



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**DISEÑO DE UN MEDIDOR DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE ANTENAS
BASADOS EN RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE (SDR) UTILIZANDO USRP
2944R.**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Telecomunicaciones**

**AUTORES: JUAN FRANCISCO IZA GUALLASAMIN
KEVIN JOEL TOAPANTA VIZUETE**

TUTORA: JOHANNA BERENICE ARGUERO TELLO

Quito, Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Kevin Joel Toapanta Vizuite documento de identificación N° 1726508417 y Juan Francisco Iza Guallasamin con documento de identificación N° 1713846937; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 04 de marzo del año 2022

Atentamente,



.....
Juan Francisco Iza Guallasamin
1713846937



.....
Kevin Joel Toapanta Vizuite
1726508417

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Kevin Joel Toapanta Vizuite con documento de identificación No. 1726508417 y Juan Francisco Iza Guallasamin con documento de identificación No. 1713846937, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico “Diseño de un medidor de parámetros eléctricos de antenas basados en Radio Definida por Software (SDR) utilizando USRP 2944R”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros en Telecomunicaciones en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 04 de marzo del año 2022

Atentamente,



.....
Juan Francisco Iza Guallasamin

1713846937



.....
Kevin Joel Toapanta Vizuite

1726508417

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Johanna Berenice Arguero Tello con documento de identificación N° 1723989149, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN MEDIDOR DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE ANTENAS BASADOS EN RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE (SDR) UTILIZANDO USRP 2944R realizado por Kevin Joel Toapanta Vizuete con documento de identificación No. 1726508417 y Juan Francisco Iza Guallasamin con documento de identificación No. 1713846937, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 04 de marzo del año 2022

Atentamente,


.....
Ing. Johanna Berenice Arguero Tello, Msc
1723989149

DEDICATORIA

Yo, Kevin Joel Toapanta Vizuite con gran satisfacción y orgullo dedico en primer lugar a DIOS quien supo guiar mi camino, en segundo lugar, a mi madre, *Nelly Toapanta* que con su apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria han sabido apoyarme en momentos buenos y más en momentos malos, aconsejarme en toda decisión difícil de tomar, este no es solo un logro mío sino también de ella. A mis abuelitos, *Rosa Vizuite y Segundo Toapanta* que siempre estuvieron cuidándome desde muy pequeño y me han brindado amor incondicional sin pedir nada a cambio, espero contar con ellos muchos más años en mi vida para que me puedan ver y ayudar a escalar nuevos retos profesionales.

A mis primos que son como mis hermanos *Sahid, Nataly y Luis* los cuales me ayudaron a madurar muy joven, entender el significado de apoyo de un hermano dándome la mano en momentos que más lo necesitaba.

A mis tíos y sus esposas e hijos que me han apoyado en todo el transcurso de la carrera y se han preocupado por mí en todo momento.

Y 2 personas que hoy no están con nosotros físicamente, pero siempre estarán en mi corazón **tío Eduardo y tío Pacho** el cual me ayudó a escoger esta carrera y la cual estoy sacando adelante fuiste un padre para mí y un apoyo en mi carácter como un futuro profesional .A mis amigos de la Universidad *Cristhian M, Belén C, Jhostin L, Fidel C, Juan I*, a mis amigos del barrio **Eduardo A, Jordy O, Luis C, Danilo G, Axel O, David Y, Erick C, Michael H, Bryan H, Joel C, Rafael V, Pablo T, Ángel G** y como último, pero no menos importante a quien se han convertido en parte fundamental de este logro **Sofia Padilla** por el apoyo y ayuda brindada cuando más lo necesité

DEDICATORIA

Yo, Juan Francisco Iza Guallasamin dedico este trabajo de titulación en primer lugar a Dios que me ha sido el ser espiritual que ha caminado junto a mí en todo momento. También con mucho cariño y humildad dedicarles, a mis padres: **María Alegría Ayo y José Francisco Iza**, quienes siempre están pendiente de mi bienestar a pesar de la edad que tengo siguen apoyándome, brindándome su ayuda y dándome ánimo en los momentos más difíciles de mi vida y de la carrera universitaria.

A mis hijos: **Paulina Mishel, Juan David y Danna Paola** que, con sus muestras de afecto, cariño y ternura, me impulsaron a continuar y culminar con la carrera.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios, por permitirme culminar con un sueño que no lo pude culminar hace 20 años y hoy es una realidad.

Agradezco a mis padres con su apoyo incondicional, paciencia y guía, en cada instante de mi vida universitaria.

Agradezco a mis hijos por permitir tomar parte del tiempo que era de ustedes y dedicarles a mis estudios.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana y a todo el personal de educadores que estuvieron en el transcurrir de mi vida universitaria, fueron y son motores de inspiración en los nuevos conocimientos que sembraron en mi corazón y mi mente.

Juan Francisco Iza Guallasamin

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, por permitirme culminar un sueño que hoy es una realidad.

Agradezco a mi madre la cual fue padre y madre para mí, la que supo guiar mi camino y nunca rendirse para sacarme adelante.

Agradezco a mis abuelitos por permitir formar parte de su día a día y tenerme un platito de comida cada vez que llegaba a casa.

Agradezco a Sofia Padilla quien con palabras de aliento y mucha comprensión y fortaleza ayudo a que no me rindiera y de algún brazo a torcer

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana por abrirme las puertas hacia una educación del futuro, a los excelentes docentes los cuales más que maestros fueron amigos y compañeros en esta ardua carrera.

Kevin Joel Toapanta Vizúete

INDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	i
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	ii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
AGRADECIMIENTO	vii
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
SIGLAS Y ABREVIATURAS	xiv
CAPÍTULO I	15
1.1 INTRODUCCIÓN	15
1.2 Problema	16
1.3 Delimitación	17
1.3.1 Delimitación temporal	17
1.3.2 Delimitación espacial	17
1.3.3 Delimitación social	17
1.4 Impacto	17
1.5 Justificación	17
1.6 Hipótesis	18
1.7 Metodología	18
1.8 Objetivos	19
1.8.1 Objetivo General	19
1.8.2 Objetivos Específicos	19
CAPÍTULO II	20
MARCO TEÓRICO	20
2.1 Antenas	20
2.1.1 Clasificación de las antenas	20
2.1.1.1 Antenas Dipolo	20
2.1.1.2 Antenas Yagi	22
2.1.2 Parámetros eléctricos de las Antenas	22
2.1.2.1 Patrón de radiación	23
2.1.2.2 Ganancia	24
2.1.2.3 Factor de calidad	25
2.1.2.4 Ancho de banda (BW- Bandwidth)	25

2.1.2.5 Directividad.....	25
2.1.2.6 Eficiencia de radiación.....	26
2.1.2.7 Polarización.....	27
2.2 SDR Radio definido por software (Software Defined Radio).....	28
2.2.1 Estructura SDR.....	29
2.2.2 Tipos de SDR.....	29
2.3 USRP 2944R.....	30
2.3.1 Características técnicas.....	30
2.3.2 Funcionamiento de la USRP-2944R.....	32
2.4 LabVIEW.....	34
2.5 Ansys Electronic Desktop.....	35
2.5.1 HFSS (High Frequency Structure System).....	36
CAPÍTULO III.....	37
DISEÑO DEL MODULO DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LAS ANTENAS.....	37
3.1 DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENAS.....	37
3.2 Diseño de la antena dipolo y Yagi de 3 elementos.....	37
3.2.1 Diseño de la antena dipolo.....	38
3.2.2 Diseño de la Antena Yagi 3 elementos.....	42
3.3 Conexión USRP 2944R y Labview NXG.....	46
3.3.1 Bloque de Transmisión.....	48
3.3.2 Bloque de Recepción.....	49
3.3.3 Controlador del posicionador de la antena de transmisión.....	56
3.3.4 Lógica de la codificación en Arduino.....	58
CAPÍTULO IV.....	62
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	62
4.1 Resultados de los parámetros eléctricos de las antenas simuladas.....	64
4.1.1 Antena dipolo.....	64
4.1.2 Antena Yagi.....	68
CONCLUSIONES.....	73
RECOMENDACIONES.....	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Antena dipolo Diseño</i>	21
<i>Figura 2.2 Tipos de antenas dipolo</i>	21
<i>Figura 2.3 Antena Yagi</i>	22
<i>Figura 2.4 Patrón de radiación</i>	23
<i>Figura 2.5 Lóbulos de un patrón de radiación</i>	24
<i>Figura 2.6 Tipos de polarización</i>	28
<i>Figura 2.7 Secciones de una SDR</i>	29
<i>Figura 2.8 Equipo USRP 2944R</i>	30
<i>Figura 2.9 Circuito esquemático de la USRP2944</i>	32
<i>Figura 2.10 Panel frontal de LabVIEW NXG</i>	35
<i>Figura 3.1 Antenas del proyecto</i>	37
<i>Figura 3.2 Antena dipolo de onda completa</i>	38
<i>Figura 3.3 Parámetros S de la antena dipolo</i>	41
<i>Figura 3.4 Parámetros de la antena dipolo</i>	41
<i>Figura 3.5 Antena Yagi</i>	42
<i>Figura 3.6 Parámetros S de la antena Yagi</i>	45
<i>Figura 3.7 Parámetro VSWR de la antena Yagi</i>	46
<i>Figura 3.8 Interconexión de los USRP con las computadoras</i>	46
<i>Figura 3.9 Esquema general del proyecto</i>	47
<i>Figura 3.10 Conexión del USRP 2944R con la PC</i>	48
<i>Figura 3.11 Programación de señal sinusoidal</i>	49
<i>Figura 3.12 Parte del programa para interacción con USRP</i>	50
<i>Figura 3.13 Bloque de propiedades</i>	50
<i>Figura 3.14 conexión con Arduino para generar los 200 pasos</i>	51
<i>Figura 3.15 Generador de señal con un Power Spectrum</i>	52
<i>Figura 3.16 Bloque de coordenadas polares y rectangulares</i>	53
<i>Figura 3.17 Programación en C++</i>	53
<i>Figura 3.18 Programación en C++</i>	54
<i>Figura 3.19 Configuración secuencial</i>	54
<i>Figura 3.20 diagrama de bloques programación en LabVIEW NXG</i>	55
<i>Figura 3.21 Control de posición en bloques</i>	56
<i>Figura 3.22 Control de posición</i>	57
<i>Figura 3.23 Conexiones del sistema de posición</i>	57
<i>Figura 3.24 Lógica de Arduino</i>	58
<i>Figura 3.25 Lógica en LabVIEW (Transmisor)</i>	60

<i>Figura 3.26 Lógica en LabVIEW (Receptor)</i>	61
<i>Figura 3.27 Lógica en LabVIEW (Receptor)</i>	62
<i>Figura 4.1 Formato de la plantilla del transmisor</i>	63
<i>Figura 4.2 Formato de la plantilla del receptor</i>	64
<i>Figura 4.3 Patrón de radiación en 3D</i>	65
<i>Figura 4.4 Diagrama de radiación en el plano vertical</i>	65
<i>Figura 4.5 Datos a 50 cm de distancia</i>	66
<i>Figura 4.6 Datos a 30 cm de distancia.</i>	67
<i>Figura 4.7 Patrón de radiación en 3D</i>	69
<i>Figura 4.8 Diagrama de radiación en el plano vertical</i>	69
<i>Figura 4.9 Datos a 30 cm de distancia</i>	70
<i>Figura 4.10 Datos a 50 cm de distancia.</i>	70

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Características técnicas del transmisor.....	31
Tabla 2.2 Características técnicas del receptor	31
Tabla 3.1 Valores de las variables.....	38
Tabla 3.2 Valores de las variables de la antena dipolo	40
Tabla 3.3 Valores de las variables de la antena Yagui.....	44
Tabla 4.1 Valores de las simulaciones de la antena dipolo	67
Tabla 4.2 Valores de las simulaciones de la antena Yagi.....	71

RESUMEN

En la actualidad la tecnología de SDR está en constante evolución siendo una plataforma para un sinnúmero de aplicaciones especialmente en el área de las telecomunicaciones. Los sistemas de comunicaciones físicos de las diferentes tecnologías de comunicaciones se han visto reducidas a sencillos módulos que son programables por software, como: GNU radio, Labview Communication; ya que no se limitan a un solo esquema de modulación, ancho de banda, o frecuencias a la cual van a operar. Esto implica la reducción de costos al tener un equipo que se pueda actualizar por software en vez de tener varios equipos de diferentes tecnologías para un determinado uso (Gonzalez, 2019).

El presente trabajo se describe el diseño e implementación de un módulo medidor de parámetros eléctricos de las antenas, empleado tecnología SDR mediante los USRP 2944R de National Instrument. Los mismos que fueron programados en Labview Communication con el objetivo de evaluar los parámetros de rendimiento de diferentes antenas en la frecuencia de 5GHz como: Patrón de Radiación, Ancho de Haz, Directividad Ancho de Banda, Impedancia Característica, Ganancia, Polarización, Eficiencia de Radiación, VSWR entre otros.

El prototipo trabaja para la banda de 5GHz, está formado por un equipo transmisor USRP 2499R que incorpora una base para fijación para las antenas Yagi y dipolo y un receptor USRP 2944R constituido una antena tipo parche montada sobre una estructura giratoria controlada a través de Arduino para el control de motor a pasos. Con la finalidad de recibir los niveles de radiación que emite la antena transmisora para ser procesados y esquematizar los parámetros de las antenas de estudio.

Las antenas tipo dipolo y Yagui fueron diseñadas en el software ANSYS a una frecuencia de 5GHz, para determinar características como: diagramas de radiación, ganancia, potencia, etc., los mismos que son comparados con el módulo SDR propuesto.

Palabras claves: dipolo, patrón de radiación, parámetros de dispersión, USRP, VSWR, Yagi.

ABSTRACT

Currently, SDR technology is constantly evolving and is a platform for countless applications, especially in the area of telecommunications. The physical communications systems of the different communications technologies have been reduced to simple modules that are programmable by software, such as GNU radio, Labview Communication; since they are not limited to a single modulation scheme, bandwidth, or frequencies at which they will operate. This implies cost reduction by having an equipment that can be updated by software instead of having several equipment of different technologies for a certain use (Gonzalez, 2019).

The present work describes the design and implementation of a module to measure the electrical parameters of the antennas, using SDR technology by means of the USRP 2944R of National Instrument. The same that were programmed in Labview Communication in order to evaluate the performance parameters of different antennas in the 5GHz frequency such as: Radiation Pattern, Beamwidth, Bandwidth Directivity, Characteristic Impedance, Gain, Polarization, Radiation Efficiency, VSWR among others.

The prototype works for the 5GHz band, consists of a USRP 2499R transmitter equipment that incorporates a base for fixing the Yagui and dipole antennas and a USRP 2944R receiver consisting of a patch antenna mounted on a rotating structure controlled through Arduino for stepper motor control. To capture the levels of radiation signals emitted by the transmitting antenna which are necessary to scheme the parameters of the study antennas.

The dipole and Yagui antennas were designed in ANSYS software at a frequency of 5GHz, to determine characteristics, radiation patterns, gain, power, etc., which are compared with the proposed SDR module.

Keywords: dipole, radiation pattern, scattering parameters, USRP, VSWR, Yagi.

SIGLAS Y ABREVIATURAS

AM: Amplitud modulada.

FDMA: Frequency Division Multiple Access.

FM: Frecuencia modulada.

FSK: Frequency Shift Keying.

LabVIEW: Entorno de desarrollo para diseñar sistemas.

OFDM: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing.

PSK: Modulation Phase Shift Keying.

QAM: Quadrature Amplitude Modulation.

SDR: Software Defined Radio, Radio Definido por Software

TDMA: Time-Division Multiple Access.

USRP: Universal Software Radio Periphetal, Periférico Universal de Radio Software

VSWR: Voltage Standing Wave Ratio.

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

La 4ta era industrial en la cual se están desarrollando las telecomunicaciones, permiten que las comunicaciones evolucionen para prestar un mejor servicio a los usuarios. Para lograr este objetivo la industria ha incorporado en el mercado equipos SDR que son utilizados en las diferentes áreas de telecomunicaciones (GPS, radiocomunicaciones, Microonda, Radares, Sistemas Móvil Avanzado). Donde el proceso de la señal a transmitirse se lo efectúa a nivel de software sobre las etapas de los SDR que pueden ser reconfiguradas. En estos equipos no existen una limitación por el uso de su tipo de modulación, por las frecuencias a las que van a operar y al ancho de banda que se va a trabajar (Gonzalez, 2019).

Sin duda los SDR son más flexibles a la adaptación de nuevos protocolos de comunicación inalámbrica, soportan la interoperabilidad de redes y la convergencia de la capa física, pueden adaptarse a futuras tecnologías, su implementación reduce los costos en hardware y desarrollo (Rami & Behnam, 2018) (Alexander, 2006). Facilitando los procesos de I+D+I (Investigación, desarrollo e innovación) de la industria y los procesos de enseñanza de las comunicaciones inalámbricas en las universidades, donde se pueden desarrollar competencias en el ámbito de las telecomunicaciones (Gonzalez, 2019).

Además, la antena se ha convertido en un elemento que ayuda al mejoramiento de la calidad de la señal y en la actualidad la combinación o arreglo de antenas ha permitido emerger a tecnologías como: massive MIMO, beamforming; que son necesarias para que 5G ingrese al mercado de las telecomunicaciones y aporte a la industria con sus beneficios en la comunicación inalámbrica.

Por lo tanto, se propone el diseño de un módulo de parámetros eléctricos de antenas que haga uso de los USRP 2944R, que permita la obtención del patrón de radiación de una antena Yagi y una Dipolo, para determinar si su construcción y funcionamiento están dentro de un rango de funcionamiento óptimo.

En el capítulo I se detalla el problema de investigación, el planteamiento del problema,

los objetivos, la justificación que motivaron a que se realice este proyecto.

En el capítulo II se describe los aspectos teóricos sobre los parámetros eléctricos de las características de funcionamiento de: USRP, SDR simuladores ANSYS y LabVIEW NXG.

El capítulo III contiene el diseño y simulación de las antenas Dipolo y Yagi en el software de simulación ANSYS HFSS. Además de la estructura de programación en LabVIEW NXG para establecer la comunicación con el USRP 2944 y el Arduino y por último la obtención de los parámetros eléctricos de las antenas de estudio.

En el capítulo IV se realiza la prueba de funcionamiento y el análisis de los datos obtenidos y por último se presentan las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

1.2 Problema

Hoy en día, existen soluciones comerciales de alto costo para evaluar y/o analizar los parámetros eléctricos de una antena como: el nivel de potencia, ganancia, resistencia, patrón de radiación, etc. En los laboratorios de la carrera de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana no cuenta con suficientes módulos de trabajo para analizar ciertos parámetros de antenas, debido a que un factor predominante es el alto costo de los equipos de pruebas de las antenas.

Para lo cual se desarrollan soluciones basadas en SDR (Software-Defined-Radio) empleando el USRP 2944 ya que su implementación es de bajo coste en comparación con los simuladores, emuladores y equipos de prueba comerciales que el mercado ofrece. Es una solución que integra amplias aplicaciones como: la creación de radios económicos, flexibles y energéticamente económicos, tecnologías IoT, radio cognitivo, analizador de espectro, entre otros desarrollos de la industria.

Y por último permitirá crear un banco de pruebas para la medición de los parámetros eléctricos de antenas dentro de un ambiente de laboratorio.

1.3 Delimitación

1.3.1 Delimitación temporal

El proyecto de titulación involucra, la recopilación de bibliografía, comprobación de operatividad de los URSP, diseño, simulación y elaboración de las antenas, la obtención de los parámetros y análisis y escritura del proyecto. El cual se desarrollará en 6 meses, correspondientes al periodo 59.

1.3.2 Delimitación espacial

El proyecto será implementado en el laboratorio de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana de la sede Quito. Ubicada en el sector de Chillogallo, Av. Rumichaca Ñan y Av. Morán Valverde. Donde se instalará el prototipo para medir los parámetros eléctricos de las antenas realizando las conexiones físicas de los equipos USRP 2944R con los computadores y la estructura del sistema de transmisión en la banda de 5 GHz.

1.3.3 Delimitación social

El proyecto beneficia a la Universidad Politécnica Salesiana, los docentes y estudiantes de la carrera de Telecomunicaciones y carrera afines, porque motivará al uso de SDR en nuevos proyectos que se enfoquen a las comunicaciones inalámbricas.

1.4 Impacto.

El prototipo se utilizará en los laboratorios de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana de la sede Quito Campus Sur. Facilitará en las prácticas de antenas, propagación y asignaturas afines para comprender a una menor escala un sistema de transmisión inalámbrica enfocadas en el uso de tecnología SDR.

1.5 Justificación.

Los USRPs, es una tecnología de comunicaciones cuyo hardware es reprogramable y reconfigurable para operar con diferentes formas de onda y protocolos. La eficiencia que

provee es una solución económica para sistemas ópticos, multiportadora, multibanda y multifuncional, lo que permite crear transceiver baratos bajando los costos de producción, en la actualidad han tomado un rol protagonista debido a las nuevas formas de onda para 5G, técnicas MIMO y reuso del espectro.

El presente proyecto está enfocado en desarrollar un banco de pruebas para la medición de parámetros eléctricos de la antena basado en SDR empleando el USRP 2944 con la finalidad de integrar una solución de bajo coste e incrementar el número de módulos de trabajo en el laboratorio de Telecomunicaciones. Permitiendo a los estudiantes interactuar con gran facilidad y sin limitaciones de equipos al realizar mediciones y análisis de los diferentes parámetros de las antenas y comparar con valores normalizados, mejorando así el proceso de enseñanza-aprendizaje.

1.6 Hipótesis.

Los equipos de radio definido por software USRP 2944 que se dispone en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad Politécnica Salesiana con sede en Quito, permitirá el diseño e implementación de un sistema de medición de parámetros eléctricos de antenas con un bajo costo.

1.7 Metodología

En este proyecto se utilizará los USRP 2944 de TEXAS INSTRUMENT para realizar un prototipo de medición de parámetros eléctricos de las antenas, con el siguiente proceso:

1.- Se partirá del estado del arte para la recopilación de la información en cuanto a los parámetros básicos de las antenas, diseño, materiales, procesos de construcción. Además, de la configuración, modos de trabajo, tipos de modulación de los USRP 2944.

2.- Se diseñará los algoritmos para controlar las funcionalidades del SDR USRP 2944R para los módulos de transmisión y recepción.

3.- Se elaborará el diseño y modelamiento en el software ANSYS-HFSS y la construcción de antena de prueba en la frecuencia de 5GHz.

4.- Se desarrollará la programación del USRP 2944 mediante el software de LabVIEW NXG versión 4.0 para medir los parámetros de las antenas.

5.- Se analizará los resultados obtenidos del proceso de toma de medidas del prototipo desarrollado.

1.8 Objetivos

1.8.1 Objetivo General

Implementar un prototipo de medición de parámetros eléctricos de antenas utilizando radio definido por software para analizar el nivel de potencia, ganancia, directividad, patrón de radiación de varias antenas, empleando los USRP 2944R.

1.8.2 Objetivos Específicos

- Determinar el estado del arte de los parámetros fundamentales de las antenas para la obtención de indicadores de configuración en el desarrollo de los algoritmos.
- Implementar algoritmos en los USRP 2944R para determinar el funcionamiento de los parámetros eléctricos de las antenas.
- Construir antenas de prueba en la banda de frecuencia de 100 MHz a 6 GHz para incorporar al banco de pruebas de medición de los parámetros de las antenas.
- Evaluar los resultados experimentales obtenidos de la medición de los parámetros de las antenas de prueba para validar el prototipo mediante el software HFSS.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antenas

Considerado un elemento pasivo, recíproco para transmitir y recibir ondas electromagnéticas. Este elemento se encuentra en la parte exterior y final de un sistema de comunicaciones. La antena en un equipo transmisor permitiendo que la señal que se desea enviar se transforme en energía electromagnética que va irradiarse en el espacio en forma de campos eléctricos y magnéticos. Mientras, una antena ubicada en el receptor capta toda la energía electromagnética que está en el espacio y la transforma en energía eléctrica necesaria para que los circuitos de RF entren en funcionamiento (Toledo L. W., 2019).

2.1.1 Clasificación de las antenas

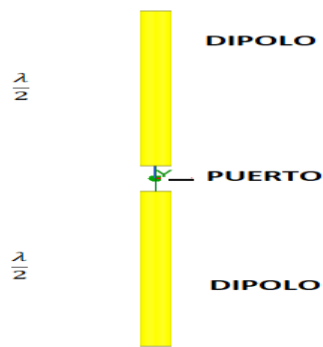
Se clasifican dependiendo de su utilización y su configuración, así se tiene: dipolo, dipolo doblado, látigo, Yagi, parabólicas, apertura, Microstrip, etc. En este capítulo se hace referencia a las antenas que están en análisis, diseño y construcción, que son las antenas: dipolo y Yagi.

2.1.1.1 Antenas Dipolo

Las antenas dipolo son las más sencillas que se pueden fabricar, versátiles y de un amplio uso por su bajo costo. Heinrich Hertz inventó en el siglo XIX para poner en funcionamiento un experimento, donde la antena participaba en la transferencia de energía electromagnética que se irradia al espacio exterior.

Consta de dos elementos metálicos lineales de igual longitud separados a una distancia para ser alimentados inversamente por una línea de transmisión como se observa en la figura 2.1. Donde se muestra el modelo de una antena dipolo de onda completa, sus dipolos tienen una longitud de λ medios.

Figura 2.1 Antena dipolo Diseño



Antena dipolo de onda completa con sus componentes. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

El material que se utiliza para los elementos metálicos es: cobre, hierro, aluminio, donde el cobre es el más utilizado por sus características de conductividad eléctrica y térmica.

Tiene un patrón de radiación omnidireccional, permitiendo que la distribución de la energía electromagnética se distribuye en los 360 grados con igual intensidad.

Las dimensiones de los brazos de una antena dipolo está en función de la longitud de onda de trabajo y se tiene: antenas dipolo de onda completa, media onda, cuarto de onda. En la figura 2.2 se muestra los diferentes tipos de antenas dipolo dependiendo de longitud de onda donde se aprecia la distribución de la corriente, patrón de radiación impedancia características (Morso, 2019, pp. 3-9).

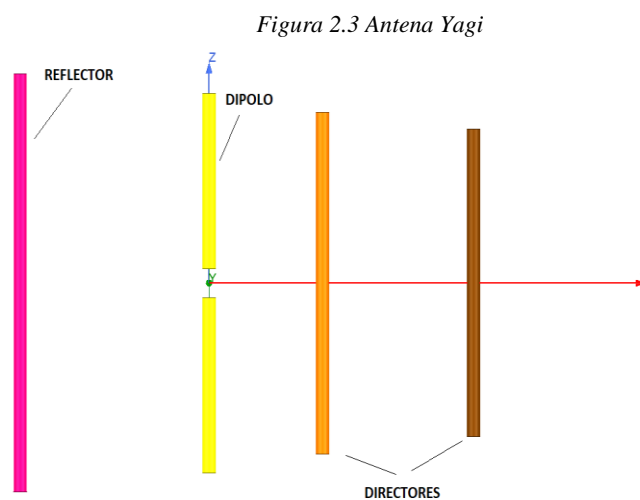
Figura 2.2 Tipos de antenas dipolo

Longitud	Características	Corriente	Diagrama de radiación
$l = \lambda/2$	$R_r = 73 \Omega$		
	$D = 1,64$		
	$\Delta\theta_{-3dB} = 78^\circ$		
$l = \lambda$	$R_r = \infty \Omega$		
	$D = 2,41$		
	$\Delta\theta_{-3dB} = 48^\circ$		
$l = 3\lambda/2$	$R_r = 99,5 \Omega$		
	$D = 2,17$		
	$\Delta\theta_{-3dB} = 33^\circ$		
$l = 2\lambda$	$R_r = \infty \Omega$		
	$D = 2,52$		
	$\Delta\theta_{-3dB} = 27^\circ$		

Antenas dipolo que están en función de la longitud de onda de la frecuencia y las características de radiación. Fuentes: (Morso, 2019)

2.1.1.2 Antenas Yagi

Consta de varios elementos, que son: un reflector que no permite que la energía sea irradiada para la parte posterior de la antena; un elemento radiante que es el encargado de la transformación de la energía eléctrica a energía electromagnética y los directores que ayudan a que la antena sea más direccional en una sola dirección, como se observa en la figura 2.3. Este tipo de antenas se utilizan ampliamente para recibir señales de televisión y en comunicaciones punto a punto. La antena Yagi tiene un elemento activo que emite el campo eléctrico y un elemento pasivo refleja las señales (Tomasi, 2003).



Diseño de una antena dipolo de 3 elementos en el simulador Ansys HFSS. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

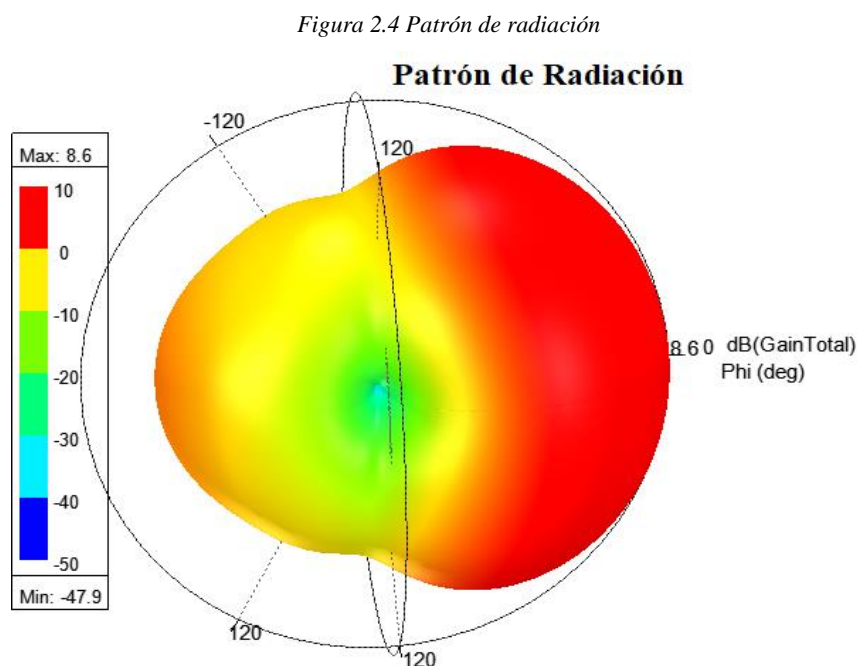
Es una antena direccional, su energía electromagnética se distribuye en una determinada dirección a la que apunta sus directores. Presenta una mejor ganancia que la antena dipolo, la misma que depende de la cantidad de elementos directores que tenga, mientras más directores es más direccional y con mejor ganancia.

2.1.2 Parámetros eléctricos de las Antenas

Todas las antenas sin exclusión exhiben características fundamentales dentro de su comportamiento en un método de comunicación, ya sea esta para transmisión o para recepción. Estos parámetros de las antenas se deben discurrir en el diseño como: el patrón de radiación, ganancia, eficiencia, directividad, VSWR, parámetros S.

2.1.2.1 Patrón de radiación

También llamado Diagrama de Radiación, representa gráficamente en coordenadas tridimensionales o coordenadas rectangulares la distribución de la radiación de los campos eléctrico-magnético en función de la posición de la antena. Para su análisis se realiza en el campo lejano que es la región de Fraunhofer (Asenjo, 2015, pp. 19 - 20). En la figura 2.4 se presenta el patrón de radiación de una antena Yagi en 3D, donde la potencia máxima que emite la antena está limitada por el color rojo en 8.6 [dB] y en su alrededor se observa la potencia que se disipa con menor intensidad.



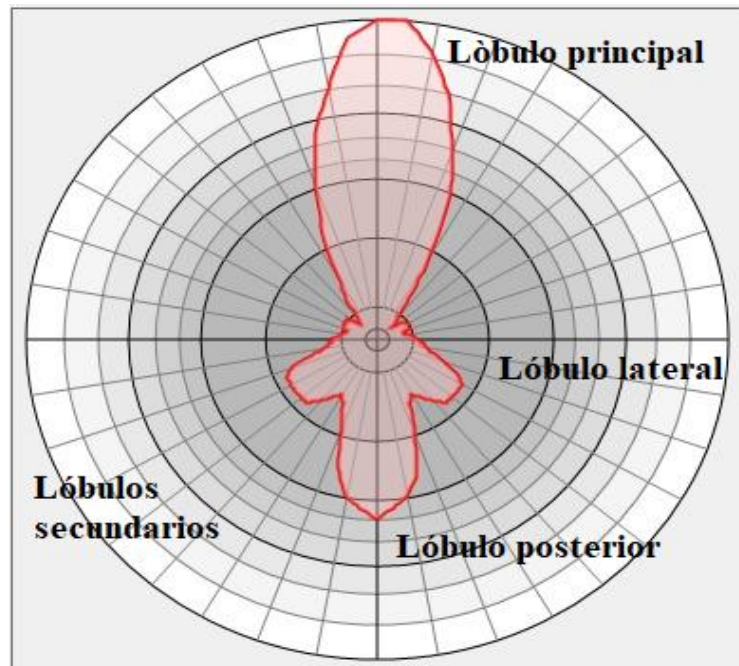
Distribución de la energía de una antena Yagi en coordenadas polares, su gráfica está en función del ángulo de azimut y de elevación. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

Entre los patrones de radiación, hay patrones direccionales ya que dirigen la potencia radiada en una dirección o sector específico como se observa en la figura 2.5 y se distingue los siguientes elementos:

- Lóbulo principal, representado la región que contiene la máxima radiación de energía.
- Lóbulos secundarios, representado por las regiones a excepción del lóbulo principal donde hay menor energía de radiación comparada con el lóbulo principal.

- Lóbulos laterales, representado por las regiones que están junto al lóbulo principal, tiene un lóbulo lateral izquierdo y un lóbulo lateral derecho.
 - Lóbulo posterior, es la región que está en la parte posterior al lóbulo principal.
- (Arroyo, 2017, págs. 74 - 75)

Figura 2.5 Lóbulos de un patrón de radiación



Lóbulos que generan en un patrón de radiación de una antena una Yagi con dirección 90 grados. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

2.1.2.2 Ganancia

Establece la relación entre la intensidad de potencia entregada por la antena hacia el espacio en una dirección determinada y la potencia radiada de la antena (Arroyo, 2017, p. 72). La fórmula de la ganancia se describe en la ecuación (2.1)

$$G_0 = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} = \eta_{rad} * D_0 \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Donde:

G_0 Ganancia de la antena.
 U_{max} Intensidad de radiación máxima en la dirección de máxima radiación

P_{rad}	Potencia de radiación de la antena.
D_0	Directividad.
η_{rad}	Eficiencia de radiación.

2.1.2.3 Factor de calidad

El factor de calidad es un parámetro que relaciona la impedancia característica y la resistencia a la radiación. Determina la fluctuación de frecuencia permitida con respecto a la frecuencia de funcionamiento. A continuación, en la ecuación 2.2 se presenta su fórmula (Ladino & Parra, 2018, pág. 31).

$$Q = \frac{F_c}{B_w} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Donde:

F_e	Frecuencia central.
B_w	Ancho de Banda

2.1.2.4 Ancho de banda (BW- Bandwidth)

Es el rango de frecuencias en las que las características de funcionamiento de una antena son óptimas para el trabajo que fueron diseñadas. Para un diseño se obtiene de la relación de los márgenes de frecuencias mínima y máxima, que se desee sintonizar y la frecuencia central en la que va a trabajar la antena (Ayala, 2015, p. 12).

2.1.2.5 Directividad

La directividad de una antena es la relación entre la intensidad de radiación en una dirección dada y la potencia que radiaría una antena isotrópica en la misma dirección. También se puede definir como la relación entre la fuerza radiada de una antena o varias antenas en dirección particular y la fuerza media de todas las antenas en esa dirección la intensidad media de la radiación es igual a la potencia radiada total de la antena dividida por 4π (Ayala, 2015, pág. 12).

De acuerdo con la definición se tiene la siguiente fórmula como se aprecia en la ecuación (2.3).

$$D_o = \frac{4\pi U_{max}}{P_r} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Donde,

D_o	Dirección de máxima radiación
U_{max}	Intensidad de radiación en una dirección
P_r	Potencia total radiada

También el cálculo de la directividad se tiene la siguiente formula en la ecuación (2.4).

$$D = \frac{G_o}{\eta_{rad}} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Donde,

η_{rad}	Eficiencia de radiación de la antena
G_o	Ganancia de la antena
D	Directividad de la antena

2.1.2.6 Eficiencia de radiación.

Es una relación de la potencia radiada por la antena hacia el espacio y la potencia entregada a la antena en los terminales. En el proceso de transformación de energía eléctrica a energía electromagnética se presentan pérdidas debido a la temperatura o a procesos de desacoplo de la antena y otros factores, que no permiten que toda la potencia que ingresa a la antena sea radiada en forma de energía electromagnética. Por lo tanto, la eficiencia determina las pérdidas que hay en el sistema de antenas (Arroyo, 2017, p. 71) en la ecuación (2.5) se describe el cálculo de eficiencia de la antena.

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{entrada}} = \frac{Prad}{Prad+PL} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Donde,

η_{rad}	Eficiencia de radiación de la antena
P_{rad}	Potencia de radiación de la antena
$P_{entrada}$	Potencia de entrada de la antena
P_L	Potencia de pérdidas

También se puede calcular la Eficiencia de Radiación con la ecuación 2.6 (Banalís, 2016).

$$\eta_{rad} = \frac{G}{D} \quad \text{Ec. (2.6)}$$

Donde,

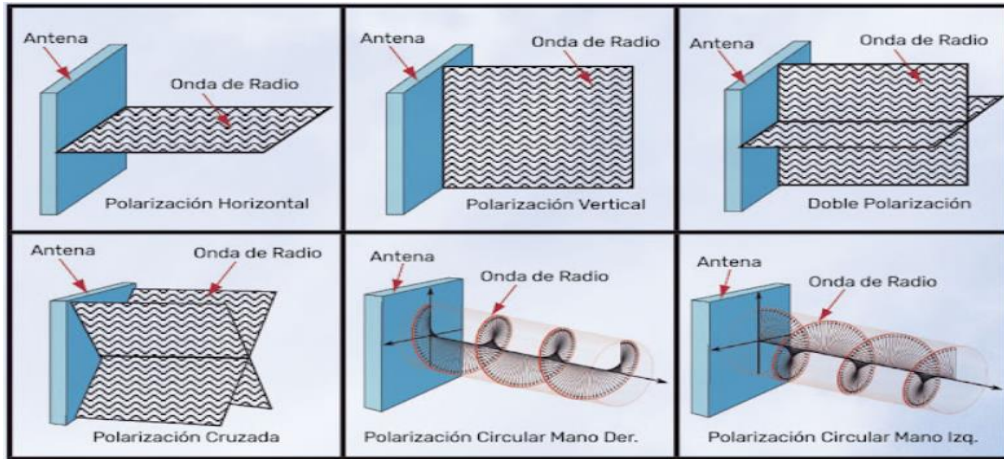
η_{rad}	Eficiencia de radiación de la antena
D	Directividad de la antena
G	Ganancia de la antena

2.1.2.7 Polarización.

Es la figura geométrica representada por el vector del campo eléctrico en función del tiempo en un punto fijo. En la figura 2.6 se observa las polarizaciones de la antena como

- Polarización circular mano izquierda y mano derecha.
- Polarización lineal, se clasifican en horizontal y vertical.
- Polarización elíptica.
- Doble polarización.
- Polarización cruzada (Chimborazo, 2017, pág. 11).

Figura 2.6 Tipos de polarización



Tipos de polarizaciones que una antena puede propagar en el espacio. Fuente: (Fernando, 2019)

2.2 SDR Radio definido por software (Software Defined Radio)

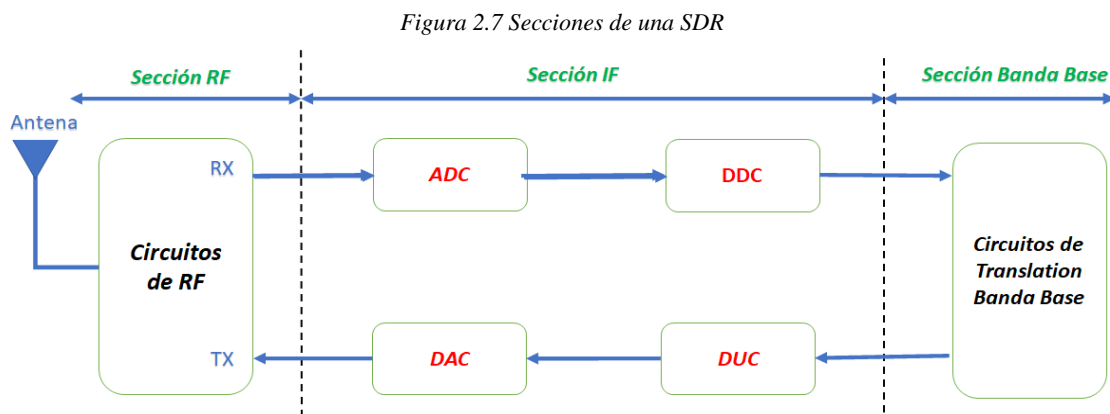
Hay muchas definiciones en el ámbito de comunicaciones sobre SDR, una de las que tiene una visión más amplia la interpreta como “Una radio en la que algunas o todas las funciones de la capa física están definidas por software “ (Wireless, 2022).

SDR es una de las tecnologías que se puede aplicar o interactuar en varios campos de ingeniería e industria inalámbrica esto quiere decir que los módulos elementales de radio son implementados por software (García, 2011, pág. 5). Los módulos físicos que generalmente eran reemplazados por actualización de los sistemas de comunicación, en la actualidad gracias a los SDR´s son reemplazados por programaciones de bloques.

Los beneficios de utilizar SDR es su interoperabilidad para trabajar en las diferentes generaciones de las telecomunicaciones (1G, 2G, 3G, 4G y en 5G), sin restricciones ya que: es escalable, posibilidad de actualizarse de acuerdo a los nuevos estándares de la industria o de las instituciones de regulación de cada país. Es robusto, esto permite que la información que necesita transmitirse llegue a su destino sin pérdida de los datos, por lo que su canal es confiable. Es eficiente porque reutiliza en sus aplicaciones el espectro radioeléctrico; y es relativamente económico para uso de estaciones fijas o de laboratorio, donde la industria o la institución educativa hagan investigación, desarrollo e implementación (Segura Claudia, 2016, pp. 17-18).

2.2.1 Estructura SDR.

En la figura 2.7 se observa los 3 bloques importantes de la estructura SDR empezando por la sección de *RF* (Radio Frecuencia) encargada de transmitir y/o recibir las señales, adecuándolas en un solo nivel de señal para que se pueda usar en la siguiente sección. La sección de *IF* (Frecuencia Intermedia) baja de frecuencia de trabajo a valores que opera la tarjeta, aquí se hace las conversiones de análogo-digital y viceversa. Y finalmente la sección de *Banda Base* donde se realiza el procesamiento de la señal en banda base como: la ecualización, implementación de protocolos y otras incrustaciones de datos de acuerdo con el modo de operación del canal de transmisión/recepción (Alvaro, 2021, p. 18).



Tres secciones básicas que componen una SDR. Fuente: (Alexander, 2006).

2.2.2 Tipos de SDR

Los tipos de SDR se clasifican en cinco tipos de acuerdo con la configuración y la aplicación que son:

Tipo I: Es la SDR más sencilla ya que se implementa con la tarjeta de audio de la PC.

Tipo II: Para la implementación se requiere un dispositivo adicional para captar las señales de la antena y luego poder procesar la información.

Tipo III: Se implementa un dispositivo adicional para la captura de la señal en IF y luego se procesa la información.

Tipo IV: Utiliza receptores directamente desde la fuente y se procesa desde ahí por todo el canal de comunicación.

Tipo V: Son SDR's que están implementados en software y su utilización es online (Merchán, 2016, pág. 34 y 35).

2.3 USRP 2944R

Según National Instruments, USRP (Universal Software Radio Peripheral) es una plataforma de PC de bajo costo que se usa típicamente para construir sistemas de comunicación inalámbrica a partir del software LabVIEW. En la figura 2.8 se muestra el modelo USRP2944R que es fabricado por National Instrument.

Figura 2.8 Equipo USRP 2944R



Equipo USRP 2944R utilizado para el proyecto. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

Las plataformas USRP proporcionan una amplia gama de aplicaciones desde el área educativa hasta el desarrollo investigativo de las telecomunicaciones. Equipada con soluciones educativas de vanguardia. La combinación de hardware y software ofrece flexibilidad y funcionalidad y proporciona una plataforma de creación rápida de prototipos para el diseño, grabación y reproducción de capas físicas, inteligencia de señales, verificación de algoritmos y más beneficios al desarrollador (Manobanda, 2015, pág. 53 a 59).

2.3.1 Características técnicas

En las tablas 2.1 y 2.2 se detalla las características del USRP2944R eléctricas con las cuales funciona y que son consideradas al momento de diseñar un proyecto, para que no sobrepase valores nominales de potencia que afecten a la parte interna del mismo.

Transmisor:

Tabla 2.1 Características técnicas del transmisor

<i>Característica</i>	<i>Valores</i>
Número de canales	2
Rango de frecuencia	10 MHz a 6GHz
Pasos de frecuencia	menor a 1 KHz
Potencia de Salida (Pout)	
10 MHz a 4 GHz	50mW a 100mW
4 GHz a 6 GHz	5mW a 50mW
Rango de ganancia	0 dB a 3.1 dB
Pasos de ganancia	0.5 dB
Exactitud de la frecuencia	2.5 ppm
Ancho de banda máximo en tiempo real.	160 MHz
Máxima frecuencia de muestreo I/Q	20 MS/s
Resolución del convertor digital a análogo DAC	16 bit

Detalle de las características eléctricas de la sección del transmisor USRP2944R. Fuente: (NI, www.ni.com, 2022)

Receptor:

Tabla 2.2 Características técnicas del receptor

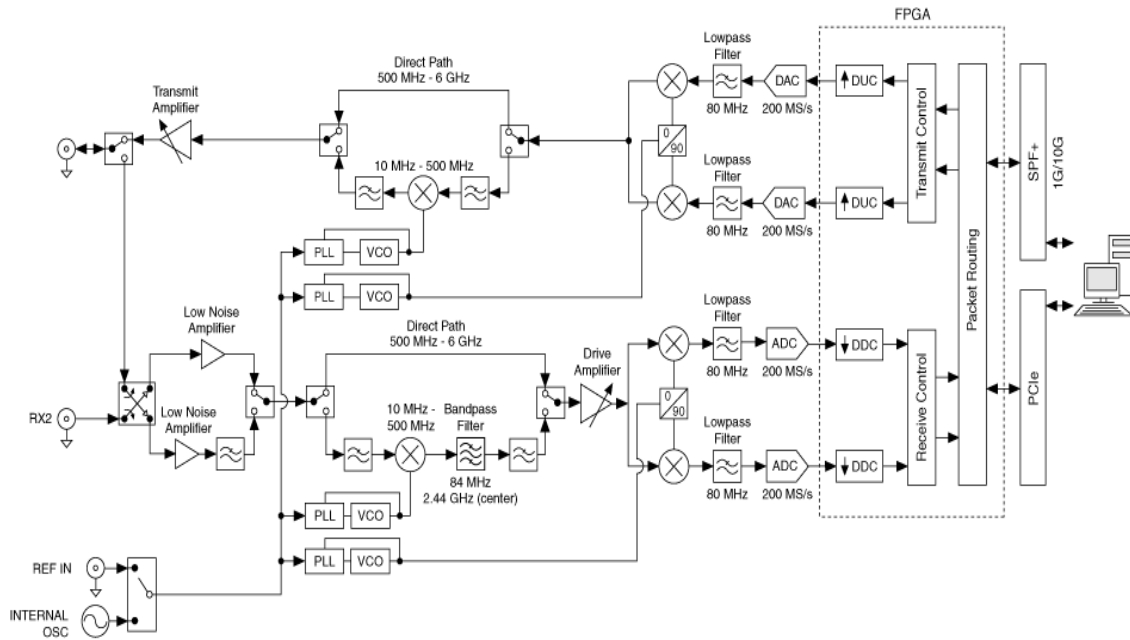
<i>Característica</i>	<i>Valores</i>
Número de canales	2
Rango de frecuencia	10 MHz a 6 GHz
Pasos de frecuencia	menor a 1 KHz
Rango de ganancia	0 dB a 37.5 dB
Pasos de la ganancia	0.5 dB
Máxima potencia de entrada (Pin)	-15 dBm
Figura de ruido	5 dB a 7 dB

Detalle de las características eléctricas de la sección del transmisor USRP2944R. Fuente: (NI, www.ni.com, 2022)

2.3.2 Funcionamiento de la USRP-2944R

En la figura 2.9 se describe el diagrama en bloques de la USRP-2944R.

Figura 2.9 Circuito esquemático de la USRP2944



Representa un diagrama simplificado en bloques del USRP 2944 Fuente: NI-USRP Help.

Transmisor

En la PC se da inicio a la señal I/Q en banda base, según los requerimientos de niveles de señal, frecuencia, tono, etc. Este se conecta al USRP 2944 a través de una tarjeta de conexión PCIe que tiene una velocidad ethernet de 1Gbps o 10 Gbps. La señal pasa por el FPGA y utilizando un convertor digital ascendente, mezcla, filtra e interpola la señal obtenido una señal muestreada de 40 MS/s para I&Q. Ingresa DAC que convierte la señal digital en señal analógica, al atravesar por el filtro pasa bajos, un circuito mezclador en donde la señal I&Q se mezclan con la frecuencia enviada desde el VCO (Oscilador Controlado por Voltaje, Voltage Controlled Oscillator) que es controlada por el PLL (Phase Locked loop, Lazos Enganchados en Fase). La señal elevada a la frecuencia de transmisión entre (500 MHz – 6GHz) pasa directamente por el Direct Path y si está en el rango de (10Mhz – 500MHz) toma un camino alternativo de conversión descendente donde existe otro mezclador donde se mezclan la señal del VCO controlado por otro PLL, considerando los filtros a los cuales debe pasar la señal. La señal es amplificada y su

potencia depende de la frecuencia de transmisión ya que su potencia no es plana en todo el rango de operación. La potencia es entregada a la antena para su correspondiente transmisión en el espacio (NI, NI-USRP help).

Receptor

La señal que está en el espacio ingresa por la antena del URSP2944, esta energía del campo eléctrico es transformada en energía eléctrica, dependiendo de la frecuencia que recibe puede tomar el camino del amplificador de bajo ruido (LNA) o por el camino que contiene el amplificador de bajo ruido (LNA) y el filtro de pasa bajos (LPF). Estas opciones que toma la señal son seleccionadas por switch de alta velocidad y pasan por otro switch de dos caminos: Direct Path cuando las frecuencias son entre 500 MHz – 6GHz y si esta por en el rango de frecuencias entre 10 MHz – 500 MHz atraviesa por: LPF. La señal de la frecuencia de recepción se mezcla con la frecuencia generada por el VCO y que es controlada por el PLL a una frecuencia central de 2.44 GHz. Pasa por el filtro de pasa banda (BPF) con 84 MHz de ancho de banda y por último cruza por un filtro de pasabajos (LPF). La señal seleccionada ingresa a un amplificador de corriente para normalizar los niveles de señales que ingresan a la siguiente etapa. En los mezcladores de cuadratura I & Q que reduce en una única componente que está en banda base (I) y de fase de cuadratura (Q), la frecuencia generada en el VCO y controlada por el PLL es ingresada a un circuito que desfasa la señal a 0 grados y a 90 grados. En cada camino se tiene filtros pasa bajos (LPF) que reducen el ruido y las componentes de altas con una frecuencia de corte de 80 MHz. Ingresan a un convertidor análogo-digital (ADC) a una frecuencia de muestreo de 200 MS/s digitalizándola los datos I & Q. Al ingresar al convertidor digital descendente (DDC), hace las funciones de mezcla, filtrado y diezmado de la señal a una velocidad que es controlada por el programador. Estas señales convertidas llegan a la PC a través de la conexión PCIe que tienen velocidad ethernet de 1 Gigabits/s y 10 Gigabits/s (NI, NI-USRP help).

2.4 LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es programación basada en gráficos, orientada a instrumentos electrónicos como GPIB, RS232 o RS485 con tarjetas de adquisición de datos, sistemas de adquisición. El software LabVIEW es un entorno de programación gráfica que utiliza módulos o bloques llamados VI (Instrumentos virtuales) que simulan instrumentos físicos reales y sirven para realizar cualquier tipo de medición, la unión entre los VI se ejecuta por medio cables terminales simbólicos en lugar de texto o escritos (Manobanda, 2015, págs. 39, 40).

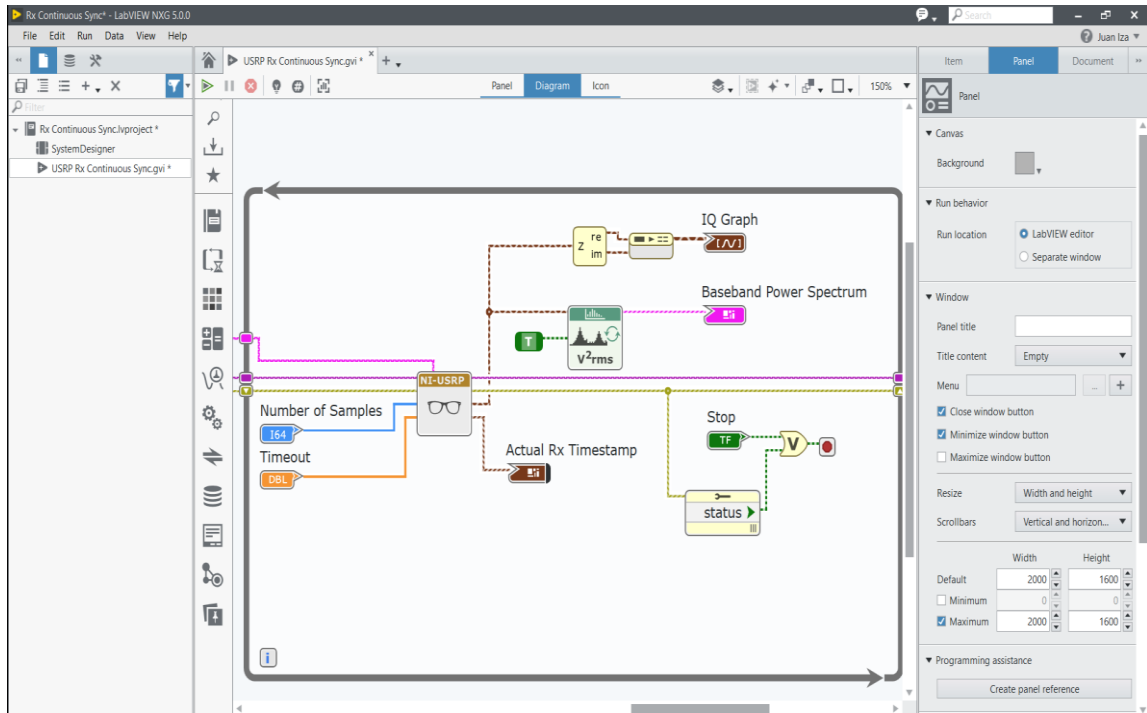
Los módulos VI son escalables a scripts desarrollados en otros códigos de programación como: C, C++, Python y Matlab. Se implementa dependiendo de la estructura general del solicitante y la interconexión con otros módulos (Juaréz, 2016, p. 33).

LabVIEW NXG es una versión mejorada de LabVIEW, que posee ciertas características en su interfaz dinámica, flexible y avanzada, para que los desarrolladores e ingenieros puedan: programar, esquematizar, ejecutar y visualizar los resultados de sus proyectos en línea (NI N. I., 2021, p. 1). Tiene una interfaz WEB para aplicaciones remotas para el soporte de eventos de sensores y actuadores que se utiliza en redes de sensores o telemetría; una biblioteca de JavaScript que permite interactuar con la interfaz Web y viene con un software SystemLink™ Cloud para que los datos sean alojados en la nube (Huamaní & Pacheco, 2019, p. 47 y 76).

Realiza diferentes tipos de proyectos, como: crear VI, convierte proyectos de anteriores versiones, colas de mensajes, máquinas de estado. Permite el uso de: clases, compartir librerías, interfaces para Matlab, utilizar .net, una interfaz para gestionar todos los errores que se nos vaya presentando. En su Panel frontal se crea un control de todas las opciones y funciones que tiene LabVIEW NXG, como: tipos de datos, controles, indicadores, graficas, operaciones, array, selectors, clúster, manejo de layout, etc. En la parte de Diagram presenta todas las conexiones que se van realizando para construir el programa.

El Icon es para crear el icono del VI, añadiendo las entradas y salidas para reutilizar en otros proyectos (Sungur, 2022) (Ahmadi, 2022). En la gráfica 2.10 se puede observar el panel frontal de LabVIEW NXG.

Figura 2.10 Panel frontal de LabVIEW NXG.



Pantalla principal de LabVIEW NXG 5, se ubican los tres paneles: panel, design, icon. Fuente: Software LabVIEW NXG 5

2.5 Ansys Electronic Desktop

Desarrollado en el año de 1970 por John Swanson. Es una tecnología de simulación integral que es asistido por computadora, que presta un gran aporte para la industria en diferentes áreas del diseño, creación e implementación de: análisis de estructuras FEA (Finite Element Analysis, Análisis de elementos finitos), análisis de diseño electromecánico; análisis de diseño de filtros RF para microondas que permiten la optimización de los circuitos de RF, análisis de sistemas ópticos para sistemas automotrices considerando un robusto diseño geométrico, análisis de arreglos de antenas para la comprobación de los parámetros eléctrico, etc. Los diferentes módulos que contiene ANSYS permiten un escalamiento según los requerimientos de los proyectos, áreas o clientes (Martinez & Montemiranda, 2019, pp. 19 - 20).

2.5.1 HFSS (High Frequency Structure System)

Es un software de simulación de alto rendimiento que diseña, modela y simula estructuras 3D considerando el comportamiento que presenta al aplicarse a sus terminales de alimentación señales de ondas electromagnéticas (Tapia & Mena).

Por medio de este simulador se obtiene el comportamiento electromagnético de las antenas dispuesta de manera espacial, de acuerdo con el análisis en frecuencia o rango de frecuencia que se necesite. Como resultados se obtiene de los parámetros eléctricos de la antena, como: parámetros de dispersión S, VSWR, parámetros Z, Patrón de radiación, Ganancia, Diagramas de radiación del ángulo de elevación y azimut (Rodríguez, 2019, p. 47).

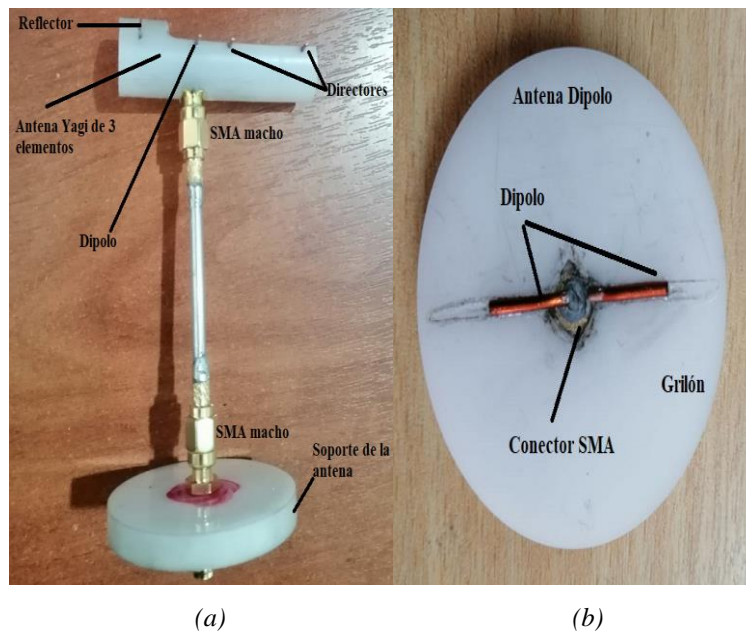
CAPÍTULO III

DISEÑO DEL MODULO DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LAS ANTENAS

3.1 DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ANTENAS

En la figura 3.1(a) se observa la antena Yagi de 3 elementos construidos con material de Cu (cobre), que están sobre una base grilón, adicional esta soportada con un cable coaxial rígido. En la figura 3.1 (b) se tiene a la antena Dipolo construida de material de Cu soldado a un conector SMA e incrustada a una base de grilón.

Figura 3.1 Antenas del proyecto



(a) Antena Yagi de 3 elementos (b) Antena Dipolo. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin.

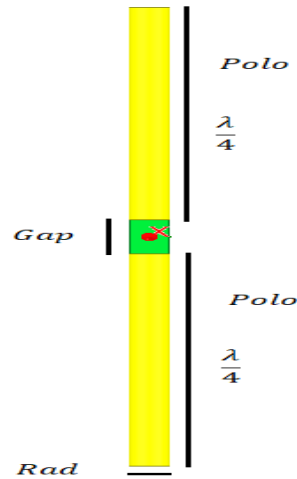
3.2 Diseño de la antena dipolo y Yagi de 3 elementos

Se utiliza el software de simulación ANSYS HFSS para la simulación de las antenas propuestas donde se observa y se analiza el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos, con la finalidad de analizar los parámetros eléctricos en la región lejana de las antenas propuestas.

3.2.1 Diseño de la antena dipolo

En la figura 3.2 se observa el diseño de una antena dipolo de media onda, cada brazo tienen una longitud de $(\frac{\lambda}{4})$ con un radio (Rad) y una longitud de separación del puerto donde la antena recibe la alimentación (Gap).

Figura 3.2 Antena dipolo de onda completa



Variables de una antena dipolo que se modifican en el simulador. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

Para el diseño de este tipo de antena, se considera lo siguiente tabla 3.1 donde se toma en consideración la frecuencia de trabajo de 5 GHz, tipo de material conductor de cobre (Cu).

Tabla 3.1 Valores de las variables.

<i>Variable</i>	<i>Descripción</i>	<i>Valores a considerar</i>
v	Velocidad de la luz en el espacio	300.000 [Km/h]
f	Frecuencia de diseño de la antena	5[GHz]
K	Constante de valor	0.02[mm], valor que se escogió por la condición de medida del radio del conductor debe ser ($radio < 0.024\lambda$)
Gap	Distancia del puerto por donde se alimenta la antena	4.02[mm] Se va a utilizar un conector SMA.

Variables para considerar en el diseño de la antena dipolo. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

Cálculo para el diseño de la antena dipolo de media onda

Para calcular la (λ) la longitud de onda de la frecuencia a la cual se va a trabajar se utiliza la ecuación 3.1

$$\lambda = \frac{v}{f} [mm] \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Rad es el radio de los polos de la antena.

$$Rad = \lambda * K [mm] \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Polo es la distancia del brazo de la antena en análisis.

$$Polo = \left(\frac{\lambda}{4}\right) - \left(\frac{Gap}{2}\right) [mm] \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Rmedio es el ancho total de la caja de radiación en la cual se hará el análisis la radiación de la energía electromagnética.

$$Rmedio = \left(\frac{\lambda}{4}\right) + Rad [mm] \quad \text{Ec. (3.4)}$$

Lmedio es el largo total de la caja de radiación en la cual se hará el análisis la radiación de la energía.

$$Lmedio = \left(\frac{\lambda}{2}\right) + Gap + (Polo * 2) [mm] \quad \text{Ec. (3.5)}$$

Para el modelar se empleó las medidas de la antena previas de los dos polos y del puerto, para el puerto se seleccionó la opción de excitación interna de la antena que se denomina lumped port ya que el puerto está dentro de la superficie radiadora. La línea de integración del puerto indica la dirección de excitación del campo electromagnético. Determinar la frecuencia a la cual va a trabajar la antena con el número de pasos de la simulación (Frecuencia de 5GHz, máximo número de repeticiones 8) y por último para medir el ancho de banda se determina un rango de frecuencia que este caso se utiliza un

rango frecuencia de 3 GHz a 7 GHz.

Las dimensiones de Rmedio y Lmedio se utiliza para la elaboración de la caja de radiación, en este caso se le denomina Buoundary con la opción de radiación PML. Se optimizó las medidas de los polos y el radio, esto se realiza para que las dimensiones de antena se sintonicen a la frecuencia de 5 GHz. Con ayuda de Optimetrics de HFSS se ingresa dos nuevas variables L con pasos de 0.00000001 [mm] y xin con pasos de xin de 0.01 [mm]. L es la distancia del largo del dipolo que se ajusta con el OPTIMETRIC y xin es la distancia del radio del dipolo que se ajusta con el OPTIMETRIC y son valores que me permiten optimizar de mejor manera la antena diseñada. Obteniendo valores para L = 2.2651296 [mm] y para Xin = 0.01 [mm] de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$\text{Radio} = 1.2 \text{ [mm]} - \text{xin [mm]} = 1.2 - 0.01 = 1.19 \text{ [mm]} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

$$\text{Polo} = 12.99 \text{ [mm]} - L \text{ [mm]} = 12.99 - 2.2651296 = 10.72487 \text{ [mm]}$$

Las medidas que se muestra en la tabla 3.2 son valores de la antena ajustada a 5GHz.

Tabla 3.2 Valores de las variables de la antena dipolo

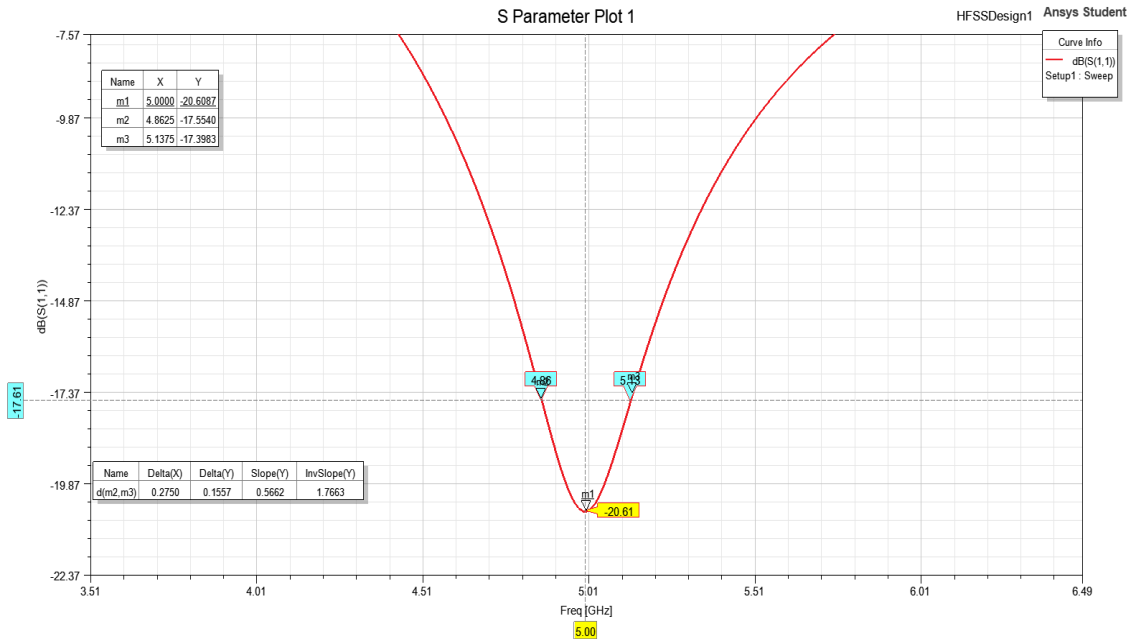
Variabes	Valores [mm]
Radio del polo	1.19
Largo del polo	10.72487
Puerto de alimentación	4.02

Valores de las variables de la antena dipolo luego de utilizar la opcion del optimizador del simulador

Ansys. Fuente: Simulador Ansys HFSS

En la figura 3.3 se presenta la gráfica del parámetro S11 versus la frecuencia, llamado coeficiente reflexión mide la cantidad de voltaje que me esta devolviendo el sistema comparada con el voltaje que se envia a la antena. Aqui se determina la frecuencia de resonancia y el ancho de banda, a la frecuencia de a 5 [Ghz] se tiene un S11 de -20.61 [dB] esto me indica que el 0.869% de la energía que se transmite retorna al sistema . Para calcular el ancho de banda se asume 3 dB encima de los -20.61 [dB] que se obtuvo en la medición del parámetro S11. Entonces, se tiene -17.61 dB en términos de porcentaje es el 1.73% de pérdidas y se tiene un ancho. La antena yagi tiene un ancho de banda de 275 [MHz].

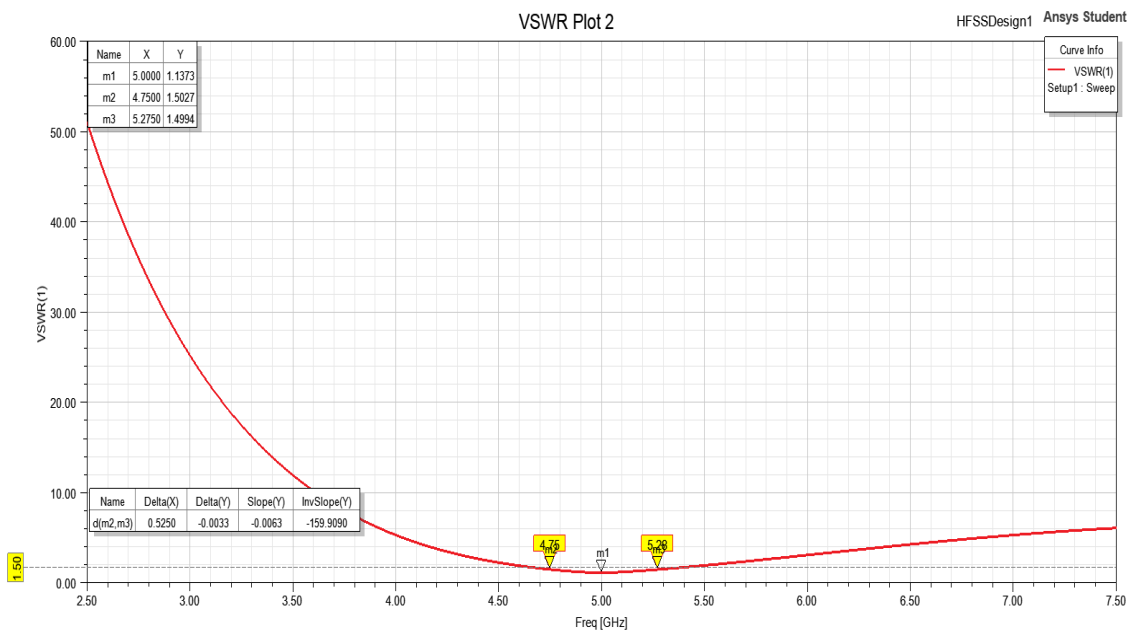
Figura 3.3 Parámetros S de la antena dipolo



Parámetro S luego del ajuste de la antena dipolo. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

En la figura 3.4 se presenta la gráfica del parámetro VSWR versus la frecuencia, donde a 5 [Ghz] se tiene un VSWR de 1.1375, este valor se aproxima a el valor ideal de 1. Este valor significa que existe un 13.75% de energía que se refleja desde la antena al transmisor, por lo tanto existe un buen acoplamiento de la línea de transmisión con la carga que es la antena (Andrea, 2016).

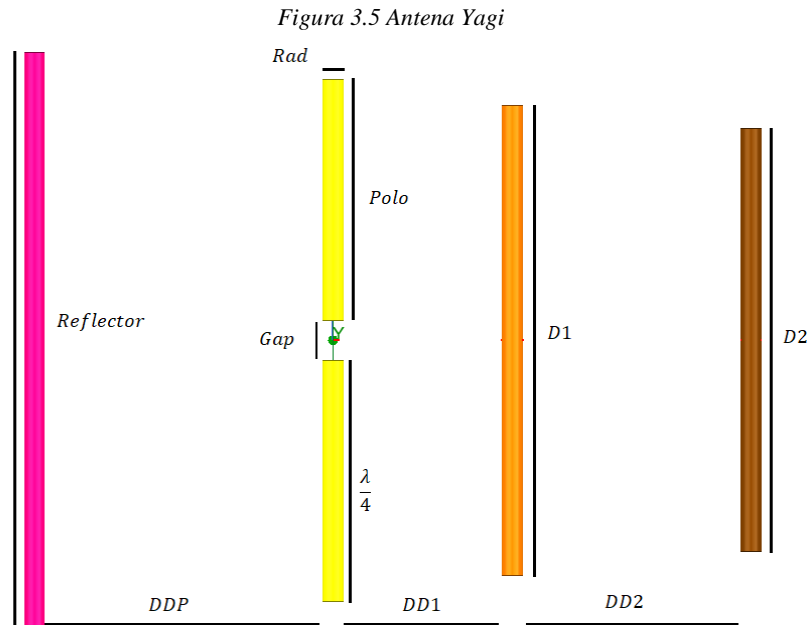
Figura 3.4 Parámetros de la antena dipolo



Parámetro VSWR luego del ajuste de antena dipolo. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

3.2.2 Diseño de la Antena Yagi 3 elementos

En la figura 3.5 se observa el diseño de una antena Yagi de tres elementos. Formada por un reflector y dos directores; sus brazos tienen una longitud de $(\frac{\lambda}{4})$ con un radio (Rad) y una longitud de separación del puerto donde la antena recibe la alimentación (Gap) diseñada para una frecuencia de 5 GHz empleando como conductor el cobre.



Diseño de una antena Yagi de 1 reflector y 2 directores con la ayuda del simulador Ansys HFSS.

Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

Cálculo para el diseño de la antena Yagi

Para calcular la (λ) la longitud de onda de la frecuencia a la cual se va a trabajar se utiliza la ecuación 3.7

$$\lambda = \frac{v}{f} [mm] \quad \text{Ec. (3.7)}$$

Rad es el radio de los polos de la antena.

$$Rad = \left(\frac{\lambda}{60} \right) [mm] \quad \text{Ec. (3.8)}$$

Gap distancia del puerto por donde se alimenta la antena.

$$Gap = Rad * 4 [mm] \quad \text{Ec. (3.9)}$$

Polo es la distancia de un brazo de la antena en análisis.

$$Polo = \left(\frac{\lambda}{4}\right) - \left(\frac{Gap}{2}\right) [mm] \quad \text{Ec. (3.10)}$$

Rmedio es el ancho total de la caja de radiación en la cual se hará el análisis la radiación de la energía electromagnética.

$$Rmedio = \left(\frac{\lambda}{4}\right) + Rad [mm] \quad \text{Ec. (3.11)}$$

Lmedio es el largo total de la caja de radiación en la cual se hará el análisis la radiación de la energía electromagnética.

$$Lmedio = \left(\frac{\lambda}{2}\right) + Gap + (Polo * 2) [mm] \quad \text{Ec. (3.12)}$$

Reflector es el elemento que refleja hacia la parte delantera la mayoría de energía electromagnética radiada por el dipolo.

$$Reflector = \left((Gap + (Polo * 2)) * 0.05\right) + (Gap + (Polo * 2)) [mm] \quad \text{Ec. (3.13)}$$

DDP es la distancia desde el dipolo hacia el reflector.

$$DDP = \lambda * 0.25 [mm] \quad \text{Ec. (3.14)}$$

D1 es el largo del primer director posterior al dipolo.

$$D1 = (Gap + (Polo * 2)) - \left((Gap + (Polo * 2)) * 0.05\right) [mm] \quad \text{Ec. (3.15)}$$

DD1 es la distancia desde el dipolo al primer director D1.

$$DD1 = \lambda * 0.15 [mm] \quad \text{Ec. (3.16)}$$

D2 es el largo del segundo director posterior al primer director.

$$D2 = D1 - \left((Gap + (Polo * 2)) * 0.05 \right) [mm] \quad \text{Ec. (3.17)}$$

DD2 es la distancia desde el primer director D1 al segundo director D2.

$$DD1 = \lambda * 0.35 [mm] \quad \text{Ec. (3.18)}$$

Se para realizó el diseño y la simulación en el software HFSS, y posterior se optimizó las medidas de la antena con la Optimetrics es el mismo que se ejecutó para la antena dipolo. Aquí se considera solo una variable para el Optimetrics que es el parámetro L (L es la distancia del largo del dipolo que se ajusta con el OPTIMETRIC), con pasos de 0.001 [mm]. Obteniendo un valor del ajuste de L = 2.0 [mm]. Por lo tanto, el largo del polo esta dado por la siguiente relación:

$$Polo = 15.3 [mm] - L [mm] = 15.3 - 2 = 12.3 [mm] \quad \text{Ec. (3.19)}$$

Las medidas que se muestra en la tabla 3.3 son valores de la antena ajustada a 5GHz.

Tabla 3.3 Valores de las variables de la antena Yagui

Variabes	Valores [mm]
Radio del polo	0.52
Largo del polo	12.22
Puerto de alimentación	2.0
Reflector	29.084
Director 1	23.796
Director 2	21.4164
Distancia reflector-dipolo	15
Distancia dipolo-directo1	9
Distancia dipolo-director2	21

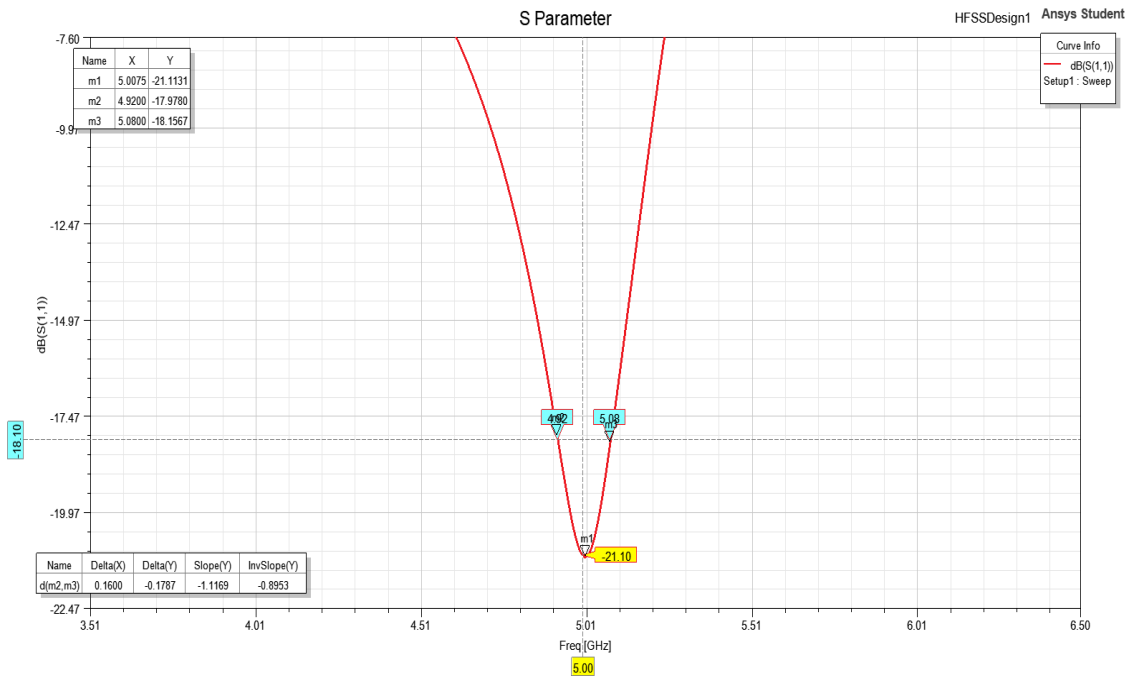
Valores de las variables de la antena Yagi luego de utilizar la opción del optimizador del simulador

Ansys. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

En la figura 3.16 se presenta la gráfica del parámetro S11 versus la frecuencia, llamado coeficiente reflexión mide la cantidad de voltaje que me está devolviendo el sistema comparada con el voltaje que se envía a la antena. Aquí se determina la frecuencia de

resonancia y el ancho de banda, a la frecuencia de a 5 [Ghz] se tiene un S11 de -21.1 [dB] esto me indica que el 0.78% de la energía que se transmite retorna al sistema . Para calcular el ancho de banda se asume 3 [dB] encima de los -21.1 [dB] que se obtuvo en la medición del parámetro S11. Entonces, se tiene -18.1 db en términos de porcentaje es el 1.419% de pérdidas y se tiene un ancho. La antena yagi tiene un ancho de banda de 160 [MHz].

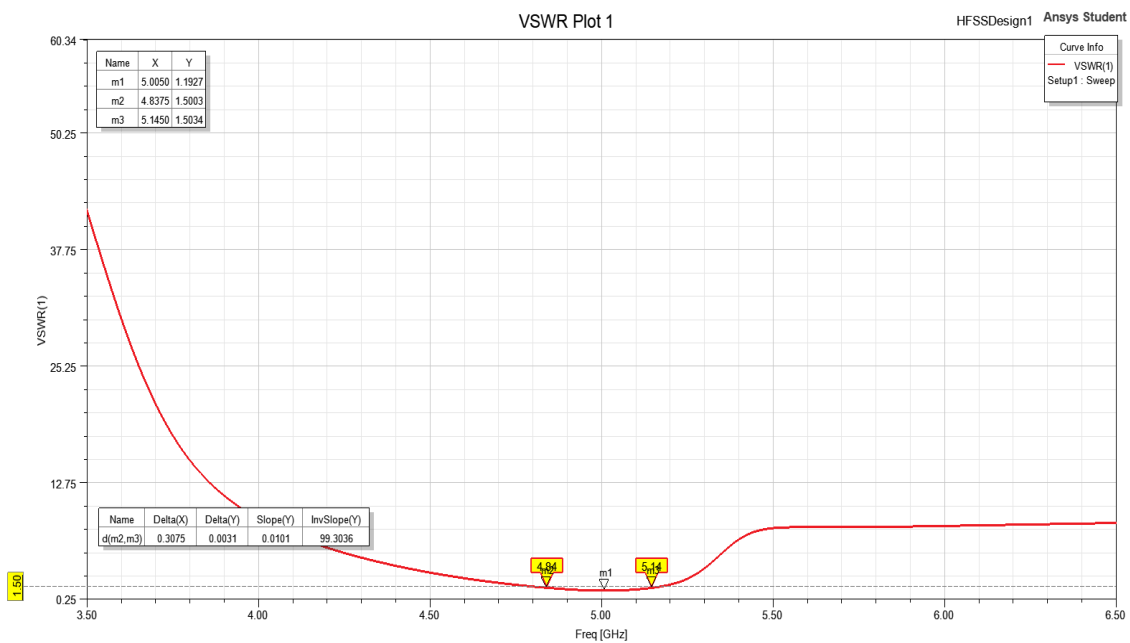
Figura 3.6 Parámetros S de la antena Yagi



Parámetro S luego del ajuste del radio de los brazos del dipolo, reflector y directores. Además, de la distancia del puerto de alimentación de la antena Yagi. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

En la figura 3.7 se presenta la gráfica del parámetro VSWR versus la frecuencia, donde a 5 [Ghz] se tiene un VSWR de 1.1927, este valor se aproxima al ideal que es 1. Este valor significa que existe un 19.27% de energía que se refleja desde la antena al transmisor, por lo tanto existe un buen acoplamiento de la línea de transmisión con la carga que es la antena (Andrea, 2016).

Figura 3.7 Parámetro VSWR de la antena Yagi



Parámetro VSWR luego del ajuste de antena Yagi. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

3.3 Conexión USRP 2944R y Labview NXG

Algunos de los componentes que se utilizan para este proyecto se pueden visualizar en la figura 3.8 y se detallan a continuación:

Figura 3.8 Interconexión de los USRP con las computadoras



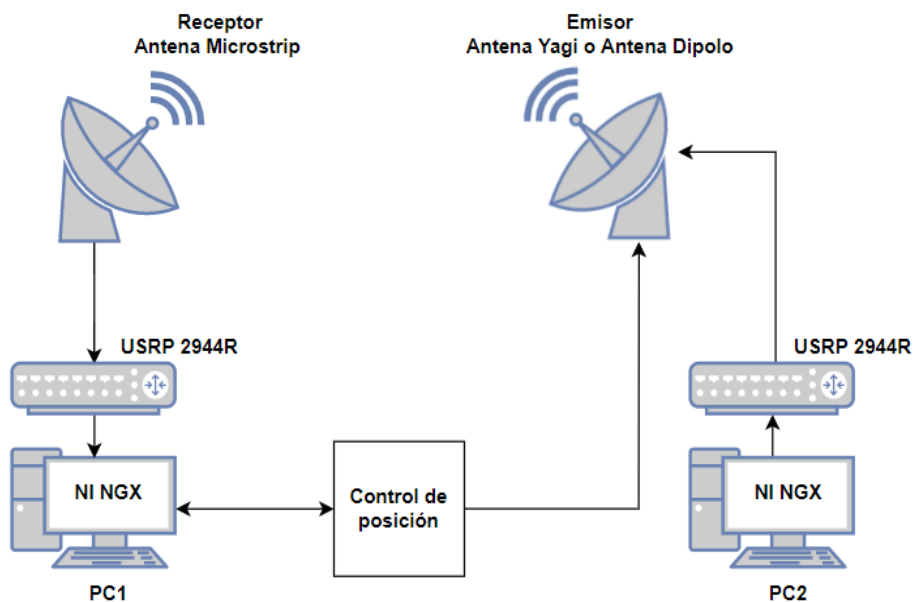
Conexión de los USRP2944R (transmisor y receptor), a los computadores que contienen el software

LabVIEW NXG. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

- 2 PC (ambas con el software NI LabVIEW NGX)
- 2 USRP 2944R
- 1 antena Yagi
- 1 antena Dipolo
- Control de posición

En esta sección se explicará el diseño del módulo medidor de parámetros de antenas. En la figura 3.9 se presenta el diagrama de bloques de la estructura del prototipo para la medición de parámetros de las antenas.

Figura 3.9 Esquema general del proyecto



Sistema de conexiones completo para el funcionamiento del proyecto. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

- Bloque de transmisión.
- Bloque de recepción.
 - ✓ Interfaces para el sistema de graficación de diagrama de radiación mediante LabVIEW NXG.
- Controlador del posicionamiento de antena utilizando un motor a pasos.
- Diagrama de flujo de codificación en Arduino.

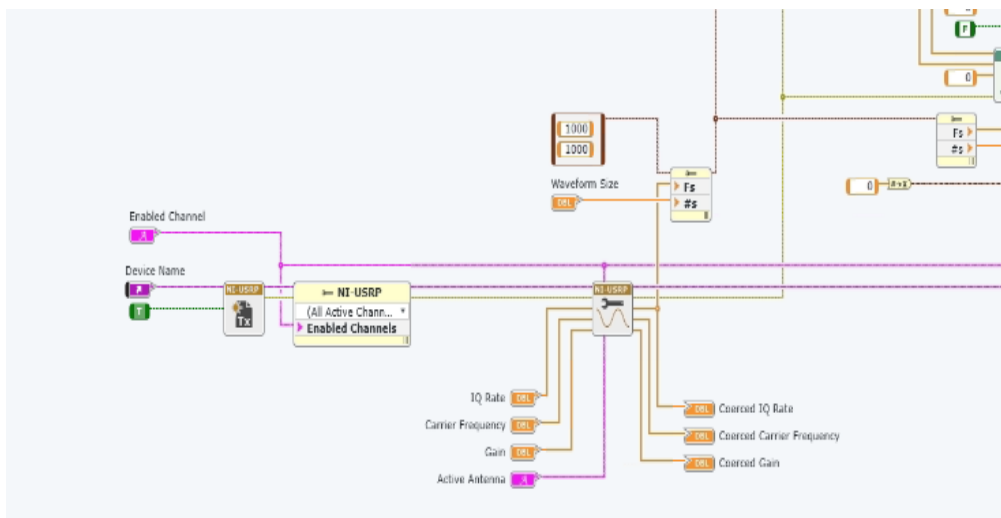
3.3.1 Bloque de Transmisión

Este bloque está formado por una PC que está instalado LabVIEW NXG y el USRP 2944R que se conecta con una interfaz PCIex. Donde se transmite una señal senoidal que tiene la característica de mandar patrones de onda que pueden ser senos y cosenos.

Se realiza algunas pruebas identificando que se transmita una señal y esté en base al patrón de radiación, para lo cual mantendrá o generará una ganancia, para esto los ejemplos de “LabVIEW NXG” fueron muy útiles ya que se trabajó sobre el perfil de uno de ellos.

La señal que se emite en la antena del bloque transmisor esta subida en frecuencia de 5 GHz. Se realiza una codificación en LabVIEW NXG para la conexión con el USRP 2944R mediante el serial que será el *anebulo* mismo que conecta el *channel* y esta toma en cuenta la referencia de la antena, el equipo mantiene un lugar de *reset* y también cuenta con un *properties* que identifica el canal activo, el cual verifica el error y los grados que tiene que girar el motor a pasos como se presenta en la figura 3.10.

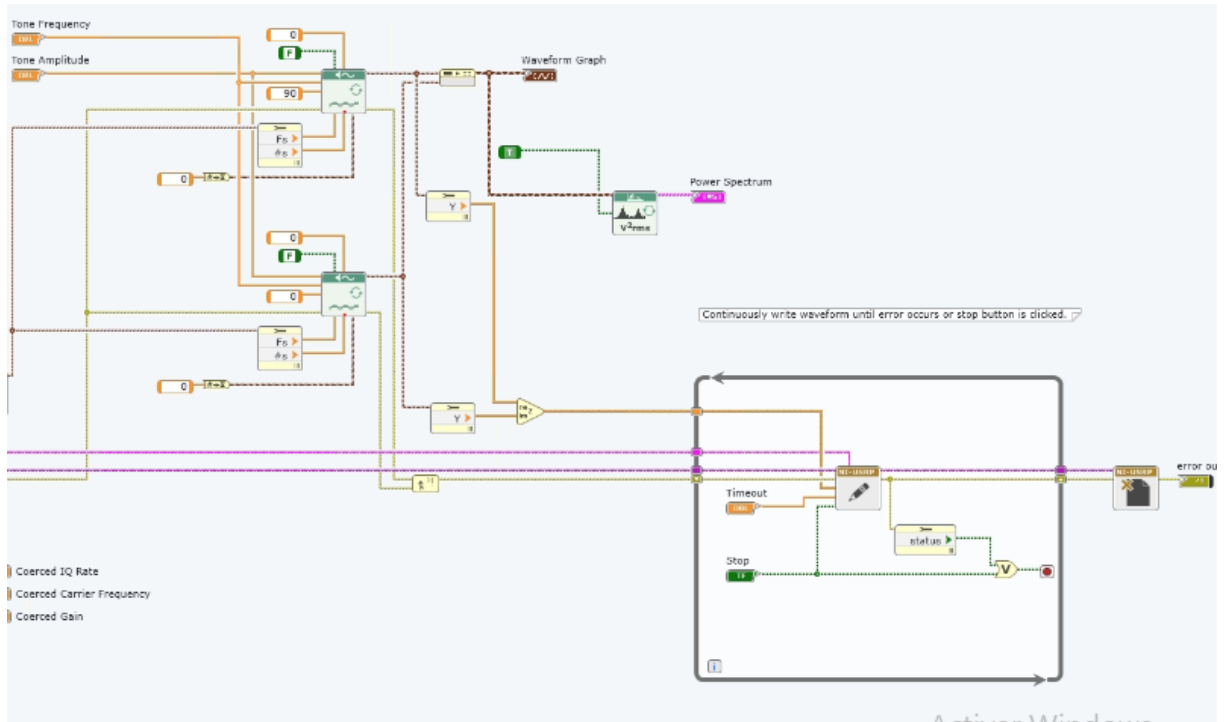
Figura 3.10 Conexión del USRP 2944R con la PC



Conexión de los USRP2944R transmisor, a los computadores que contienen el software LabVIEW NXG. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

En la figura 3.11 lo más importante a destacar en la transmisión es emplear el *power spectrum* para la lectura, el cual a la par permite relacionar el tema de investigación que es la regulación por software, que se delimita en un SDR.

Figura 3.11 Programación de señal sinusoidal



Ejemplo de Conexión de los USRP2944R transmisor en base a una señal sinusoidal en el software LabVIEW NXG. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

3.3.2 Bloque de Recepción

Este bloque está formado por una PC instalada LabVIEW NXG y el USRP 2944R que se conecta con una interfaz PCIex. Y desde la interfaz de LabVIEW NXG se controla la placa giratoria de las antenas de transmisión.

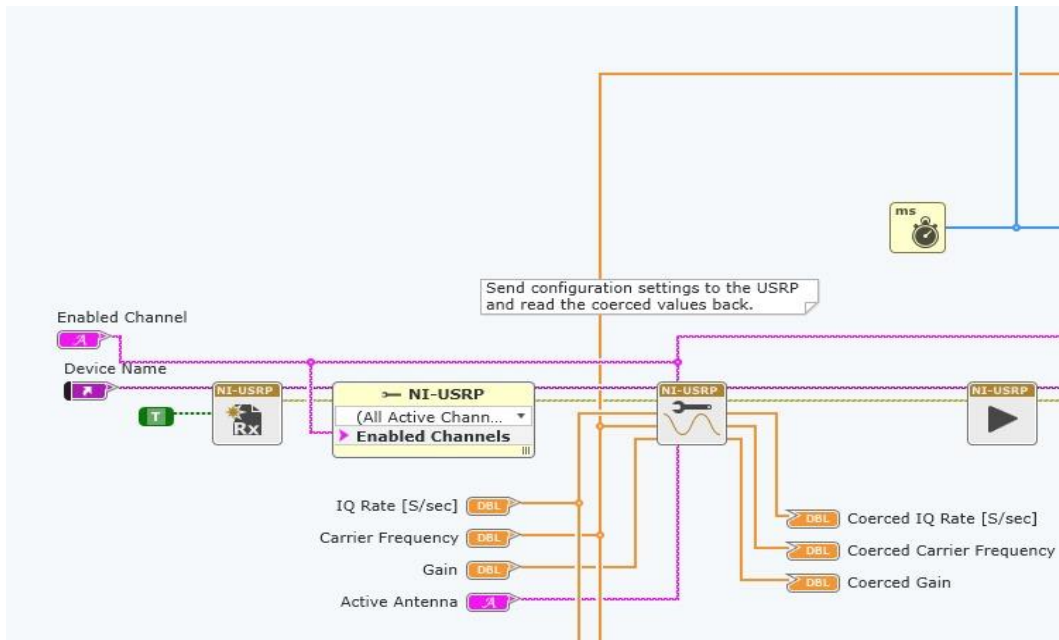
3.3.2.1 Inicialización de la comunicación en LabVIEW NXG

En la figura 3.12 se establece la comunicación entre el USRP 2944R y LabVIEW NXG identificando las siguientes características:

- ✓ La interfaz PCIex receptora del USRP
- ✓ Para la comunicación entre LabVIEW NXG y la placa giratoria se ubica el puerto serial donde el Arduino está conectado con la PC.
- ✓ Se debe tomar en cuenta la transferencia de datos desde el USRP 2944R hacia LabVIEW NXG con el bloque *shift register* ya que este mantiene una constante de datos debido al registro de tiempo.

- ✓ LabVIEW NXG tiende a actualizarse constantemente, por ello se coloca un registro de tiempo antes de comenzar a mandar cualquier constante de datos para que la conexión entre USRP 2944R Y LabVIEW NXG no tienda a fallar.

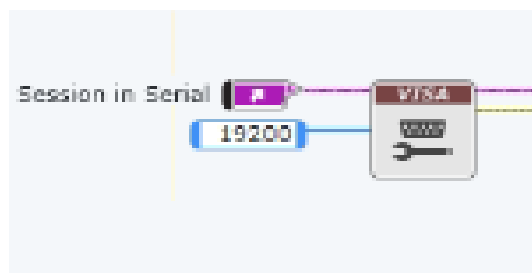
Figura 3.12 Parte del programa para interacción con USRP



Bloque de conexión del USRP 2944R con Labview NXG. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

Una vez terminada la comunicación, como se indica en la figura 3.13 se debe tener dos parámetros necesarios, la *session in* que permite conectarse a LabVIEW NXG con cualquier puerto físico y la constante de tiempo misma que autoriza transmitir a 19200 bits por segundo (*baudios*), se deberá también identificar el selector ya que este permite la lectura del patrón de radiación. las cuales se mantendrá en coordenadas rectangulares y polares, con esta información identificará los parámetros eléctricos de la antena.

Figura 3.13 Bloque de propiedades

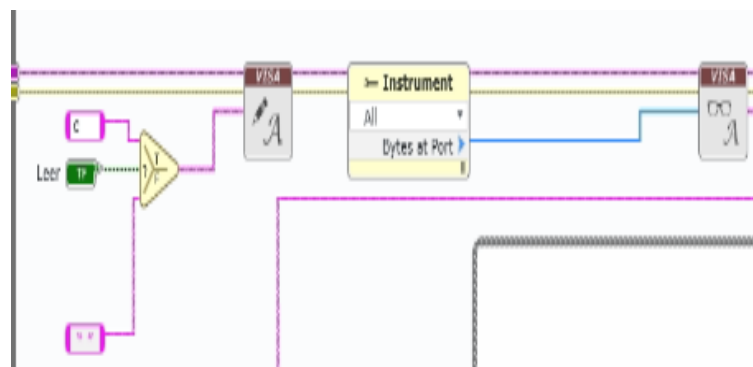


Inicialización de conexión mediante el bloque VISA NXG. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

Una vez finalizado el anterior punto, se debe emplear una letra y un carácter nulo ya que el primero genera una lectura mientras que el segundo será una constante que no leerá el Arduino. En cuanto al *Bytes at port* sirve para contar los bytes desde el Arduino, *bytes at port* sirve para comprobar el error y permitir la lectura y de esta manera no perder datos como se muestra en la figura 3.14.

El funcionamiento de la codificación de LabVIEW para la transmisión de datos mediante el Arduino se detalla como lo siguiente, se envía un dato con un concatenador de línea, que sirve para enviar el dato y registrar el número de posición en el cual se va a girar el motor a pasos. Esto requiere del registro de pasos para sincronizar. Se puede sincronizar por pasos, el cual se ha configurado con 200 pasos, para ello se enviará el dato al lector, después se envía el número para la lectura en *string* (cadena de caracteres).

Figura 3.14 conexión con Arduino para generar los 200 pasos



Transmisión de datos del Arduino mediante bloques de escritura, almacenamiento y lectura en el software LabVIEW NXG. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

Los datos sirven para posicionar un arreglo, la orientación permite hacer un arreglo del *cluster*, este ayuda para que, al momento del ingreso de un dato, ya sea de un elemento uno o un elemento dos lo convierta a un tipo *String* esto quiere decir que a partir de la letra c vaya recogiendo los 200 datos haciéndolo una combinación.

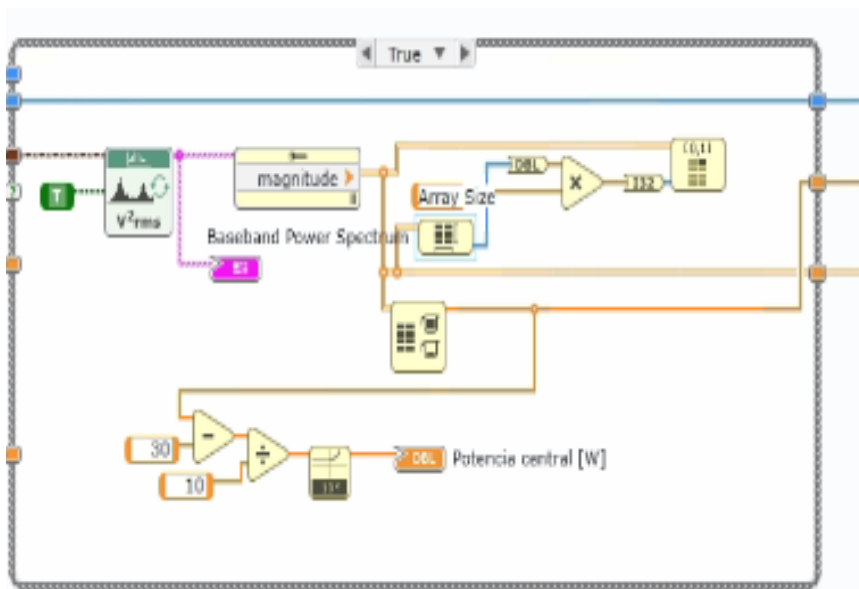
A partir del *power spectrum* se realiza un *cluster* el mismo que sirve como un conversor de elementos, mientras que al *raygd* es como un vector de datos.

Para graficar nuestro patrón de radiación se toma en cuenta este *cluster* antes mencionado, el cual tiene un lector de 0 a 360 grados, los cuales identifican el espectro

en base a la lectura de datos que parte desde la frecuencia, es decir a partir de la frecuencia cero los datos se colocan a la izquierda o derecha según los datos que se marquen en el power spectrum, la codificación se muestra en la figura 3.15.

El dato de la frecuencia que se requiere se encuentra en el vector *array size*, que multiplicara por 0,5 para conectar con el *Index array* por medio del apuntador, señalando el dato central requerido. Por ello se tomará en cuenta el grado con el *cluster* que verificará o presentará únicamente los dos elementos con los que se trabaja la potencia y grados.

Figura 3.15 Generador de señal con un Power Spectrum



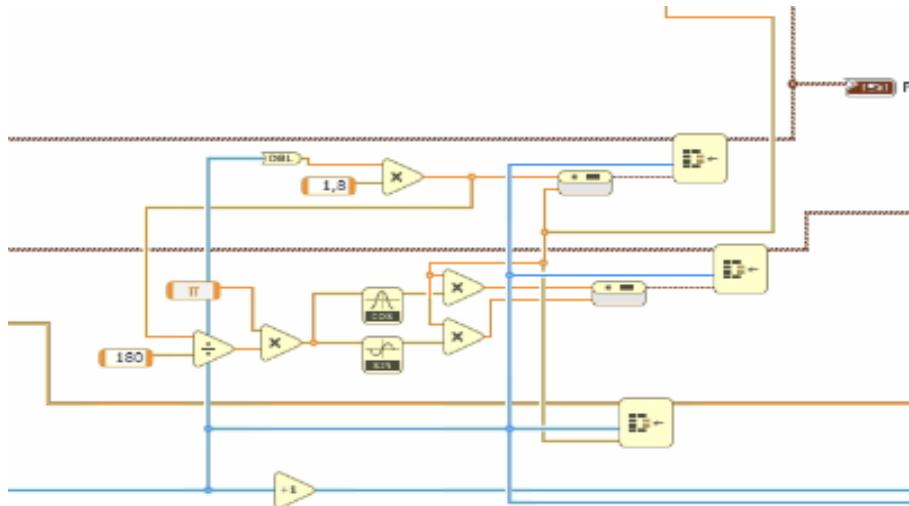
Conexión de recepción de señales en Vrms mediante clusters en el software LabVIEW NXG.

Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

Sin embargo, se requiere otro arreglo de *cluster* con *array* mediante un *replace array subset* que servirá para establecer un mismo dato. Se identificará la posición leyendo entre 0 y 201 datos, que se conectaran a la coordenada rectangular o polar de acuerdo con lo que corresponda.

Como en el grafico 3.16 para cambiar a coordenadas polares se utiliza el *polar graph*, aquí se rectificará rectificadas las coordenadas rectangulares a pi radianes, después estas se identificará el seno y el coseno, convirtiendo así en coordenada polar.

Figura 3.16 Bloque de coordenadas polares y rectangulares



Conexión de recepción de señales para su respectiva gráfica en coordenadas rectangulares y polares en el software LabVIEW NXG. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

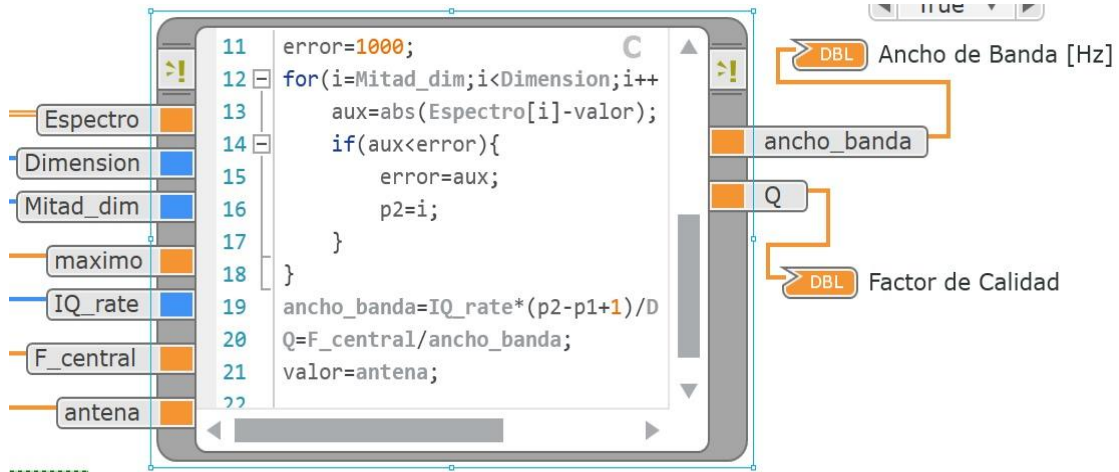
Para la codificación final en LabVIEW NXG se coloca dentro de un case una programación en C++, para lo cual se toma el valor máximo del lóbulo principal del patrón de radiación, donde mediante las fórmulas de Ancho de haz, Directividad, Eficiencia, Factor de calidad, Ganancia y Ancho de banda descritas anteriormente se realiza un bucle for, que a partir de cada fórmula se deriva el valor de la otra y así sucesivamente como se muestra en la figura 3.17 y 3.18.

Figura 3.17 Programación en C++



Codificación de un bucle en C ++ utilizando las fórmulas de Ancho de haz, Directividad, Eficiencia, Factor de calidad, Ganancia y Ancho de banda. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

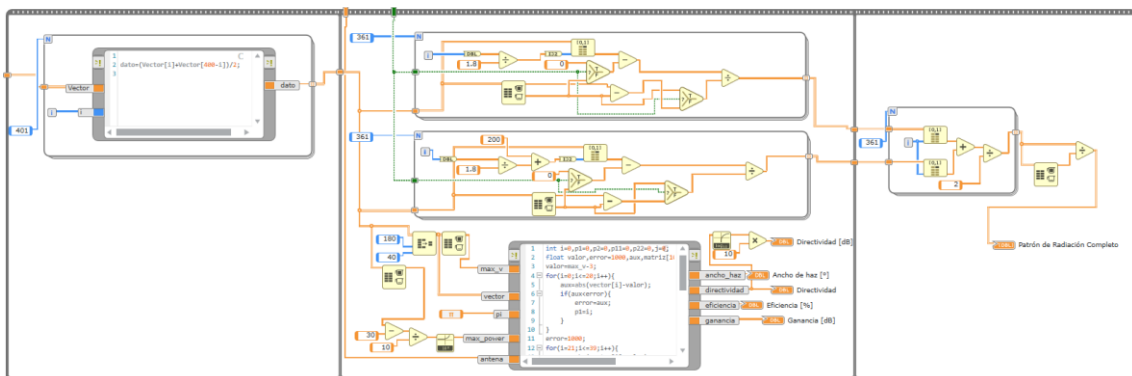
Figura 3.18 Programación en C++



Continuación de la codificación de un bucle en C++ utilizando las fórmulas de Ancho de haz, directividad, Eficiencia, Factor de calidad, Ganancia y Ancho de banda. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

Se realiza 3 bucles secuenciales en LabVIEW NXG el primero es una codificación que saca la media del patrón de radiación a partir de la primera vuelta de motor a pasos y su regreso. Después en el segundo bloque se realiza la normalización del patrón de radiación, y en el último se promedia los valores ida y vuelta de las antenas en el motor a pasos de 0 y 360 grados esto nos ayuda a que cuando la antena de transmisión no se encuentre apuntando en el centro de la antena de recepción el patrón de radiación salga a cualquier costado del punto inicial, sino que su grafica salga en el centro como se muestra en la figura 3.19.

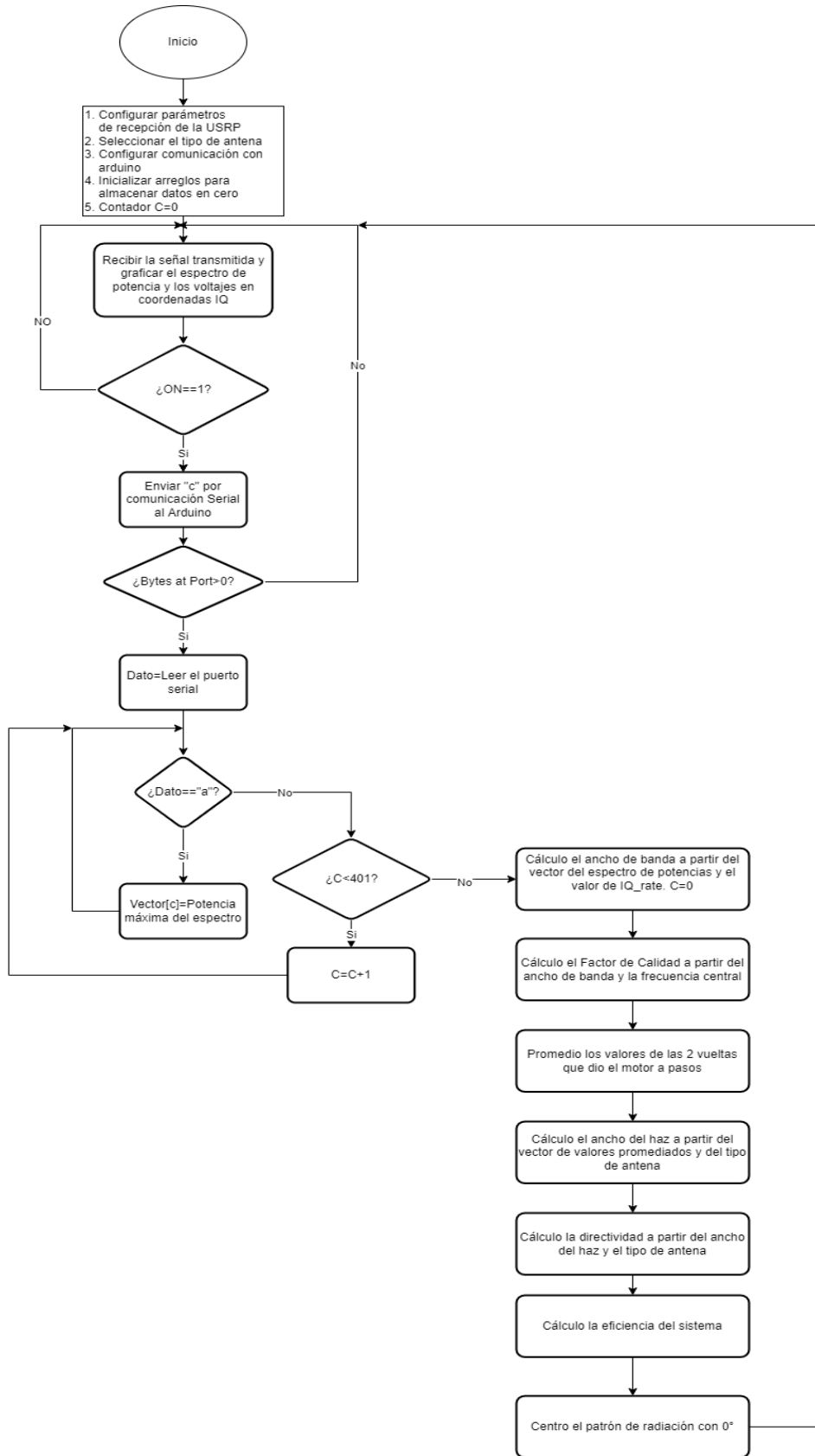
Figura 3.19 Configuración secuencial



Bucle secuencial de 3 iteraciones media, normalización y promedio de los 200 pasos ida y vuelta del patrón de radiación de la antena. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

Se realiza una lógica de toda la programación de LabVIEW mediante un diagrama de bloques para mayor entendimiento de todo lo tratado mediante la figura 3.20.

Figura 3.20 diagrama de bloques programación en LabVIEW NXG



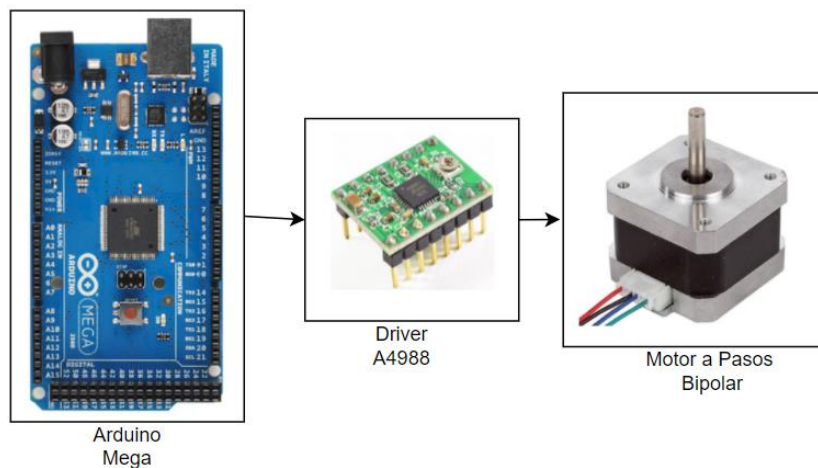
Secuencia de codificación insertada en LabVIEW NXG para el funcionamiento de una antena de

recepción. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

3.3.3 Controlador del posicionador de la antena de transmisión

Se empleó una placa giratoria de 360° para graficar el patrón de radiación y obtener los parámetros de las antenas transmisoras. Para el control de posicionamiento al momento del giro de la antena transmisora, se incorporó un Arduino que se conecta mediante comunicación serial con NI LabVIEW NGX, el Arduino a su vez controla el giro de un motor a pasos bipolar mediante el driver A4988 como observa en la figura 3.30. El control de posición está compuesto por un Arduino Mega 2560, un driver A4988 y un motor de pasos bipolar, como se muestra en la figura 3.21 y 3.22.

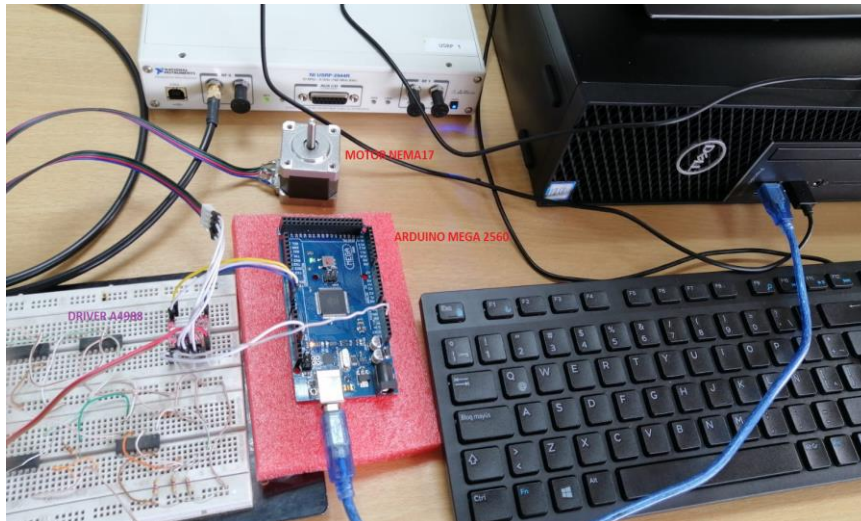
Figura 3.21 Control de posición en bloques



El sistema de bloques para realizar una programación e implementación de un motor a pasos para obtener datos en un sistema giratorio implementado con una antena. Fuente: Laboratorio de Telecomunicaciones UPS.

El motor seleccionado tiene una razón de giro de 1.8° por paso dado, ya que requieren de 200 pasos para que el eje del motor de una revolución completa, el esquema de conexión por un diagrama de bloques grafico está en la figura 3.22 y 3.23

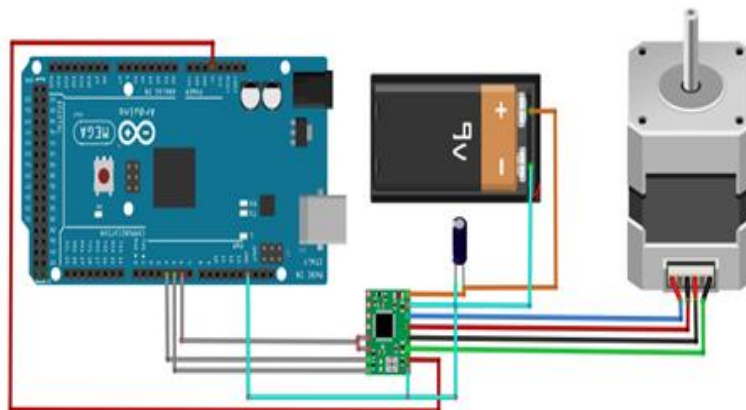
Figura 3.22 Control de posición



El sistema de control de posición permite al sistema hacer el giro de la antena para obtener el patrón de radiación de una antena. Fuente: Laboratorio de Telecomunicaciones UPS

En cuanto al módulo empleado es el 4988 o motor a pasos identifica la variación de pasos tomando los datos de la posición en que se encuentra un objeto. Y para controlar el motor se emplea una codificación en Arduino. El mismo que con un solo pin da pasos con un flanco de subida y flanco de bajada. Otro punto es la conexión de equipos que se puede emplear por medio de la comunicación serial empleando Arduino y Proteus.

Figura 3.23 Conexiones del sistema de posición



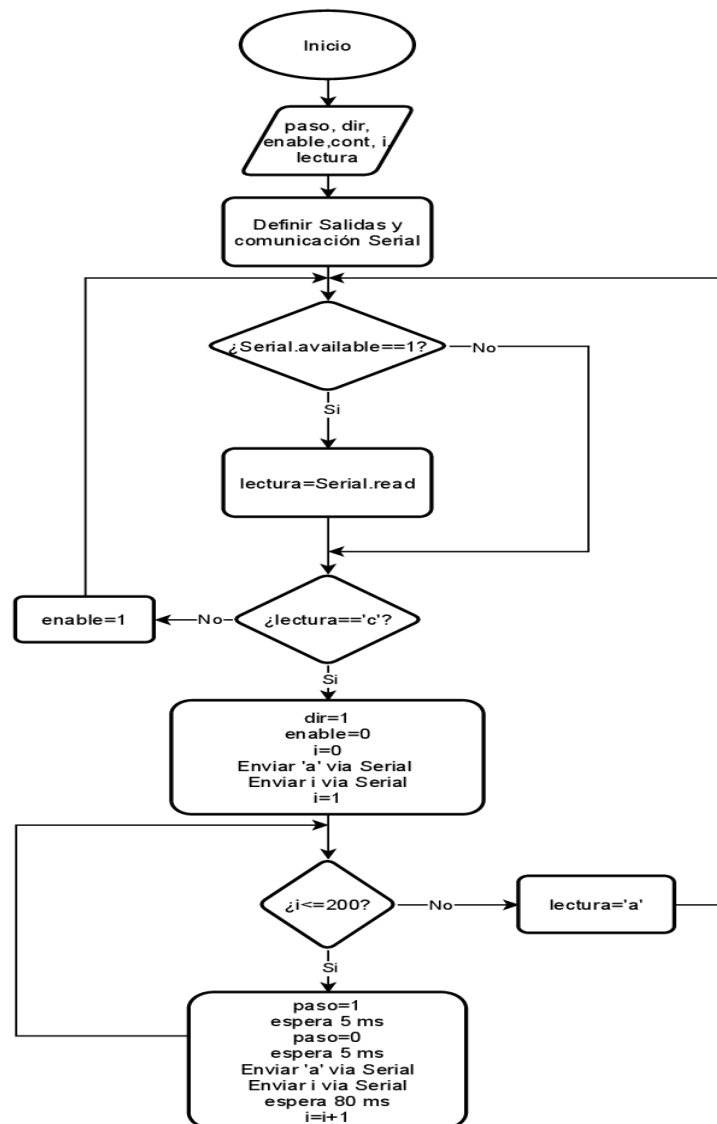
Muestra las conexiones que se deben realizar para que el sistema pueda integrarse al proyecto. Fuente:

También se utilizó *Arduino* porque es un módulo que tienen compatibilidad con la *LabVIEW NXG*. Hay que destacar que lo generado hasta este punto posee un gran respaldo documental de programación en *Arduino* como se ve en el diagrama 3.24.

3.3.4 Lógica de la codificación en Arduino

La lógica de control programa de Arduino se muestra en el pseudocódigo de la figura 3.24.

Figura 3.24 Lógica de Arduino



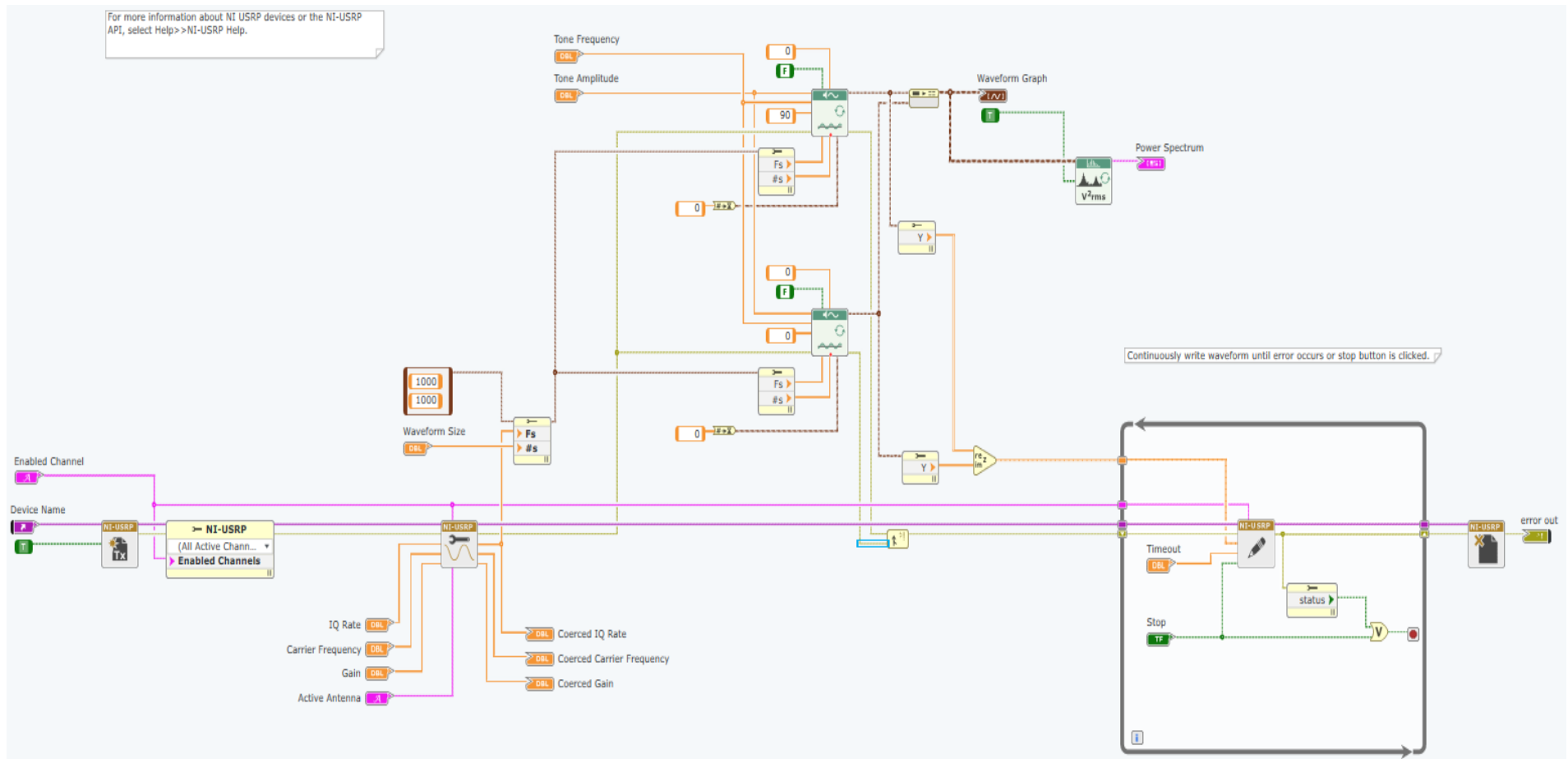
Secuencia que sigue el Arduino en la programación insertada para su funcionamiento. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin.

Lo que se busca con Arduino es controlar el giro del motor y a su vez sincronizar el paso dado con LabVIEW para tomar muestras del espectro de potencia medido y de esta manera obtener puntos del tipo (X, Y) donde X es el grado de giro e Y es el valor medido del espectro de potencia en dB en ese instante, y de esta manera almacenar los puntos

medidos para graficar el patrón de radiación de las antenas y determinar a su vez los parámetros de estas.

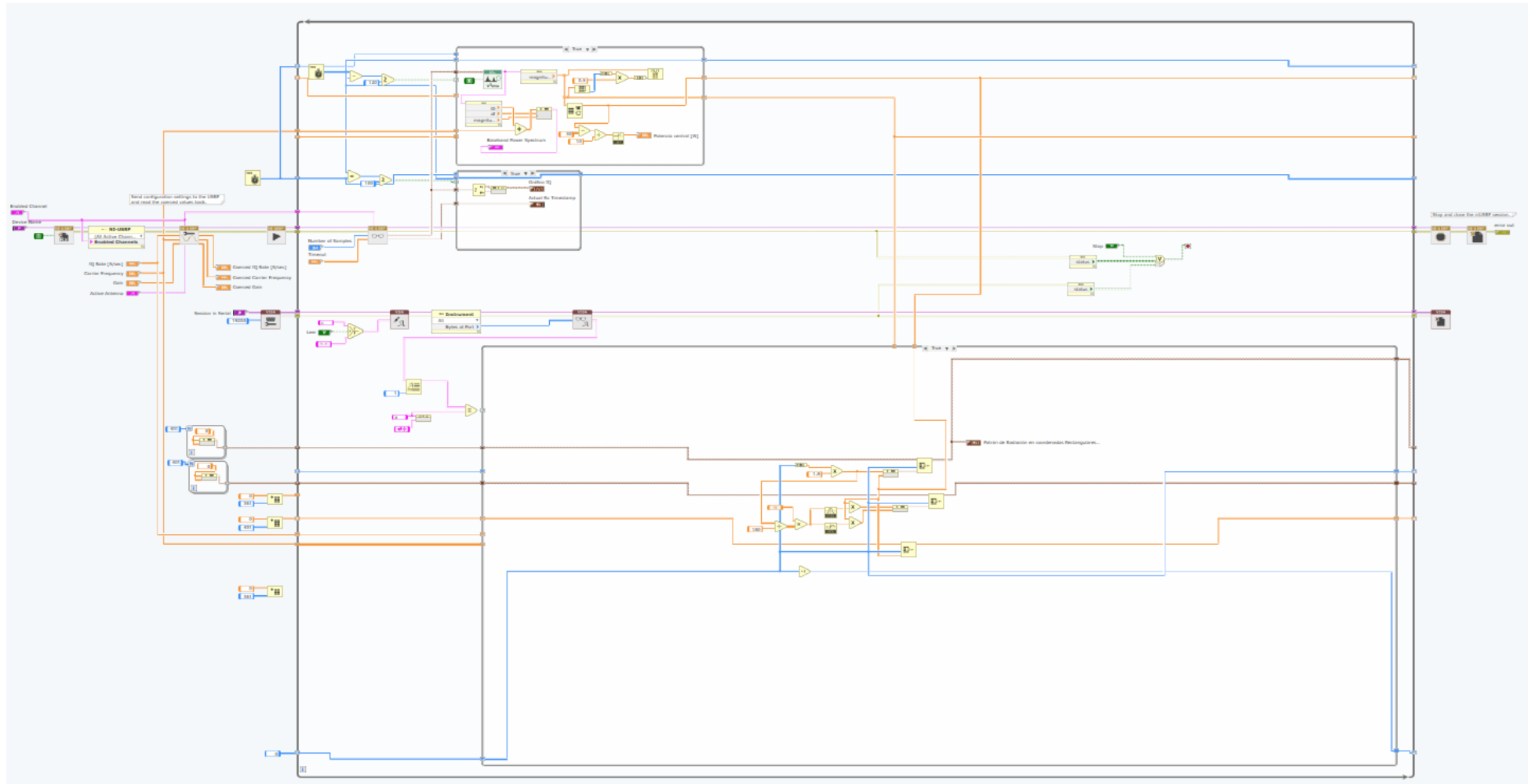
En LabVIEW es necesario establecer la comunicación tanto para la USRP como para Arduino (comunicación serial). En la figura 3.25 se muestra el programa de transmisión desarrollado en LabVIEW NGX, y en las figuras 3.26 y 3.27, se muestra la parte del programa perteneciente a la comunicación con la USRP y la parte del programa perteneciente a la comunicación serial con Arduino en el receptor, respectivamente.

Figura 3.25 Lógica en LabVIEW (Transmisor)



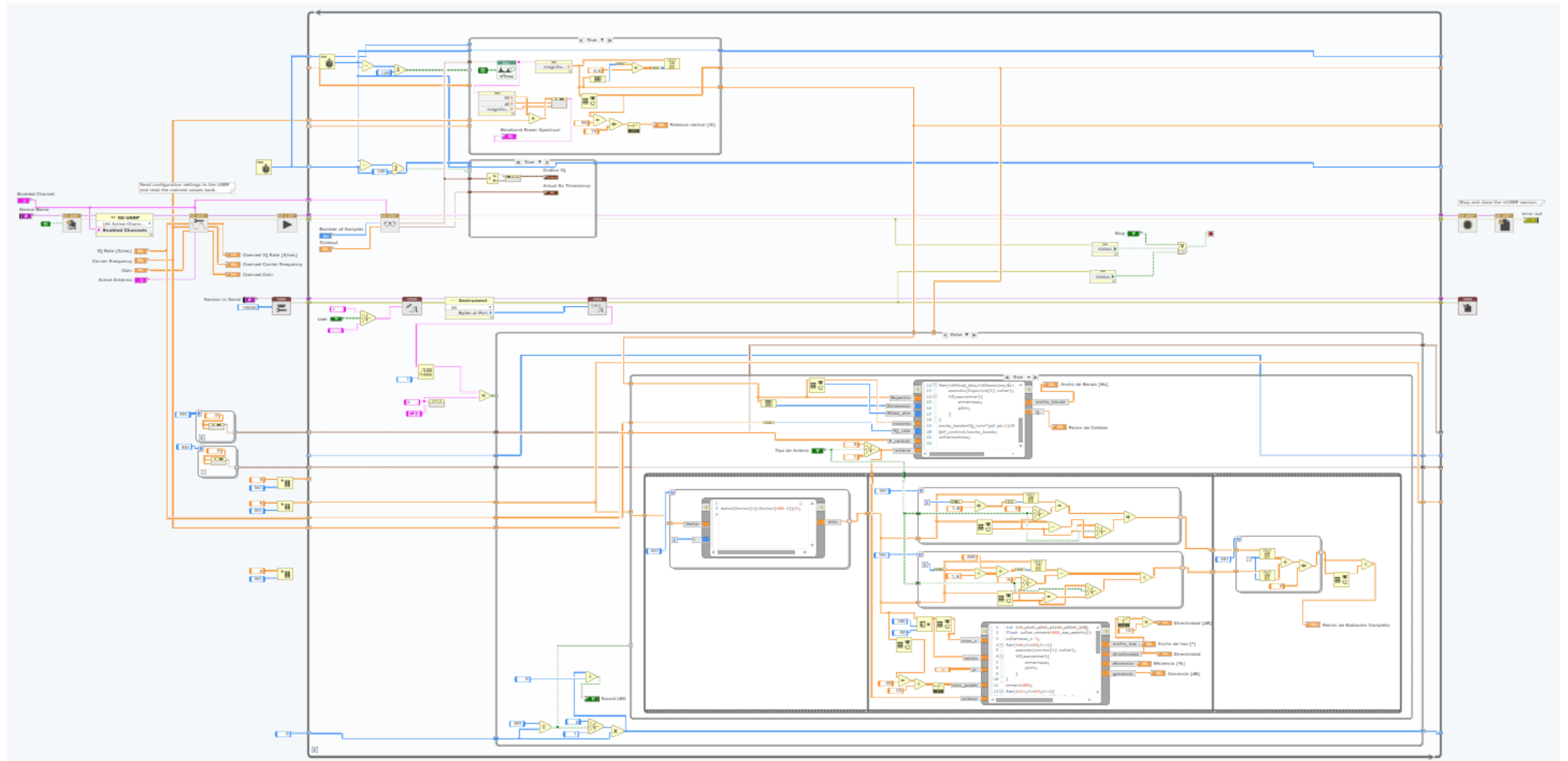
Panel de codificación de bloques completo del transmisor en LabVIEW NXG. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin.

Figura 3.26 Lógica en LabVIEW (Receptor)



Panel de codificación primera parte con bloques de inicialización, conexión con Arduino y conexión de graficas polares y rectangulares para el patrón de radiación en LabVIEW NXG primer. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin.

Figura 3.27 Lógica en LabVIEW (Receptor)



Panel de codificación segunda parte mediante el patrón de radiación, estructuración de programación en C++ y diagramas secuenciales para obtener valores de los parámetros fijados con LabVIEW NXG primer. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se compara los resultados de los parámetros eléctricos de las antenas diseñadas en el software ANSYS HFSS con los resultados experimentales obtenidos con los USRP2 944R a una distancia entre 30 y 50 centímetros. Estas distancias se toman en cuenta dentro del campo lejano de acuerdo con las ecuaciones 3.20, 3.21 y 3.22. Además, se presenta la interfaz de control programada en LabVIEW NXG.

$$R1 < 0,62 \left(\sqrt{\left(\frac{Dim^3}{\lambda} \right)} \right) \quad \text{Ec. (3.20)}$$

R1 es el radio del campo cercano.

$$R2 = 2 \left(\frac{Dim^2}{\lambda} \right) \quad \text{Ec. (3.21)}$$

R2 es el radio del campo de Fresnel

$$Dim \gg \lambda \quad \text{Ec. (3.22)}$$

Condición para determinar si R está en el campo lejano y cercano.

$$R \geq R1$$

$$R \geq R2$$

Donde,

Dim	Distancia total de la antena
R1	Distancia del campo reactivo
R2	Distancia de la zona de Fresnel
R	Distancia de separación de la antena de transmisión con la de recepción, en este proyecto a 30 y 50 cm

De las fórmulas anteriores se determina la distancia para la antena Yagi y para la antena

dipolo:

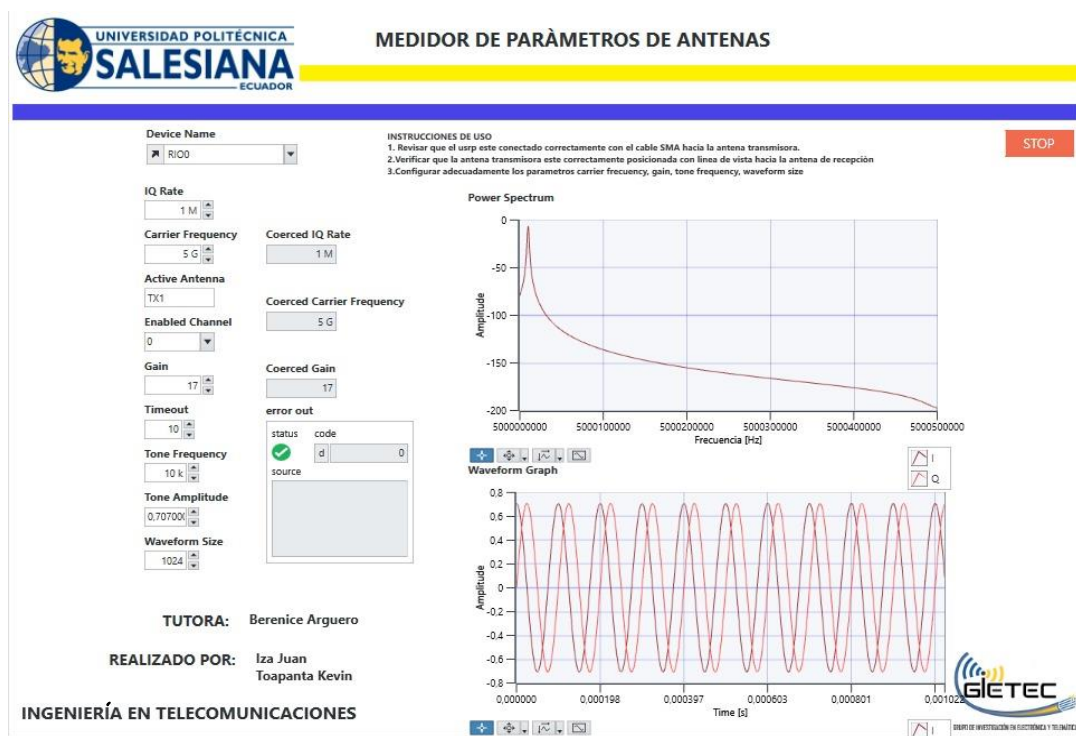
Antena Yagi: Dim = 45 mm, R1 = 24 mm, R2 = 67.5 mm

Antena dipolo: Dim = 26.34 mm, R1 = 10.86 mm, R2 = 23.13 mm

Interfaz de transmisión en LabVIEW NGX

En la figura 4.1, se muestra la interfaz de transmisión, donde se observa los parámetros de configuración del equipo, como: el espectro de la señal a transmitirse su gráfica es la amplitud en función de la frecuencia; la Waveform Graph es la señal que se transmite o se modula con la frecuencia central o frecuencia de transmisión, su gráfica es la amplitud en función del tiempo; las instrucciones uso que le permite al usuario guiarse en el uso de la plantilla del transmisor; el panel de acceso o control de funciones de la plantilla que en su mayoría esta deshabilitadas porque se transmite a la frecuencia fija de 5 GHz.

Figura 4.1 Formato de la plantilla del transmisor



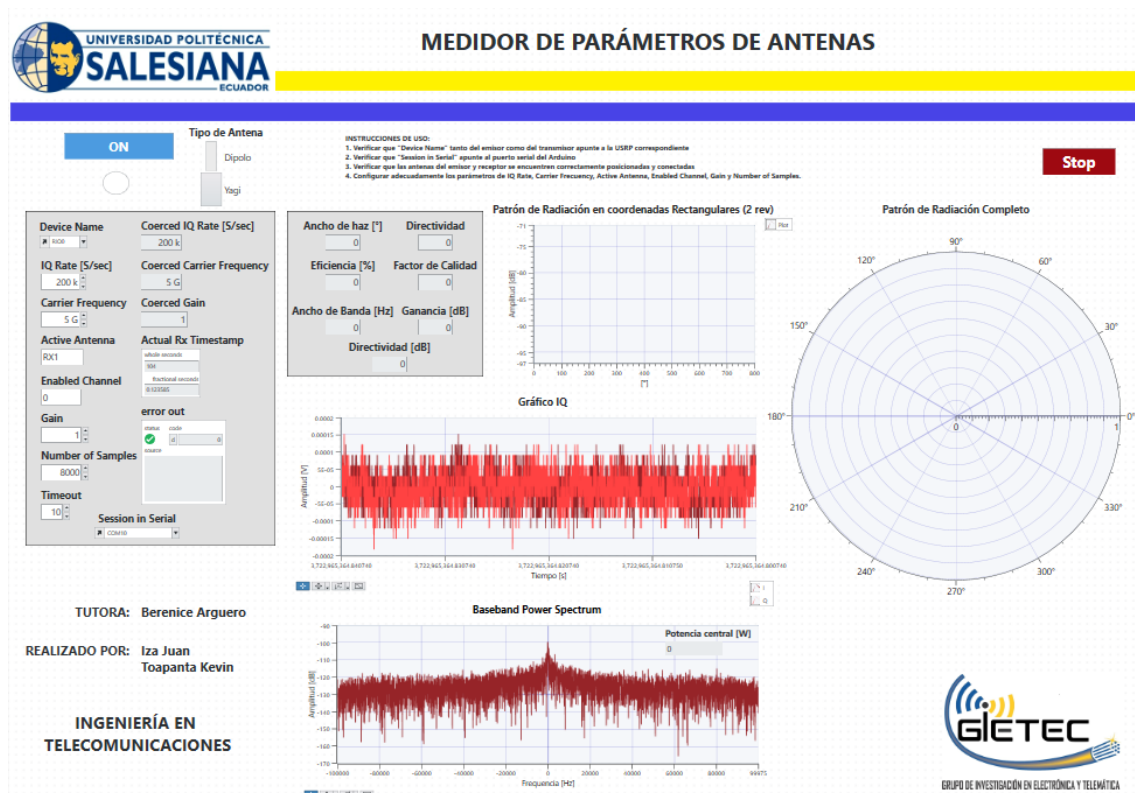
Plantilla de obtención de datos de los parámetros eléctricos de las antenas en el transmisor. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

Interfaz de recepción en LabVIEW NXG

En la figura 4.2, se observa la interfaz donde se mide los parámetros de eléctricos de las

antenas desarrollado en LabVIEW NXG. Que contiene la configuración del equipo, la gráfica del patrón de radiación en coordenadas polares y en coordenadas rectangulares, la gráfica IQ, registrando los parámetros de antenas medidos como: ancho de haz, directividad, eficiencia, factor de calidad, ancho de banda y ganancia. También se observa la sección donde se encuentra las instrucciones del correcto uso; switch de selección para el tipo de antena, el espectro de la señal donde se determina los niveles de energía que capta la antena y la sección de datos de ingreso o control.

Figura 4.2 Formato de la plantilla del receptor



Plantilla de recolección de datos de los parámetros eléctricos de las antenas en el receptor. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

4.1 Resultados de los parámetros eléctricos de las antenas simuladas

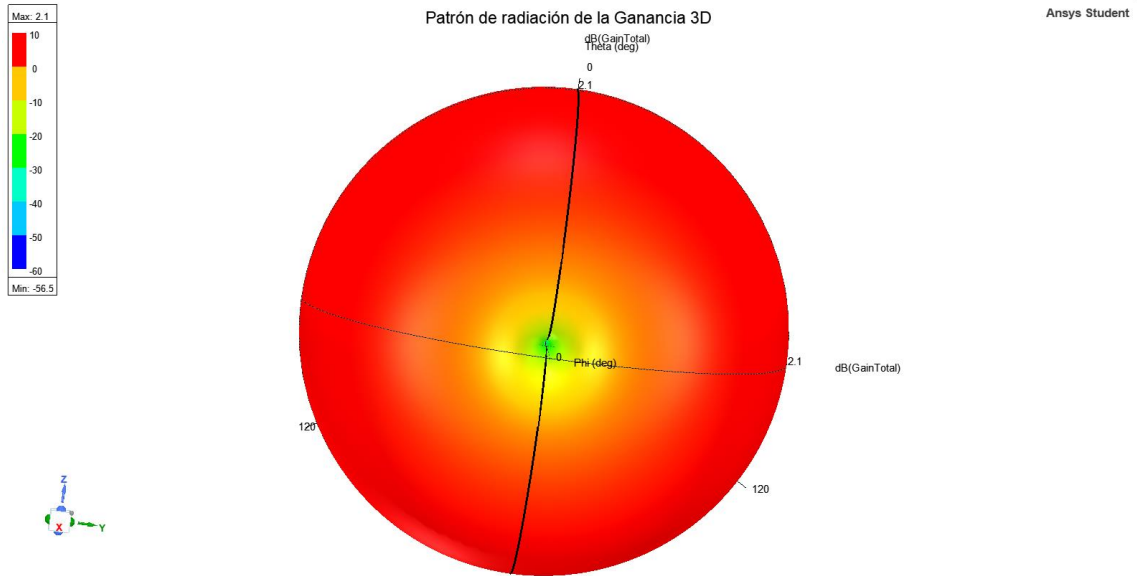
4.1.1 Antena dipolo

Simulación ANSYS HFSS

En la figura 4.3 se visualiza el patrón de radiación de la antena dipolo tomado en el software ANSYS HFSS, donde se obtiene una ganancia de la antena máxima de 2.1 dB

en los extremos del contorno codificados en una escala de color rojo, mientras que los niveles más bajos de potencia se codifican con la gama de colores verde y celeste y se ubican en la parte más cercana a la antena indicando una potencia reactiva de la antena.

Figura 4.3 Patrón de radiación en 3D



Patrón de radiación de una antena dipolo. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin.

En la figura 4.4 se observa el diagrama de radiación en el plano vertical donde se tiene una ganancia máxima de la antena de 2.08 dB en la dirección de 0 grados y 180 grados presentando un patrón omnidireccional y en la zona cercana a la antena de -50.35 [dB] en la dirección de 90 grados.

Figura 4.4 Diagrama de radiación en el plano vertical

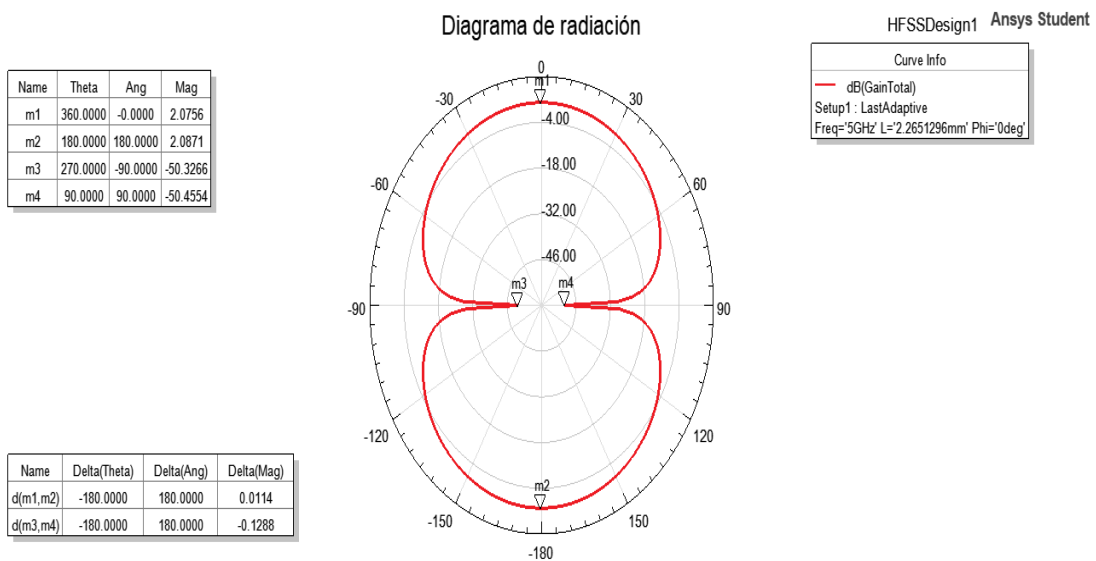


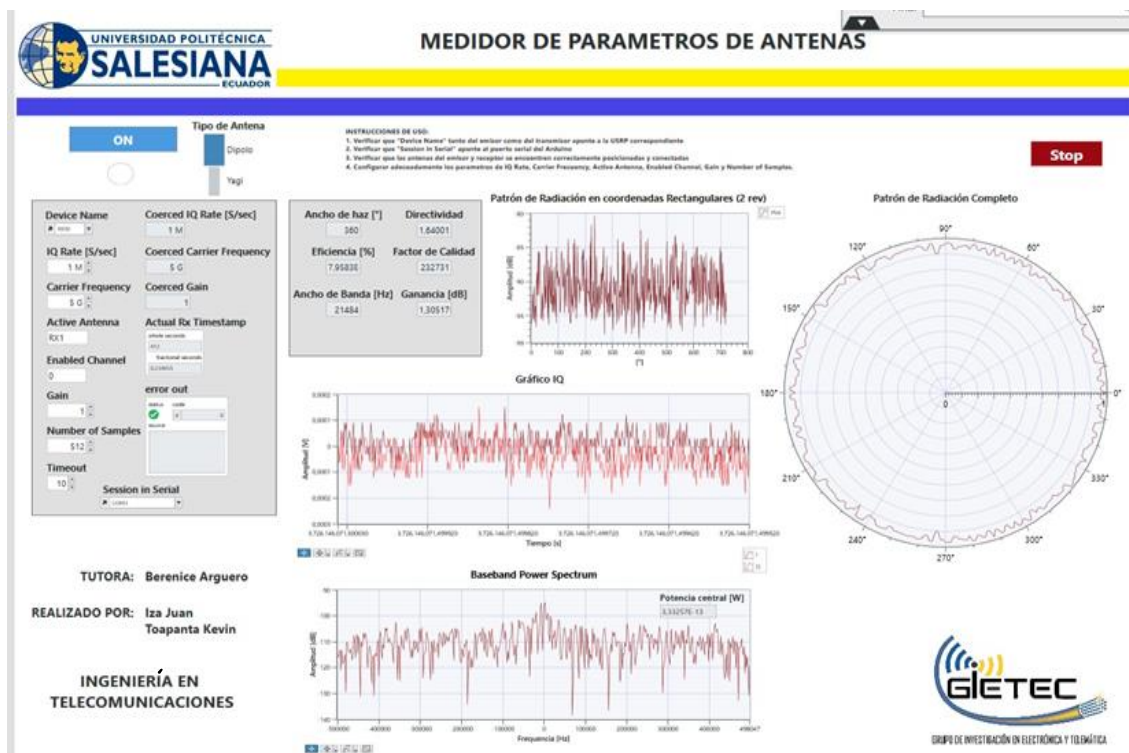
Diagrama de radiación en el plano vertical de la antena dipolo. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin.

Resultados experimentales con USRP 2944R.

Primero se analizó la antena dipolo, esta fue colocada en el módulo de la placa giratoria y la antena Yagi como receptor en el módulo estático.

En la Figura 4.5 se muestra la plantilla de los datos de los parámetros eléctricos de la antena dipolo a una distancia de separación de 50 cm entre la antena de transmisión y la de recepción.

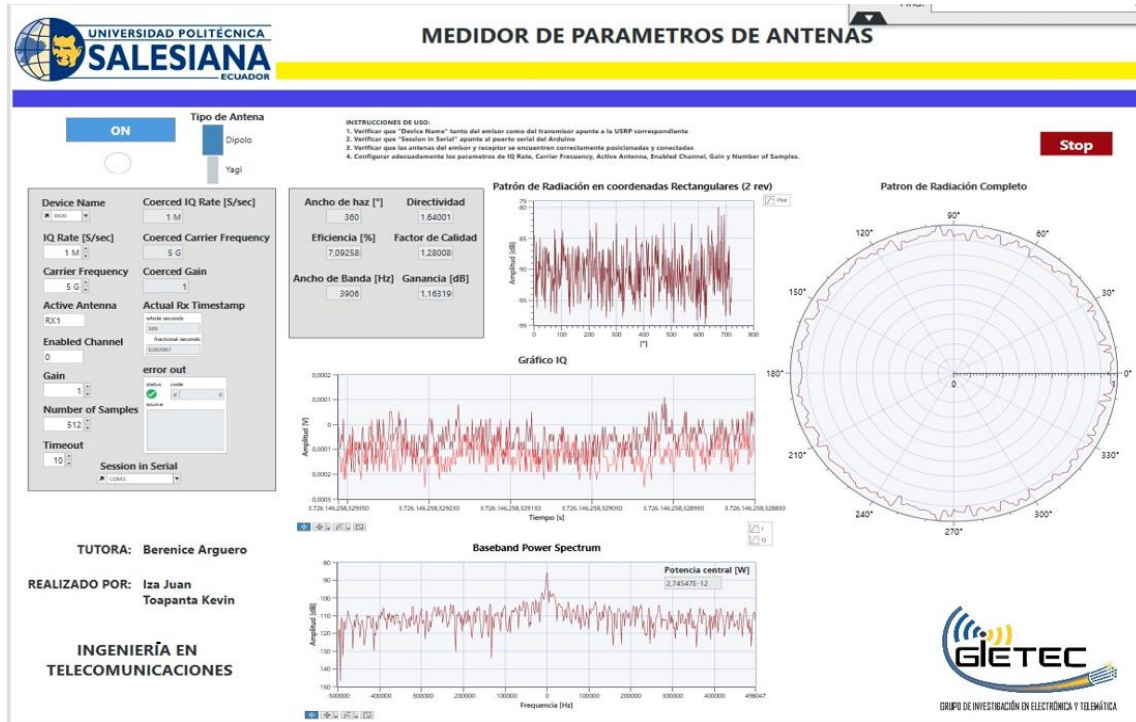
Figura 4.5 Datos a 50 cm de distancia.



Plantilla con datos de los parámetros eléctricos de la antena dipolo. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

En la Figura 4.6 se muestra la plantilla de los datos de los parámetros eléctricos de la antena dipolo a una distancia de separación de 30 cm entre la antena de transmisión y la de recepción.

Figura 4.6 Datos a 30 cm de distancia.



Plantilla con datos de los parámetros eléctricos de la antena dipolo. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

En la tabla 4.1 se muestra el resultado de los valores obtenidos de los parámetros eléctricos de la antena dipolo y la simulación con el SDR USRP2944R a distancias de 30 y 50 centímetros. Así, como su porcentaje de error entre el simulado y el de pruebas.

Tabla 4.1 Valores de las simulaciones de la antena dipolo

Dipolo					
Parámetros eléctricos	Simulación ANSYS HFSS	Pruebas SDR USRP2944R		Porcentaje de error	
		30 cm de separación	50 cm de separación	30 cm de separación	50 cm de separación
Directividad	1.64	1.64	1.64	0.00%	0.00%
Ganancia (dB)	2.075	1.16	1.305	44.10%	37.12%
Eficiencia (%)	99.13	70.925	79.8	28.45%	19.50%
Ancho del haz (grados)	Plano vertical 82	Plano Horizontal 360	Plano Horizontal 360	-	-
Ancho de Banda	16(MHz)	3,906(KHz)	21,484(KHz)	100.00%	99.99%
Factor de calidad		128008	232731		

Datos de los parámetros eléctricos de la antena dipolo. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

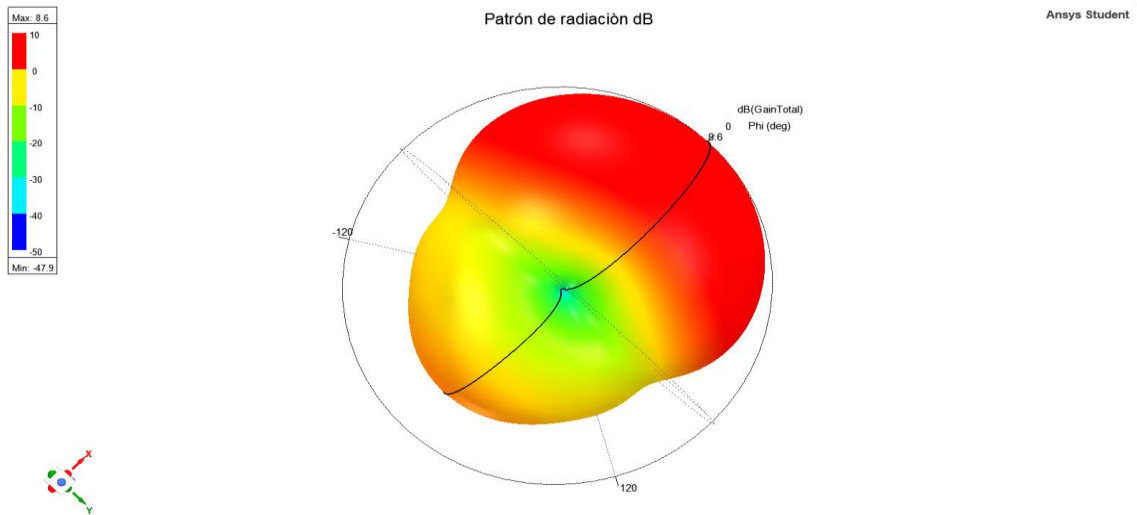
Los resultados muestran que hay una diferencia en la ganancia de la antena dipolo de 44.10% para 30 cm y 37.12% para 50 cm. Para un ancho de banda se observa una diferencia significativa entre la simulación y la parte experimental aproximado del 99%. Respecto a la diferencia de los valores de ganancia y el patrón de radiación obtenidas por experimentación se deben a las interferencias producidas por las vibraciones del soporte giratorio. Otro factor para que no se tenga una curva continua en el patrón de radiación es que los datos obtenidos de los gráficos se van uniendo punto a punto los valores y esto hace que se observe una línea irregular.

El ancho de banda difiere en las dos simulaciones realizadas. En la simulación con ANSYS se toma de la gráfica del parámetro S11 figura 3.12, donde el coeficiente de reflexión está a -21.1 [dB] lo que representa en porcentaje que el 0,8 % del total de la señal enviada a la antena es devuelta al sistema. Tomamos 3 [dB] sobre el valor del coeficiente de reflexión, que sería 18.1 y que representa al 1.5% del total de la señal enviada a la antena es devuelta al sistema. Con este dato se obtiene en la gráfica un ancho de banda de 160 MHz. El valor de 3dB se lo tomó haciendo referencia a los 3[dB] que se toma en el diagrama de radiación que significa a media potencia. La simulación de SDR USRP2944R el ancho de banda no superan los 21.5 KHz, porque no se realiza un barrido de un rango de frecuencias donde se pueda determinar el valor máximo y mínimo de un espectro que permita que la antena se acople sin pérdidas en un sistema.

4.1.2 Antena Yagi

En la figura 4.7 se visualiza el patrón de radiación de la antena Yagi tomado en el software ANSYS HFSS, donde se obtiene una ganancia de la antena máxima de 8.6 dB en los extremos del lóbulo principal codificado en una escala de color rojo, mientras que los niveles más bajos de potencia se codifican con la gama de colores verde y celeste y se ubican en la parte más cercana a la antena indicando una potencia reactiva de la antena. En la parte posterior de la antena se observa una pequeña área del lóbulo posterior que se codifica con una mezcla del color rojo y amarillo.

Figura 4.7 Patrón de radiación en 3D



Patrón de radiación de una antena Yagui. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin.

En la figura 4.8 se observa en el plano vertical el diagrama de radiación donde se aprecia una ganancia máxima de 8.6 [dB] en la dirección de 90 grados y cerca a la antena de -45.85 [dB]. Adicional a -3 [dB] o media potencia tiene un ancho de haz de aproximadamente 62 grados y una relación frente espalda de 14.3452 [dB].

Figura 4.8 Diagrama de radiación en el plano vertical

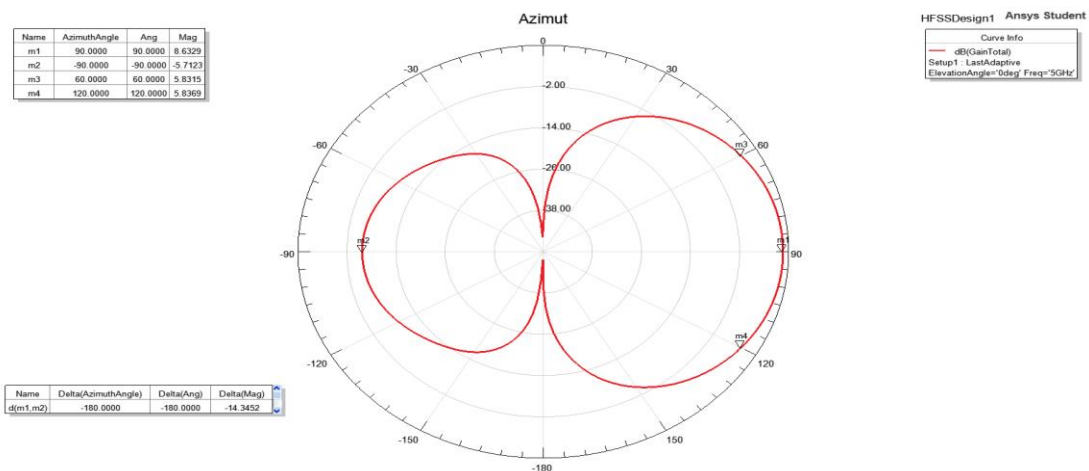
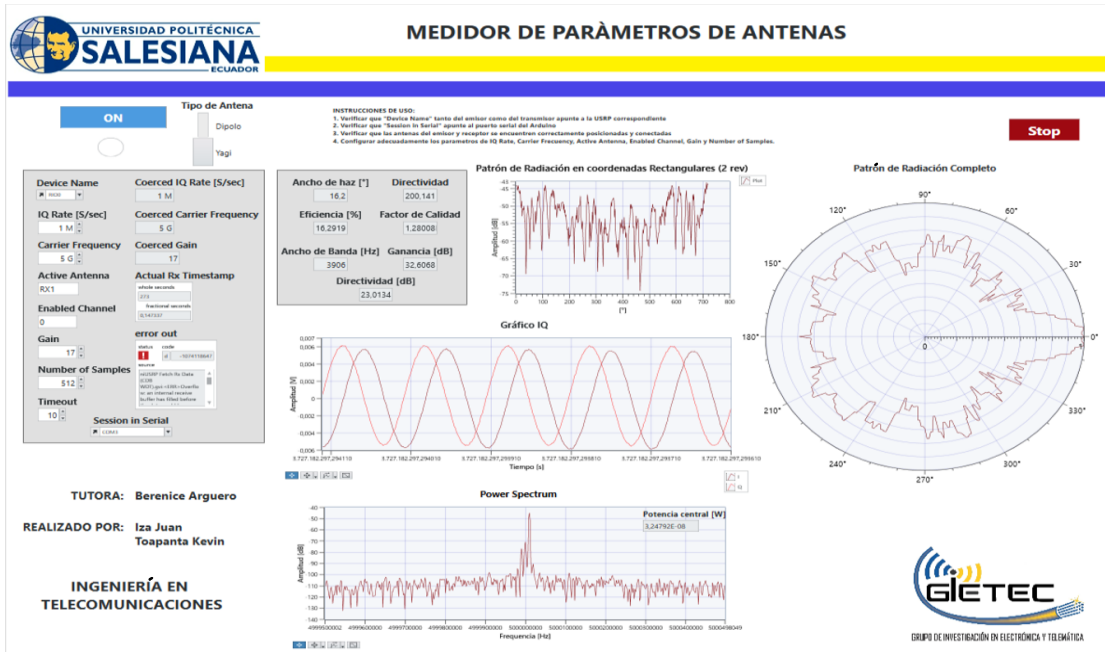


Diagrama de radiación en el plano vertical de la antena Yagi. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin.

Resultados experimentales con USRP 2944R.

En la Figura 4.9 se muestra la plantilla de los datos de los parámetros eléctricos de la antena Yagi a una distancia de separación de 30 cm entre la antena de transmisión y la de recepción.

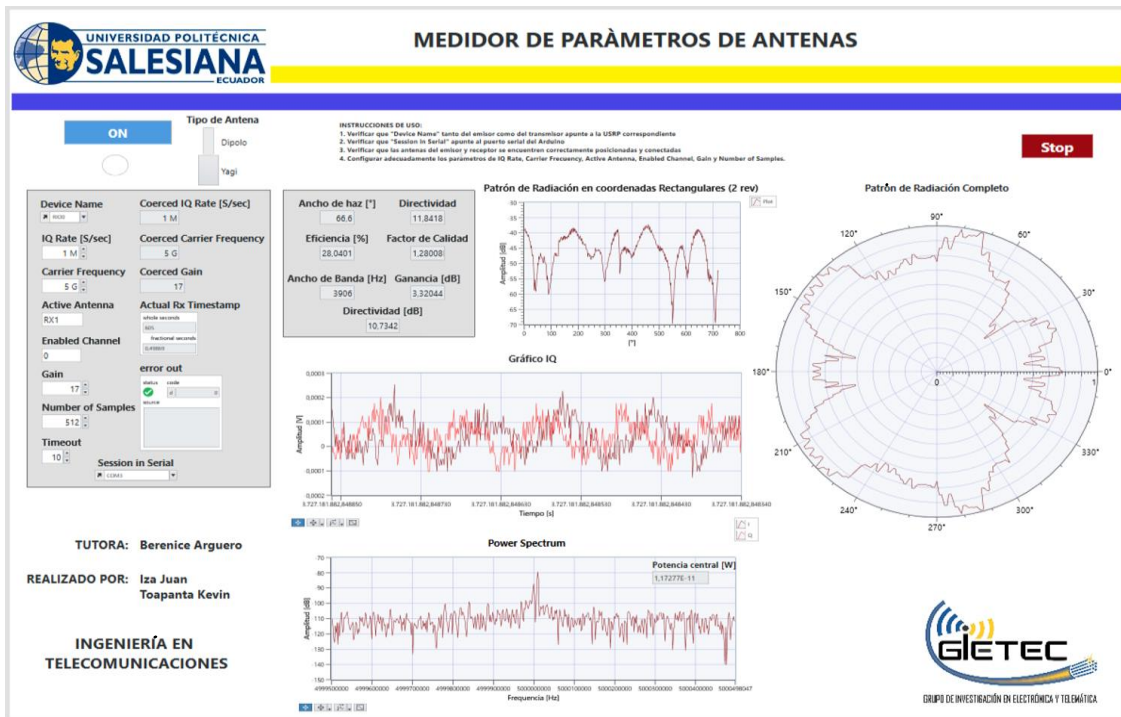
Figura 4.9 Datos a 30 cm de distancia



Plantilla con datos de los parámetros eléctricos de la antena Yagi. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

En la Figura 4.10 se muestra la plantilla de los datos de los parámetros eléctricos de la antena Yagi a una distancia de separación de 50 cm entre la antena de transmisión y la de recepción.

Figura 4.10 Datos a 50 cm de distancia.



Plantilla con datos de los parámetros eléctricos de la antena Yagi. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

En la tabla 4.2 se muestra el resultado de los valores obtenidos de los parámetros eléctricos de la antena Yagi y la simulación con el SDR USRP2944R a distancias de 30 y 50 centímetros.

Tabla 4.2 Valores de las simulaciones de la antena Yagi

Yagi					
Parámetros eléctricos	Simulación ANSYS HFSS	Pruebas SDR USRP2944R		Porcentaje de errores	
		30 cm de separación	50 cm de separación	30 cm de separación	50 cm de separación
Directividad	7.16	23.0134	10.7342	-221.41%	49.92%
Ganancia (dB)	8.6	32.6	3.32044	279.07%	61.39%
Eficiencia (%)	99.22	16.2919	28.0401	83.56%	71.74%
Ancho del haz (grados)	62	16.2	66	73.87%	-6.45%
Ancho de banda (Hz)	27,5(MHz)	3906	3906	99.99%	99.99%
Factor de calidad		1,28	128,008		

Datos de los parámetros eléctricos de la antena Yagi. Fuente: Iza Juan, Toapanta Kevin

Como se observa las gráficas del patrón de radiación de las figuras 4.9, 4.10, no son similares, entre la simulación del ANSYS HFSS y el medidor de parámetros con el USRP 2944R. Se presenta un lóbulo de máxima radiación en 0 grados con dos lóbulos laterales y un lóbulo posterior. En su gráfica se observa niveles de señales que varían considerablemente de una posición a otra, por efecto de interferencias producidas por las vibraciones del soporte giratorio. Otro factor para que no se tenga una curva continua es que los datos obtenidos se unen punto a punto cada 1.8° y esto hace sé que se observe gradas continuas.

Los parámetros eléctricos que se pueden apreciar en la tabla 6.2 no tienen similitud, hay distorsión en la toma de medidas de los diferentes niveles de energía y la antena no se sintoniza a la frecuencia de 5 GHz, entre los problemas se tiene: la exactitud en los cortes de las longitudes del reflector, dipolo y directores, donde se generan campos eléctricos en el contorno de los terminales de sus elementos y hace que la antena no este sintonizada a las medidas de la simulación de ANSYS HFSS. El alineamiento de los elementos de la antena Yagi afectan la ganancia y la directividad en la dirección de máxima radiación, obteniéndose energía dispersa en áreas lejanas al lóbulo principal. La suelda que se usó

en la unión del conector SMA y los polos, pudo variar la distancia de separación de los polos. La suma de estos inconvenientes afectó de gran manera a los datos enviados para el procesamiento en el software de programación LabVIEW NXG 4.0.

El ancho de banda difiere en las dos simulaciones realizadas. En la simulación con ANSYS se toma de la gráfica del parámetro S11 figura 3.12, donde el coeficiente de reflexión está a -21.1 [dB] lo que representa en porcentaje que el 0,8 % del total de la señal enviada a la antena es devuelta al sistema. Tomamos 3 [dB] sobre el valor del coeficiente de reflexión, que sería 18.1 y que representa al 1.5% del total de la señal enviada a la antena es devuelta al sistema.

CONCLUSIONES

Los algoritmos del software LabVIEW NXG y el hardware USRP 2944R, permitieron el funcionamiento del medidor de parámetros eléctricos de antenas Yagi y Dipolo; en la ganancia, eficiencia no superan el 44.10%, mientras que en la antena Yagi las medidas superan el 27.9%. Los resultados muestran que hay una diferencia en la ganancia de la antena dipolo de 44.10% para 30 cm y 37.12% para 50 cm. Y para la antena Yagi hay una diferencia en la ganancia para 30 cm de 279.07% y 61.39 % para 50 cm esto es debido a la variación de factores externos como: diseño de las antenas, vibración del soporte

En la parte experimental se llevó a cabo el funcionamiento para el cálculo de parámetros de antenas mediante el USRP2944R, como resultado se obtuvo tomas de medidas de los niveles de potencia que permiten graficar de los patrones de radiación de las antenas y en base al máximo valor de energía obtenida se realiza el proceso de la obtención de los parámetros eléctricos.

Las antenas Yagi y dipolo que se construyeron en la frecuencia de 5GHz, que fueron sometidas a pruebas de campo en el medidor de parámetros de antenas con el SDR USRP 2944R, presentan una gráfica del patrón de radiación de la antena Dipolo similar al obtenido en el ANSYS HFSS, con ligeras variaciones en las tomas de medidas que son efecto de interferencias causadas por el movimiento del motor paso a paso que produce vibraciones en la estructura giratoria. Mientras que el patrón de radiación de la antena Yagi no es similar comparando entre el ANSYS HFSS y el módulo diseñado. Esta distorsión se debe al tipo de construcción que se realizó, donde no existía un perfecto alineamiento de los dipolos, reflector y directores; también afecto los cortes en las terminaciones de los elementos que conforman la antena y la suelda que se utilizó en la unión de los terminales de los polos con el conector SMA, que provocaron el alargamiento de los elementos de la antena. Estas son las causas que no permitieron una eficiencia de la antena Yagi del 99.22% que se obtiene en el ANSYS HFSS.

RECOMENDACIONES

Elaborar un barrido de un determinado rango de frecuencias, para obtener gráficas de los parámetros S, parámetros Z, VSWR, y se puede visualizar en que frecuencia está sintonizando la antena de prueba.

Realización de un programa adicional dentro de la secuencia de 3 bloques que permita una interpolación de los datos obtenidos con el fin de tener un alisamiento más continuo de las líneas que unen las gráficas y no tener señales entrantes y salientes.

Realizar una primera simulación con el objetivo de obtener las primeras medidas de los elementos de las antenas y ver si comercialmente encontramos materiales de Cu y el diámetro AWG. Con esta información se debe cambiar a medidas reales que se tiene y se realiza una segunda simulación para que el programa entregue la longitud real de los brazos del dipolo.

En las antenas Yagi se debe tener en cuenta que el alineamiento de los elementos es importante para que el patrón de radiación no se distorsione y salga centrado en el valor de máxima radiación de potencia o lóbulo principal.

Desarrollar la programación del proyecto, medidor de parámetros de antenas en modo de transmisión half dúplex y/o full dúplex, para que el transmisor y el receptor se utilice en un solo equipo, esto permitirá la optimización de un equipo SDR USRP2944R en el laboratorio de telecomunicaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmadi, M. (02 de enero de 2022). *Udemy.com*. Obtenido de Udemy.com:
<https://www.udemy.com/course/a-to-z-of-labview-primary-programming-course/>
- Alvaro, G. (2021). *Implementacion de software defined radio en sistemas de comunicaciones actuales (tesis de grado)*. Sevilla.
- Arroyo, E. B. (2017). *Diseño y estudio de una antena de polarización circular para la banda Ka (Tesis de pregrado)*. Madrid.
- Asenjo, P. (2015). *Aplicación de algoritmos de optimización convexa a la síntesis de diagramas de radiación de arrays de antenas*. Madrid.
- Ayala, O. (2015). *Diseño y simulación de una antena yagi uda mediante el uso de algoritmos genéticos para el laboratorio de antenas de la universidad politecnica nacional*. Quito.
- Cadena, M. A. (2021). *Comparación de una antena dipolo con una antena de dos sipolos para banda de ondas milimétricas (Tesis de pregrado)*. Quito.
- Chimborazo, L. E. (2017). *Diseño de una antena microstrip con polarización circular para el laboratorio de antenas (Tesis de grado)*. Quito.
- David, G., José, R., & Pedro, G. (2012). Implementación y configuración de un receptor de radio defincido por software (SDR) para estudios de propagación. 4.
- Domínguez, J. D. (2014). *Implementación de un transmisor dfts-ofdm sobre una plataforma universal software radio peripheral*. Tijuana.
- Federico, L. (15 de julio de 2021). *Instituto de Ingeniería Eléctrica*. Obtenido de iie.fing.edu.uy: <https://iie.fing.edu.uy>
- García, C. (2011). *Radio definido por software usando matlab*. Santa Clara.
- Garzón, A., & Salamanca, I. (2016). *Diseno e implementación de software con interfaz gráfica para la medición de los parámetros de antenas en el laboratorio de la universidad Santo Tomás. (tesis de grado)*. Bogotá.
- Giro, U., Selva, C., & Almaguer, L. (2014). Implementaciòn de un radio receptor definido por software (sdr) para la banda de (30 khZ - 40 mhZ). *Convencion Internacional de Ciencias Tecnicas. Universidad de Oriente*, (pág. 5). Cuba.
- Hernado, J., Tomás, L., & José, R. (2015). *Comunicaciones móviles*. España: Campillo Nevado, S.A.
- Huamaní, R., & Pacheco, H. (2019). *Sistema electrónico para la caracterización en tiempo real del potencial de hidrógeno del rio opamayo en el valle de pampas-tayacaja*. Huancavelica, Perú.

- Instrument, N. (29 de Agosto de 2019). *NI*. Obtenido de USRP SOFTWARE DEFINED RADIOS: <https://www.ni.com/pdf/product-flyers/usrp-software-defined-radio.pdf>
- Juaréz, B. (2016). *ESTUDIO DE TÉCNICAS DE MODULACIÓN MEDIANTE RADIOS NI usrp*. Ciudad Universitaria.
- Ladino, E., & Parra, B. (2018). *Diseño y simulación de una antena en frecuencia de microondas para la proyección de un radioenlace entre la Universidad Católica de Colombia y la Universidad de los Andes (título de grado)*. Bogotá.
- Manobanda, D. (2015). *Sistema de análisis y registro de datos de espectros en el rango de 50mhz-2.2ghz a través de radio definida por software*. Ambato.
- Martinez, C., & Montemiranda, M. (2019). *Manual para el análisis y diseño de un puente y una casa a través del software ansys*. Pereira, Colombia.
- Merchán, C. V. (2016). *Diseño e implementación de un sistema radar utilizando sistemas SDR a través de tecnología USRP para aplicaciones topográficas(Tesis de pregrado)*. Riobamba.
- NI. (02 de enero de 2022). *www.ni.com*. Obtenido de [www.ni.com](https://www.ni.com/documentation/en/usrp-software-defined-radio-reconfigurable-device/latest/specs-usrp-2944/specs/): <https://www.ni.com/documentation/en/usrp-software-defined-radio-reconfigurable-device/latest/specs-usrp-2944/specs/>
- NI. (s.f.). *NI-USRP help*.
- NI, N. I. (02 de enero de 2021). *Labview NXG: Nuevas características para pruebas más inteligentes - NI Community*. Obtenido de <https://forums.ni.com/t5/NI-Blog-LATAM/LabVIEW-NXG-Nuevas-Character%C3%ADsticas-para-Pruebas-M%C3%A1s-Inteligentes/ba-p/3862317?profile.language=es>
- Rodriguez, B. (2019). *Diseño y simulación de una antena microstrip de rango de operación de super altas frecuencia (3.5 ghz a 6 ghz) para la evaluación de la tasa de absorción específica en tejidos humanos*. Bogotá.
- Rojas, L. C., & Tircio, L. W. (2018). *Análisis de saturación del espectro electromagnético en la banda no licenciada de 5ghz en la zona urbana de la ciudad de guayaquil y su impacto en el despliegue de equipos con tecnología WIFI 802.11.AC (Tesis de postgrado)*. Guayaquil.
- Salazar, A. M. (2016). *Diseño e implementación de software con interfaz gráfica para la medición de los parámetros de antenas en el laboratorio de antenas de la universidad santo tomás (Tesis de pregrado)*. Bogotá.
- Santos, A. (2020). *Diseño de una antena dipolo magneto eléctrica para ondas milimétricas en 5G*. Quito.
- Segura Claudia, S. M. (2016). *Diseño de un concentrador para aplicaciones de redes de sensores con capacidades de reconfiguración de parámetros por software. (TESIS DE GRADO)*. Bogotá.
- Sungur, G. (02 de enero de 2022). *Udemy.com*. Obtenido de [Udemy.com](https://www.udemy.com/course/labview-nxg-class-beginner-to-advanced/): <https://www.udemy.com/course/labview-nxg-class-beginner-to-advanced/>

Tapia, V., & Mena, P. (s.f.). *MANUAL INTRODUCTORIO A HFSS*. Chile.

Toledo, L. W. (2019). *Título: Evaluación del desempeño de Antenas Uda-Yagi con dipolos (Tesis de pregrado)*. Santa Clara.

Toledo, L. W. (219). *Evaluación del desempeño de antenas uda-yagi con dipolos impresos*. Santa Clara.

Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. México: PRENTICE-HALL INC.

Wireless, F. I. (04 de enero de 2022). *www.wirelessinnovation.org*. Obtenido de www.wirelessinnovation.org:
https://www.wirelessinnovation.org/Introduction_to_SDR