizada horizontalmente. Al reducir las pérdidas en el espacio libre se disminuyó en 28.24% el error del ancho de haz de media potencia y en 4.23 % en el ancho de haz entre nulos. En la cámara anecoica al reducir las pérdidas se disminuyó en 49,6% el error del ancho de haz de media potencia y en 7.68% el error del ancho de haz entre nulos.

Tabla 21

Errores obtenidos al comparar parámetros de un arreglo de antenas parche de 2 elementos con polarización vertical

Entorno	Polarización	Ancho de Haz de Media Potencia (Error %)	Ancho de Haz entre Nulos (Error %)
Espacio libre	Vertical	1,343101343	9,240353002
Espacio libre sin pérdidas	Vertical	1,098901099	21,0878468
Cámara anecoica	Vertical	19,65811966	83,52079368
Cámara anecoica sin pérdidas	Vertical	2,564102564	14,22391417

En la tabla 21 se muestra el porcentaje de error obtenido al comparar el ancho de haz de media potencia y el ancho de haz entre nulos de un arreglo de antenas parche de 2 elementos polarizada verticalmente. Al disminuir las pérdidas en el espacio libre se redujo el error del ancho de haz de media potencia en 0.25 %, mientras que el error del ancho de haz entre nulo aumento en 11.76% la razón es que en este plano se perdió simetría en el 2 y 3 cuadrante donde se presentaron los primeros nulos. Al reducir las pérdidas en la cámara anecoica se disminuyó en 17.09% el error del ancho de haz de media potencia, el mismo efecto se produjo en el ancho de haz entre nulos donde se presenta una reducción del 69.29%.

Tabla 22

Análisis de error de la directividad de una antena parche de 1 elemento

Entorno	Directividad (% Error)
Espacio libre	68,93997599
Espacio libre sin pérdidas	31,02168966
Cámara anecoica	57,31010713
Cámara anecoica sin pérdidas	13,84061224

En la tabla 22 se puede observar el error entre la directividad simulada de la tabla 16 y la real utilizando una formula aproximada.

Se puede notar que en el espacio libre sin pérdidas el error se redujo en 37.91%, mientras que en la cámara anecoica sin pérdidas se redujo en 43.47 %, el entorno en que se presentó el menor error fue en la cámara anecoica y en el espacio libre cuando se redujo las pérdidas por cables y conectores. Se debe señalar que estos resultados se deben a que la formula aproximada considera el ancho de haz de media potencia en el plano Horizontal y vertical por lo que en los entornos donde se obtuvo un menor porcentaje de error el ancho de haz de media potencia también fue menor.

Tabla 23*Análisis de error de la directividad de una antena parche de 2 elementos*

Entorno	Directividad (% Error)
Espacio libre	45,63328313
Espacio libre sin pérdidas	2,82751938
Cámara anecoica	136,1428571
Cámara anecoica sin pérdidas	14,70996441

En la tabla 23 se muestra el error calculado entre la directividad real y la simulada de la tabla 17 utilizando una fórmula aproximada. En el espacio libre al reducir las pérdidas por cables y conectores el error se redujo en 42.81%, mientras que en la cámara anecoica sin pérdidas se redujo en 121.44 %. En los entornos sin pérdidas el ancho de haz de media potencia presenta un porcentaje de error menor por lo que la directividad real calculada es similar a la simulada dado que la fórmula de aproximación considera el ancho de haz de media potencia en los planos de polarización horizontal y vertical.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

A través de la información acerca de las especificaciones de antenas parche rectangulares de microcinta donde se constata el efecto del tipo de material utilizado como sustrato, cuando el material presenta una permitividad relativa baja el tamaño físico de la antena aumenta. Al aumentar la altura del sustrato se incrementan los efectos de franja produciendo un aumento en la longitud efectiva de la antena y una reducción de la frecuencia de operación, al aumentar el número de elementos es decir al formar un arreglo de antenas parche se presenta un aumento en la directividad y ganancia en el patrón de radiación al igual que una reducción en el ancho de haz de media potencia en uno de los planos principales.

La interfaz gráfica desarrollada permite enviar comandos de control para configurar el span, frecuencia central, realizar consultas, establecer niveles de referencia, ubicar valores máximos con marcadores utilizando el paquete de Python pyvisa el cual controla el instrumento de medición Anritsu S362E, que posee una interfaz USB, fue necesario añadir un tiempo de retardo entre cada comando de control para evitar conflictos con la información que procesa el equipo.

La conexión entre el microcontrolador y el equipo ATS-10 se establece a través de señales TTL dadas por el ATS-10 por cada cambio de posición angular y con ayuda de interrupciones detectadas en el microcontrolador se envió caracteres por el terminal serial hacia el computador de esta forma se logró sincronizar el tiempo exacto en que se debe enviar un comando de consulta al analizador de espectros , además fue indispensable el uso de hilos creados en Python ya que paralelamente se presentó en coordenadas polares y en tiempo real la generación del patrón de radiación mientras se obtenían datos del equipo ANRITSU S362E.

El uso de señales personalizadas en Python es importante ya que se pudo compartir información entre diferentes clases creadas para dividir en diferentes módulos todas las funciones del programa principal de esta forma es más sencillo depurar errores.

Se creó una ventana de post-procesamiento de datos ejecutado en un hilo independiente, gracias al uso de paquetes como numpy se almacenó todos los datos en forma de vectores o matrices facilitando la obtención de parámetros de antenas como el ancho de haz de media potencia, ancho de haz entre nulos y directividad. Para comprobar la precisión en los parámetros se utilizó un cursor para registrar valores exactos, en el cálculo del ancho de haz de media potencia la precisión fue alta gracias a que las posiciones angulares se buscan a un valor fijo de -3dB y dado que este parámetro tiene relación con la fórmula aproximada de directividad resultó beneficioso.

El programa permitió analizar mediciones realizadas con pasos de 5 grados debido a que se creó una función de interpolación cubica (paquete SCIPY) para calcular la potencia en posiciones angulares faltantes.

El paquete matplotlib permitió obtener gráficos en coordenadas polares y cartesianas en los principales planos medidos E o H, ya que se almacenó los datos en matrices y se pudo obtener Patrones de radiación relativos como también absolutos, además se creó un objeto de la clase NavigatioToolBar para que el usuario pueda ubicar el cursor en cualquier punto de los gráficos y registrar tanto el nivel de potencia como la posición angular obtenida en diferentes mediciones.

El programa CST STUDIO simula el patrón de radiación con el método en dominio de la frecuencia y es utilizado cuando el tamaño eléctrico de la estructura es pequeño y presenta un ancho de banda angosto características que poseen las antenas tipo parche de prueba.

Al analizar el grafico de VSWR vs Frecuencia se observó que la frecuencia de resonancia de la antena parche de 1 elemento y el arreglo de 2 elementos fue similar a la medida con ayuda del analizador ANRITSU con la simulación. Además de otros parámetros como ancho de haz de media potencia, ancho de haz entre nulos.

Las mediciones se realizaron en el laboratorio de Antenas del Departamento de Eléctrica y electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE tanto en el espacio libre como en la Cámara anecoica. Se obtuvieron mejores resultados cuando la potencia de transmisión se incrementa, compensando las pérdidas en los cables. De igual manera los resultados en la cámara anecoica fueron parecidos a los del espacio libre con una cierta mejora al considerar el espacio en condiciones ideales.

5.2 Recomendaciones

Al simular utilizando el solucionador en el dominio de la frecuencia se puede utilizar métodos de solución de primer orden para estructuras complejas lo que aumenta el tiempo de simulación, pero aumenta la precisión.

El rango de frecuencias que se especifica en los parámetros del solucionador en el dominio de la frecuencia influye en el tiempo de simulación por lo tanto la primera vez que se ejecuta la simulación se puede encontrar la frecuencia de resonancia de la antena midiendo el mínimo VSWR, después si se desea añadir monitores se puede reducir el rango a valores cercanos a la frecuencia de resonancia de la antena para reducir el tiempo de simulación

Se debe instalar una librería VISA con el mismo número de bits de la versión de Python, en la página oficial de National Instruments se puede encontrar la versión junto con el valor de bits de la aplicación, en este estudio se trabajó con 32 bits.

En la lista de parámetros globales del programa CST se puede registrar la altura del sustrato, ancho, largo, espesor y otras variables, incluso se puede ingresar fórmulas y descripciones, esto facilita el proceso de diseño y permite hacer cambios de ser necesarios sin crear nuevas estructuras.

Se debe revisar información acerca de mediciones con antenas para reducir el error producido por un alineamiento incorrecto, considerar la distancia entre elementos que permita cumplir la condición de campos lejanos y conocer las características de las antenas de prueba para tener una idea de la forma del patrón esperado y sus parámetros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hunter, J., Dale, D., Firing, E., & Droettboom, M. (2019). *Matplotlib Release 3.1.1*.
- Anritsu. (2009). Compact Handheld Cable & Antenna Analyzer. United States .
- Anritsu. (2012). SCPI Programming Manual. 2.1- 2.2. USA: Morgan Hill,.
- Anritsu. (2012). SCPI Programming Manual. USA: Morgan Hill.
- Balanis, C. (2005). *Antenna Theory Analysis and Design*. New Jersey: Wiley-Interscience.
- Brito, F., & López , C. (2006). Diseño y construcción de una cámara anecoica para la Facultad de Ingeniería Electrónica. 96-98.
- Cardama, Á., Jofre, L., Rius, J., & Romeu, J. (2002). *Antenas*. Edicions UPC,.
- Cst Microwave Studio. (2006). En *Cst Microwave Studio Tutorials* (págs. 107-108).
- Cst Microwave Studio. (2006). En *Cst Microwave Studio Tutorial* (págs. 109-112).
- Cst Microwave Studio. (2006). Cst Microwave Studio Tutorials.
- CST microwave studio. (2010). Workflow and solver overview. 17-26. USA.
- Houda , W., Khaoula , T., Mondher , C., Mongi , L., & Hamadi , G. (2016). Design of Rectangular Microstrip Patch Antenna. *International Conference on Advanced Technologies* , 799-803.
- Milligan , T. A. (2005). *Modern Antenna Design*. New Jersey: John Wiley and Sons.
- National Instruments. (2014). VISA. Obtenido de <http://www.ni.com/es-cr/shop/select/ni-visa>
- NumPy community. (2019). NumPy User Guide.
- Patil , V. P., & Kharade , A. R. (2012). Enhancement of Directivity of Rectangular MicroStrip Antenna. *International Journal of Engineering Research and Development*, 3, 79-84.
- SciPy community. (2013). SciPy Reference Guide.

Shivani , S., Neha, T., & Niti , S. (2014). Design and Analysis of Single Patch, 2X1 and 4X1.

International Conference for Convergence of Technology, 1-5.

Stutzman, W. L. (1998). Estimating Directivity and Gain of Antennas. *IEEE Antennas and*

Propagation, 40(4), 7-11.

The Python Standard Library. (13 de Junio de 2013). Recuperado el 2 de diciembre de 2019, de

<https://docs.python.org/3/library/csv.html>

Tomas , S., Matej , P., Tomas , Z., Jan, P., & Ludek , Z. (2014). The Workplace for Automatic

Measurement of Antennas Radiation Patterns. *Faculty of Electrical Engineering and*

Informatics, 1-2.

Tomas, S., Matej, P., Tomas, Z., Jan, P., & Ludek, Z. (2014). The Workplace for Automatic

Measurement of Antennas Radiation Patterns. *Faculty of Electrical Engineering and*

Informatics, 3-4.

ANEXOS