DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ENLACE INALÁMBRICO DE COMUNICACIÓN TERRESTRE A FRECUENCIA DE 1,27GHZ

CARLOS ANDRÉS GALVIS PINZÓN

REALIZADO CON LA ASESORÍA DE:

CRISTIAN ANDRÉS TRIANA INFANTE

UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ABRIL, 2024

UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

ÁREA DE ÉNFASIS: TELECOMUNICACIONES

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ENLACE INALÁMBRICO DE COMUNICACIÓN TERRESTRE A FRECUENCIA DE 1,27GHZ

CARLOS ANDRÉS GALVIS PINZÓN

REALIZADO CON LA ASESORÍA DE:

CRISTIAN ANDRÉS TRIANA INFANTE

Página de Aprobación. Inclusión de Acta de grado.

NOTA DE SALVEDAD

Según el artículo 37 del 14 de diciembre de 1989 del acuerdo 017, “La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia”.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, mis abuelos y tíos quienes me bridaron su apoyo incondicional durante todo mi proceso académico y me guiaron hacia el cumplimiento de mis metas.

AGRADECIMIENTOS

La culminación de este proyecto marca el final de una de las etapas más importantes de mi vida, una etapa en la que he enfrentado numerosos desafíos que no hubiera podido superar sin el apoyo incondicional de las personas que siempre han estado a mi lado.

En primer lugar, quiero expresar mi profunda gratitud a la Universidad El Bosque por brindarme la oportunidad de formarme como ingeniero y adquirir los conocimientos y habilidades necesarias para alcanzar esta meta. Asimismo, agradezco profundamente a mi madre, Jenny Marcela, por su confianza inquebrantable y su respaldo incondicional en el cumplimiento de mis objetivos. También quiero extender un agradecimiento especial al profesor Andrés Triana Infante, cuya orientación y guía fueron fundamentales en el desarrollo de cada etapa de este proyecto. De igual manera, estoy agradecido con la Universidad Nacional de Colombia por abrirme las puertas de sus laboratorios y brindarme las herramientas necesarias para llevar a cabo este trabajo.

Finalmente, expresó mi gratitud a mis compañeros, con quienes he compartido esta etapa de crecimiento y aprendizaje, así como a todos mis profesores, quienes generosamente han compartido sus experiencias y conocimientos, enriqueciendo mi formación académica y personal.

RESUMEN

El presente documento expone el diseño e implementación de un radioenlace inalámbrico terrestre de corto alcance en la banda de 1,27 GHz para la transmisión de información. Dicho enlace se planteó como una solución de comunicaciones para respaldar futuros sistemas de monitoreo remoto en zonas de difícil acceso como la Amazonía colombiana.

En una primera etapa, se evaluaron diferentes opciones de antenas comerciales óptimas para establecer el enlace punto a punto en la frecuencia de operación especificada. Posteriormente, se desarrollaron en MATLAB códigos para implementar diversos esquemas de modulación digital como QPSK y QAM sobre plataformas de radio definida por software USRP. Estas técnicas fueron aplicadas para transmitir información de forma inalámbrica del radioenlace.

Los resultados experimentales demostraron un desempeño diferencial según el esquema y tipo de datos. La transmisión de texto, tanto con 16-QAM como con QPSK, logró una tasa de error despreciable permitiendo su correcta transmisión y recepción. Se concluyó que, si bien el radioenlace fue exitoso para texto corto, se requieren esquemas de modulación/codificación más robustos y potencias mayores para permitir una transmisión confiable de imágenes de alta resolución en entornos desafiantes.

Palabras Clave: Telecomunicaciones, Radioenlace, Modulación digital.

ABSTRACT

This document exposes the design and implementation of a short-range terrestrial wireless radio link in the 1.27 GHz band for the transmission of information. This link was proposed as a communications solution to support future remote monitoring systems in difficult-to-access areas such as the Colombian Amazon.

In a first stage, different optimal commercial antenna options were evaluated to establish the point-to-point link at the specified operating frequency. Subsequently, codes were developed in MATLAB to implement various digital modulation schemes such as QPSK and QAM on USRP software-defined radio platforms. These techniques were applied to transmit information wirelessly from the radio link.

The experimental results demonstrated differential performance depending on the scheme and data type. Text transmission, both 16-QAM and QPSK achieved a negligible error rate allowing correct transmission and reception. It was concluded that while the radio link was successful for short text, more robust modulation/coding schemes and higher powers are required to enable reliable transmission of high-resolution images in challenging environments.

Keywords: Telecommunications, Radio link, Digital modulation.

LISTA DE SÍMBOLOS

d Distancia

dB Decibelios

dBi Decibelios de ganancia

G Ganancia

GHz Giga hercios

Lbf Pérdida básica de transmisión en el espacio libre

mm Milímetros

MHz Mega hercios

W Vatios

λ Longitud de onda

Ω Ohmios

LISTA DE ABREVIATURAS

ANE Agencia Nacional del Espectro

AGC Amplificador de ganancia automático

BER Tasa de Error de Bits

OFDM Multiplexación por división de frecuencias ortogonales

PSK Modulación por desplazamiento de fase

RF Radio frecuencia

SDR Radio definida por software

QAM Modulación por amplitud en cuadratura

QPSK Desplazamiento de fase en cuadratura

UHF Ultra alta frecuencia

USRP Sistema Periférico Universal de Radio

TABLA DE CONTENIDOS

Pág.

1. INTRODUCCIÓN 17

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 18

2.1 Antecedentes y Estado del Arte 18

2.1.1 Nivel Internacional 18

2.1.2 Nivel Nacional 19

2.2 Descripción y Formulación del Problema 20

2.2.1 Contexto 20

2.2.2 Planteamiento del problema 20

2.3 Justificación 21

2.4 Objetivos 22

2.4.1 Objetivo General 22

2.4.2 Objetivos Específicos 22

2.5 Alcance y Limitaciones del Proyecto 22

3. MARCO DE REFERENCIA 23

3.1 Marco Teórico o Conceptual 23

3.1.1 Espectro Electromagnético 23

3.1.2 Radio Enlace 25

3.1.3 Pérdidas en el Espacio Libre 28

3.1.4 Tasa de error de bits (BER) 29

3.1.5 Antenas 30

3.1.6 Tipos de Antenas 33

3.1.7 SDR 36

3.1.8 USRP 38

3.1.9 Esquemas de Modulación y Modulación Digital 39

4. DESARROLLO DEL PROYECTO DE GRADO 46

4.1 Requerimientos 46

4.1.1 Requerimientos funcionales 46
4.1.2 Requerimientos de calidad 46
4.2 Metodología del Diseño 47
4.2.1 Investigación y documentación 47
4.2.2 Elección de la frecuencia del enlace 48
4.2.3 Elección de antenas 49
4.2.4 Elección del software y el dispositivo USRP 50
4.2.5 Primer diseño conceptual del sistema 51
4.2.6 Elección de los esquemas de modulación. 52
4.2.7 Implementación de los esquemas de modulación en MATLAB 53
4.2.8 Configuración de las etapas de transmisión y recepción 54
4.2.9 Implementación del radioenlace 54
4.3 Descripción técnica del producto 55
4.3.1 Antenas utilizadas en el radioenlace 56
4.3.1 Diseño final del radioenlace 57
4.3.2 Funcionamiento de los esquemas de modulación en MATLAB 59
4.3.3 Funcionamiento del transmisor 71
4.3.4 Funcionamiento del receptor 74
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 78
5.1 Resultados de la transmisión de texto usando modulación 16-QAM 79
5.2 Resultados de la transmisión de texto usando modulación QPSK 81
6. CONCLUSIONES 83
7. RECOMENDACIONES 85
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 86

LISTA DE TABLAS

Tabla Pág.

Tabla 1. Clasificación de las bandas de Radiofrecuencia según la UIT.[9] 24

Tabla 2.Tabla de verdad QPSK 44

Tabla 3. Asignación del rango de frecuencias entre 1240 y 1300MHz dentro del Cuadro Nacional de Atribución de Bandas.[40].....49

Tabla 4. Lista de antenas tenidas en cuenta para la implementación del radio enlace. 50

Tabla 5. Generador de los símbolos para la modulación QAM.....61

Tabla 6. Representación del valor de modulación QPSK para cada par de bits.....66

Tabla 7. Comparación entre los símbolos modulados transmitidos y los símbolos modulados recibidos. 80

Tabla 8. Análisis de los requerimientos funcionales. 83

Tabla 9. Análisis de los requerimientos de calidad. 83

LISTA DE FIGURAS

Figura Pág.

Figura 1. Diagrama de bloques del sistema Tx/Rx[1] 18

Figura 2. Espectro Electromagnético.[7] 23

Figura 3. Diagrama de bloques básico de un transmisor. 26

Figura 4. Diagrama de bloques básico de un receptor. 27

Figura 5. Ilustración de un enlace de radiofrecuencia entre dos puntos. [12] 27

Figura 6. Patrón de radiación de una antena omnidireccional. [20] 31

Figura 7. Diseño básico de una antena tipo parche.[17] 35

Figura 8. Diagrama típico de un SDR. [31] 37

Figura 9. diagrama de típico de un USRP. 38

Figura 10. Gráfica de las proyecciones I/Q[36] 41

Figura 11. Constelación 16-QAM. 43

Figura 12. Diagrama de constelación QPSK. [39] 45

Figura 13.Diagrama de bloques inicial del radioenlace. 52

Figura 14. Diagrama de la implementación física del radioenlace. 55

Figura 15. Antena TBMA4 56

Figura 16. Patrón de radiación de los planos E y H de la antena a una frecuencia de 1,3 GHz.[42] 57

Figura 17. Diagrama de bloques del transmisor 58

Figura 18. Diagrama de bloques del receptor 59

Figura 19. Código de la modulación m-QAM para texto. 60

Figura 20. Parte de los símbolos modulados. 61

Figura 21. Código de la demodulación m-QAM para texto 62

Figura 22. Resultado del código de modulación m-QAM para texto 62

Figura 23. código de la modulación m-QAM para imágenes B/N. 63

Figura 24. Parte de los símbolos modulados. 64

Figura 25. Código de la demodulación para imágenes B/N. 64

Figura 26. comparación entre la imagen original y la imagen demodulada generada por el código de modulación QAM.....65

Figura 27. Código de la modulación QPSK para texto.....66

Figura 28. Demostración del proceso de asignación de símbolo a cada dibit. 67

Figura 29. Cadena de símbolos modulados por QPSK.....68

Figura 30. Código de la demodulación QPSK para cadenas de texto. 68

Figura 31. Resultado dado por el código de modulación QPSK para texto. 69

Figura 32. Código de la modulación QPSK para imágenes B/N.....69

Figura 33. símbolos de la imagen modulados con QPSK.....70

Figura 34. Código de la demodulación QPSK para imágenes B/N. 70

Figura 35. comparación entre la imagen original y la imagen demodulada generada por el código de modulación QPSK.....71

Figura 36. Diagrama del generador de la señal. 72

Figura 37. Código de la implementación del filtro RRC en el transmisor 73

Figura 38. Diagrama del proceso que realiza la etapa del compensador de frecuencia y fase. ……76

Figura 39. Diagrama de del funcionamiento del detector del preámbulo.....77

Figura 40,. Diagrama del funcionamiento del sincronizador frames.....77

Figura 41. implementación del radioenlace. 79

Figura 42. Diagrama de constelación de la información recibida usando 16-QAM para el envío de texto.....80

Figura 43. Comparación entre el texto enviado y el texto recibido por el radioenlace usando modulación 16-QAM 81

Figura 44. Diagrama de constelación de la información recibida usando QPSK para el envío de texto.....82

Figura 45. Comparación entre el texto enviado y el texto recibido por el radioenlace usando modulación QPSK 82

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual, las comunicaciones inalámbricas desempeñan un papel crucial en la conectividad de la sociedad moderna, permitiéndonos compartir, intercambiar y trasladar información de forma rápida y eficiente alrededor del mundo. Los radioenlaces terrestres punto a punto representan una de las alternativas de transmitir información de forma inalámbrica, usando la propagación de ondas electromagnéticas a través del aire como medio de transmisión. La importancia de los radioenlaces radica en la facilidad y fiabilidad de realizar conexiones en áreas remotas facilitando la comunicación entre dos ubicaciones apartadas entre sí por largas distancias, siendo capaces incluso de sortear obstáculos como las edificaciones en las grandes urbes o la densa vegetación en la selva. Es por esto por lo que la Universidad Nacional de Colombia en conjunto con la Universidad El Bosque dentro de su proyecto "Desarrollo de un sistema de monitoreo remoto para identificar presiones y amenazas a los pueblos indígenas en aislamiento y la biodiversidad del Parque Nacional Natural Río Puré" han planteado el uso de un radioenlace como medio para transmitir información entre dos ubicaciones.

El presente proyecto tiene como propósito servir como investigación y punto de partida para sentar las bases del diseño y despliegue de un radioenlace terrestre que opere de forma confiable bajo las particularidades geográficas y climatológicas de la Amazonía colombiana. Para la realización del proyecto se hace uso de los dispositivos USRP (Sistema periférico universal de radio) como estaciones de transmisión y recepción, algunos esquemas de modulación digital como QAM (modulación de amplitud en cuadratura) y QPSK (modulación por desplazamiento de fase en cuadratura) y software para el procesamiento de las señales como MATLAB.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Antecedentes y Estado del Arte

2.1.1 Nivel Internacional

El desarrollo de sistemas en el ámbito de las telecomunicaciones, específicamente en la transmisión y recepción de información por medios inalámbricos, es bastante amplio. Por ejemplo, en el trabajo: implementación de un sistema de transmisión y recepción inalámbrica OFMD de imagen en ambiente real usando USRP y LabVIEW[1] se describe la implementación de un sistema de transmisión y recepción de imágenes usando un sistema periférico universal de radio (USRP por sus siglas en ingles) y LabVIEW, un software de procesamiento en tiempo real desarrollado por National Instruments.

El sistema fue diseñado usando OFDM (Multiplexación por división de frecuencias ortogonales) como técnica de transmisión, además la información a transmitir se modula usando QPSK y 16-QAM.

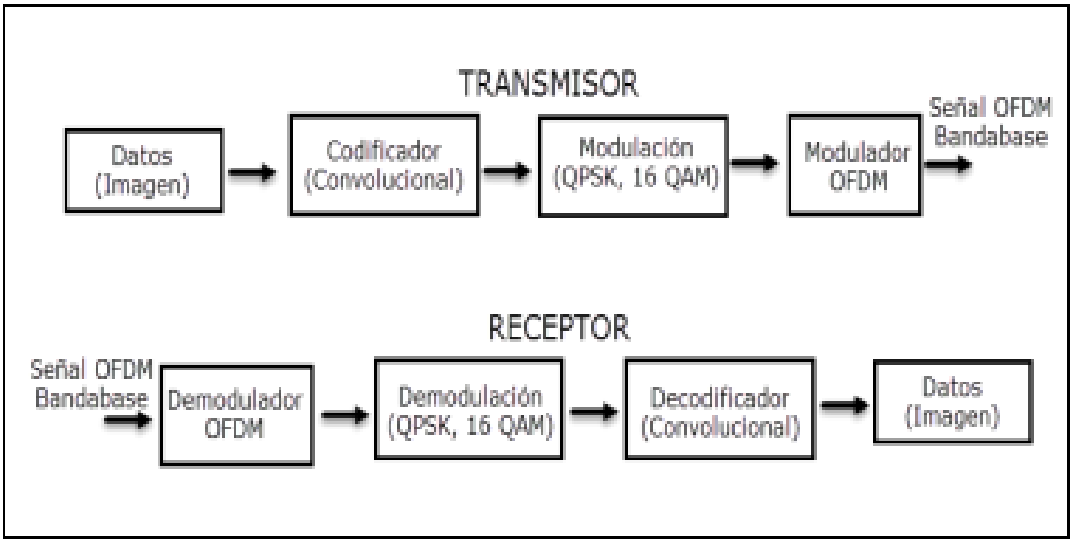

Figura 1. Diagrama de bloques del sistema Tx/Rx[1]

Asimismo, la Universidad Politécnica de Valencia publicó un proyecto sobre el diseño y configuración de un radioenlace digital para un servicio de emergencia [2]. En este proyecto, se diseñó un radioenlace cuyo objetivo era brindar servicio a un parque de bomberos. Para el diseño, se consideraron esquemas de modulación como QAM, BPSK o QPSK. Además, se realizó un estudio de las condiciones del terreno y los cálculos correspondientes a diferentes atenuaciones, tales como pérdidas por lluvia, por difracción, por absorción atmosférica, entre otras

2.1.2 Nivel Nacional

En ámbito nacional se publicó en la Universidad Miliar Nueva Granada un proyecto sobre el desarrollo de un sistema de transmisión y recepción de imágenes con modulación QPSK usando USRP y GNU Radio como software principal[2].

Este proyecto describe una aproximación de un sistema de comunicación alternativo para la transmisión de información usando tecnología de bajo costo y a su vez busca establecer la viabilidad de implementación de dispositivos SDR-RTL para la elaboración de prototipos de comunicación robusta teniendo en cuenta también el uso de software libre.

De forma similar, unos investigadores de la universidad Autónoma de occidente en la ciudad de Santiago de Cali desarrollaron un prototipo de un radioenlace descrito en su proyecto “Sistema de comunicación SDR para modulaciones PSK y QAM”[3] que sirve como punto de partida para la utilización de dispositivos USRP en este tipo de implementaciones. Su documento se plantea como un documento practico enfocado al aprendizaje sobre el uso de los sistemas SDR y la modulación digital en los radioenlaces.

2.2 Descripción y Formulación del Problema

2.2.1 Contexto

El Parque Nacional Natural Rio Puré es un área protegida que representa una gran riqueza cultural, étnica y natural para nuestro país, pero desafortunadamente durante bastante tiempo los pueblos indígenas en aislamiento localizados en esta zona se han visto afectados por presiones y amenazas por parte de grupos de minería ilegal, exploración petrolera, tráfico de fauna y flora, extracción selectiva de maderas, etc. quienes amenazan no solo la tranquilidad de los pueblos indígenas, sino que también la biodiversidad del parque[4], es por esto que la Universidad Nacional de Colombia en conjunto con la Universidad El Bosque y otras entidades trabajan en un proyecto titulado "Desarrollo de un sistema de monitoreo remoto para identificar presiones y amenazas a los pueblos indígenas en aislamiento y la biodiversidad del Parque Nacional Natural Río Puré" cuyo objetivo es desarrollar e implementar un sistema de monitoreo remoto con el fin de identificar a estos grupos ilegales. Para lograrlo, se necesita suficiente trabajo de investigación en el área para diseñar e implementar un enlace inalámbrico de comunicación terrestre, con un módulo de comunicación que permita recibir la información captada por las cámaras del sistema de monitoreo cada evento.

2.2.2 Planteamiento del problema

Se requiere un radioenlace de comunicaciones inalámbrico terrestre entre dos antenas que permita la transferencia de información teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas, ambientales y de infraestructura presentes en el área del parque natural.

2.3 Justificación

El módulo de comunicaciones del proyecto anteriormente mencionado requiere de un enlace terrestre para enviar información que es captada por cámaras hacia una antena ubicada en el mismo parque, que después subirá las imágenes a la red por medio de una conexión satelital. Este enlace debe funcionar bajo las condiciones de la Amazonía colombiana que no son aptas para los medios de comunicación por cableado, y en particular en el Parque Nacional Río Puré, ya que no hay acceso de infraestructura que permita la transmisión de las señales obtenidas por el sistema de monitoreo que se piensa desarrollar. Por tanto, la forma más idónea de realizar estos enlaces de comunicación es a través de la tecnología de enlaces inalámbricos que, aunque presenta cierto tipo de atenuaciones debido a las condiciones atmosféricas y ambientales tales como la altitud, la presión del aire y la densidad de vapor de agua en el ambiente[5], no se verían afectadas por las distintas condiciones desfavorables para los enlaces por cableado, tales como la selva, los animales que allí habitan o los bajos niveles de infraestructura del lugar.

La frecuencia de 1,27 GHz es una banda dispuesta por la ANE como banda para uso aficionado[6], por lo que su uso está disponible para realizar este proyecto. Además, hay distintos satélites trabajando con frecuencias cercanas, lo cual permitiría que, al usar este enlace en el proyecto de la Universidad Nacional de Colombia, se pueda adecuar fácilmente para realizar un enlace de comunicación tierra-satélite, el cual es un apartado que allí se espera realizar.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un enlace inalámbrico terrestre en un rango de frecuencias alrededor de 1,27GHz que sirva como medio para la transmisión de imágenes.

2.4.2 Objetivos Específicos

1. Evaluar la aptitud o competencia de antenas comerciales para establecer un enlace inalámbrico entre dos puntos a una frecuencia alrededor de los 1.27GHz.
2. Implementar el enlace de comunicación a una frecuencia de alrededor de los 1,27GHz.
3. Evaluar el desempeño del enlace en el envío de información en términos del uso de algoritmos de codificación, decodificación y modulación.
4. Validar experimentalmente el funcionamiento del enlace implementado en términos de tasa de error de bits.

2.5 Alcance y Limitaciones del Proyecto

Se realizará el diseño e implementación de un enlace inalámbrico terrestre entre dos antenas (emisor y receptor) con línea directa de vista a una frecuencia alrededor de 1.27GHz escogida teniendo en cuenta la disponibilidad de espectros presentada en los documentos de la ANE [6]. El sistema será capaz de transmitir imágenes captadas por cámaras, y será implementado teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas de la ciudad de Bogotá. Se tendrá un programa para codificar, decodificar y visualizar las imágenes transmitidas por el enlace inalámbrico.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Marco Teórico o Conceptual

3.1.1 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético se refiere al rango completo de frecuencias o longitudes de onda de la radiación electromagnética. Esta consiste en una forma de energía que se propaga a través del espacio libre en forma de ondas guiadas, las cuales están constituidas por campos eléctricos y magnéticos oscilantes y perpendiculares entre sí. Dichas ondas electromagnéticas se desplazan a la velocidad de la luz.

La frecuencia representa el número de oscilaciones de la onda por unidad de tiempo. Específicamente, indica la cantidad de ciclos que completa una onda senoidal electromagnética durante cierto período.

En función de su frecuencia o longitud de onda, las ondas electromagnéticas pueden clasificarse en diversos tipos. Algunos ejemplos son los rayos X, rayos gamma, radiación ultravioleta, infrarroja, microondas y ondas de radio. Cada uno posee diferente energía, así como distinta interacción con la materia[7]. En la figura 2 se presenta la división del espectro electromagnético según su longitud de onda.

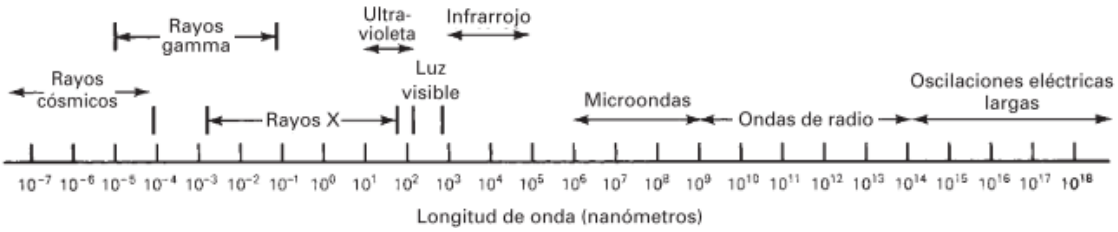

Figura 2. Espectro Electromagnético.[7]

A continuación, se presenta algunas de las bandas de radiofrecuencia más relevantes dentro de las telecomunicaciones.

3.1.1.1 Las Microondas

Las microondas, se definen como ondas electromagnéticas que oscilan generalmente entre 300 MHz y 300 GHz, y cuyas longitudes de onda abarcan el rango de 1 m a 1 mm. Estas ondas desempeñan un papel crucial en las telecomunicaciones, siendo ampliamente empleadas en radiodifusión debido a su capacidad para atravesar la atmósfera con menor absorción que otras longitudes de onda mayores. El espectro de microondas ofrece una ventaja significativa en términos de ancho de banda en comparación con otras partes del espectro de radio, siendo útil para aplicaciones como la televisión por cable y el acceso a Internet mediante cable coaxial[8].

Según el estándar de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones)[9], las bandas de radiofrecuencia que comprenden las microondas se dividen en UHF, SHF Y EHF. Que tienen aplicaciones como la televisión, la radio, el radar, la telefonía móvil, la radionavegación o la transmisión de datos.

Tabla 1. Clasificación de las bandas de Radiofrecuencia según la UIT.[9]

Nombre	Abreviatura Inglesa	Frecuencias
Ultra alta frecuencia	UHF	300-3000 MHz
Super alta frecuencia	SHF	3-30 GHz
Extra alta frecuencia	EHF	30-300 GHz

Las frecuencias ultra altas (UHF) son de especial interés para el desarrollo del proyecto por lo que abordaremos más en profundidad sobre estas a continuación.

3.1.1.2 Frecuencias Ultra Altas (UHF)

Las frecuencias ultra altas (UHF, de ultrahigh frequencies). Son señales entre los límites de 300 MHz a 3 GHz, y las usa la emisión comercial de televisión, en los servicios móviles de comunicaciones terrestres, teléfonos celulares, algunos sistemas de radar y de navegación, y los sistemas de radio por microondas y por satélite. Hablando con generalidad, se considera que las frecuencias mayores que 1 GHz son de microondas, y eso incluye al extremo superior del intervalo de UHF[10].

Debido a su buena propagación en línea de vista, baja susceptibilidad al ruido en comparación a otras bandas y ancho de banda más amplio para la transmisión de datos[11]. Esta banda de frecuencias es ampliamente usada en la implementación de radio enlaces, sobre todo en casos en los que la señal deba sortear diversos obstáculos, siendo capaz de atravesar vegetación y construcciones como edificios manteniendo una señal fuerte incluso a largas distancias.

3.1.2 Radio Enlace

Un radioenlace es un sistema electrónico de comunicación inalámbrico que usa ondas de radio para transmitir información entre dos o más puntos mediate el uso de ondas de radiofrecuencia.

El sistema más básico de radioenlace está formado por 3 elementos principales:

- 1 transmisor
- 1 receptor
- Medio de propagación

Un transmisor es un dispositivo electrónico que se encarga de generar y convertir una señal eléctrica que contiene información (voz, datos o imágenes) en una señal electromagnética,

modulándola sobre una portadora de radiofrecuencia (RF) para que pueda ser irradiada a través de un medio, normalmente el espacio libre.

Los transmisores realizan funciones esenciales dentro de un sistema de comunicación como la codificación, modulación y conversión a frecuencia de transmisión de la señal de información. También se encargan de suministrar a la antena transmisora la potencia de salida necesaria, amplificando la señal modulada para que se pueda transmitir correctamente en función del alcance y cobertura requeridos

En la figura 3 observamos un diagrama de bloques básico de un transmisor, en este tenemos un generador de señal que se encarga de generar la señal que contiene la información que se desea transmitir, esta señal pasa por un modulador que se encarga de modularla usando algún esquema de modulación, luego la señal pasa por un amplificador de radiofrecuencia con el fin de obtener la potencia deseada para realizar la transmisión.

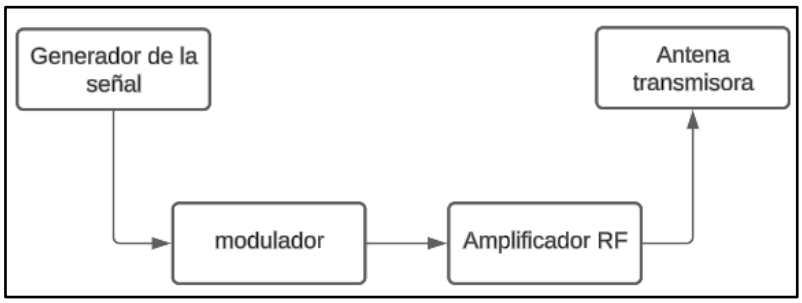

Figura 3. Diagrama de bloques básico de un transmisor.

Un receptor es un dispositivo electrónico que capta una señal de radiofrecuencia (RF) modulada transmitida a través de un medio, para luego demodularla y recuperar la información original contenida en la señal moduladora. El receptor realiza el proceso inverso al transmisor[12].

La figura 4 muestra el diagrama de bloques para un transmisor, se observa que es funcionamiento del receptor es, en esencia, un proceso inverso al que realiza el transmisor.

Primero la señal es recibida por la antena, luego el amplificador aumenta la potencia de la señal y la pasa al demodulador para finalmente obtener la información que originalmente fue enviada por el transmisor.

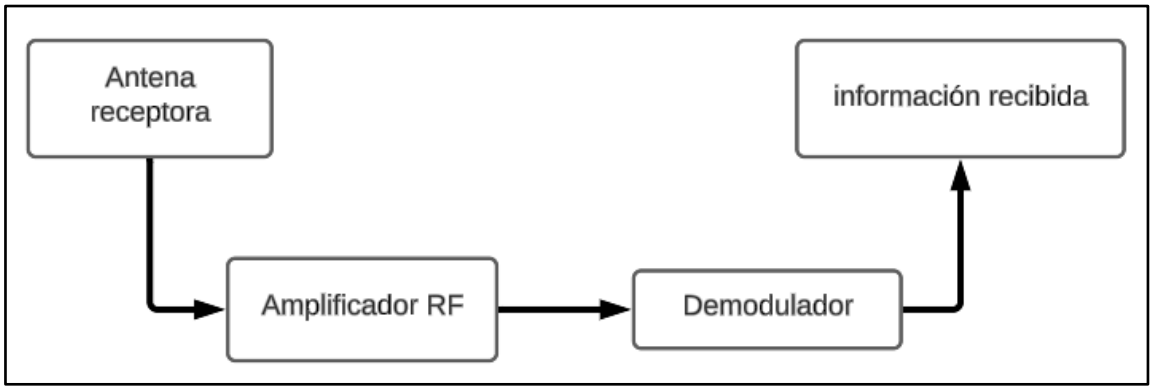

Figura 4. Diagrama de bloques básico de un receptor.

En la figura 5 se muestra una ilustración de un radioenlace inalámbrico, donde se observa la transmisión de información entre dos estaciones, esta información viaja por el espacio libre donde es susceptible a presentar atenuaciones o perdidas debido al entorno en el que se transmite.

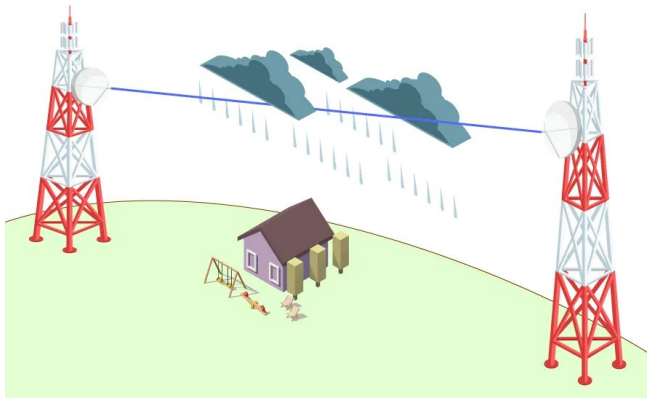

Figura 5. Ilustración de un enlace de radiofrecuencia entre dos puntos. [12]

Las pérdidas que experimenta la señal de radiofrecuencia en su propagación a través del espacio libre. El medio físico por cual se desplaza la onda electromagnética genera

atenuación gradual de su potencia, situación que es necesario modelar correctamente para asegurar los niveles adecuados de recepción.

De modo que, a continuación, se abordará sobre los principios básicos, cálculos y demás consideraciones respecto a las pérdidas en el espacio libre, un factor primordial dentro de cualquier solución inalámbrica de telecomunicación entre dos puntos.

3.1.3 Pérdidas en el Espacio Libre

La pérdida en el espacio libre mide la dispersión de la potencia en un espacio libre sin obstáculos[13]. Se define como la pérdida que produce una onda electromagnética cuando se propaga en el espacio vacío, esta aumenta directamente con la distancia y la frecuencia. Según la Rec. UIT-R P.525-2[14], para las pérdidas por el espacio libre cuando se trata de un enlace punto a punto, es preferible calcular la atenuación en el espacio libre entre antenas isotrópicas, denominada también pérdida básica de transmisión en el espacio libre que se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$L_{bf} = 20log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)\ dB \qquad (1)$$

Donde:

L_{bf}: pérdida básica de transmisión en el espacio libre (dB)

d: distancia (m)

λ: longitud de onda (m)

La ecuación (1) puede también escribirse en función de la frecuencia en vez de la longitud de onda:

$$L_{bf} = 32{,}4 + 20\log f + 20\log d \qquad (2)$$

Donde:

f: frecuencia (MHz)

d: distancia (Km)

Una forma de medir y evidenciar la implicación que tienen las perdidas en el espacio libre en la eficiencia de un radioenlace es el incremento en la tasa de error de bits (BER). En consecuencia, resulta clave caracterizar este parámetro para especificar los niveles admisibles de BER y así garantizar una disponibilidad y calidad adecuadas en el radioenlace.

3.1.4 Tasa de error de bits (BER)

La Tasa de Error de Bits (BER) es una medida del número de bits que se transmiten o reciben incorrectamente a través de un canal de comunicaciones. Por lo general, se expresa como un porcentaje o una fracción del número total de bits que se transmiten[15].

- Una BER de 0 significa que no hay errores y que todos los bits se transmiten o reciben correctamente.
- Una BER de 1 indica que todos los bits se transmiten o reciben incorrectamente.

La tasa de error de bits ve influenciada por diversos factores como las características y calidad de propagación del canal, el tipo de modulación empleada para transportar la señal, el ancho de banda disponible y los niveles de ruido e interferencia presentes. Un aumento de estos últimos provoca una mayor tasa de BER. En contraste, a mayor ancho de banda, la señal dispone de más redundancia para recuperarse de los errores. Asimismo, modulaciones más robustas admiten peor relación señal-a-ruido. En todos los casos, resulta deseable minimizar el valor de BER para incrementar la integridad de los datos transmitidos.

3.1.5 Antenas

El IEEE Standard Definitions of Terms (IEEE Std 145–1983) define la antena como "un medio para emitir o recibir ondas de radio"[16]. En otras palabras, la antena es la estructura de transición de las ondas electromagnéticas entre el espacio libre y un dispositivo de guía y viceversa.[17]

Para describir el rendimiento de una antena, es necesario definir varios parámetros, a continuación, se definen algunos de los más importantes.

3.1.5.1 Patrón de Radiación

El patrón de radiación de una antena se define como "una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales. En la mayoría de los casos, el patrón de radiación se determina en la región de campo lejano y se representa en función de las coordenadas direccionales[18]. Los patrones de radiación suelen ser representados de dos formas, el patrón de elevación y el patrón de azimuth. El patrón de elevación constituye una vista lateral que ilustra el perfil vertical del lóbulo o haz principal, indicando la variación angular en el plano vertical de la potencia radiada. Por su parte, el diagrama de azimuth corresponde a una perspectiva superior que describe el patrón horizontal de radiación, señalando el ángulo efectivo en el plano horizontal donde la antena emite con mayor efectividad. La combinación tridimensional de ambos diagramas entrega una representación completa del patrón radiante como se observa en la figura 6, evidenciando su forma y directividad para cualquier orientación angular de la antena, facilitando así una adecuada caracterización y entendimiento del desempeño en la propagación guiada de las ondas electromagnéticas[19].

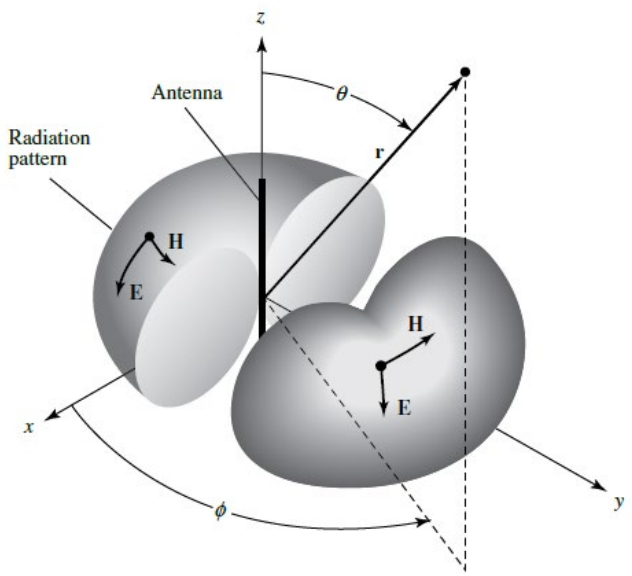

Figura 6. Patrón de radiación de una antena omnidireccional. [20]

3.1.5.1 Intensidad de Radiación

La intensidad de radiación en una dirección determinada se define como "la potencia radiada desde una antena por unidad de ángulo sólido". La intensidad de la radiación es un parámetro de campo lejano y se puede obtener simplemente multiplicando la densidad de la radiación por el cuadrado de la distancia[21]. En forma matemática se expresa como:

$$U = d^2 W_{rad} \tag{3}$$

Donde

U = Intensidad de radiación

W_{rad} = Densidad de radiación

3.1.5.2 Directividad

La directividad de una antena se define como "la relación entre la intensidad de la radiación en una dirección determinada desde la antena y la intensidad de la radiación promediada en todas las direcciones". La intensidad de radiación promedio es igual a la potencia total radiada por la antena dividida por 4π. Si no se especifica la dirección, se da a entender la dirección de máxima intensidad de radiación". Dicho de manera más simple, la directividad de una fuente no isotrópica es igual a la relación entre su intensidad de radiación en una dirección dada y la de una fuente isotrópica[22]. En forma matemática se puede expresar como:

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \tag{4}$$

3.1.5.3 Ganancia

La ganancia de una antena es la relación entre la potencia que entra en una antena y la potencia que sale de esta. La ganancia es comúnmente medida en dBi's, y se refiere a la comparación de la energía que sale de la antena en cuestión, con la energía que saldría de una antena isotrópica. Una antena isotrópica es aquella que cuenta con un patrón de radiación esférico perfecto y una ganancia lineal unitaria[23].
La ganancia de una antena se puede expresar como:

$$G = 4\pi \frac{U(\theta,\ \phi)}{P_{in}} \tag{5}$$

3.1.5.4 Polarización

La polarización de una antena en una dirección dada se define como "la polarización de la onda radiada cuando ésta se encuentra excitada". La polarización se define como la dirección

en la que la antena radia el máximo de potencia, ya que los enlaces se diseñan para que sean eficientes en la dirección de máxima radiación. La polarización de la onda radiada varía con la dirección respecto al centro de la antena, por lo que diferentes partes del diagrama de radiación pueden tener diferentes polarizaciones[24].

3.1.6 Tipos de Antenas

Existen varios tipos de antenas con características diferentes que las hacen más o menos eficientes en distintas aplicaciones, se puede den destacar tres tipos principales los cuales son: antenas de hilo, antenas planas y antenas de apertura

3.1.6.1 Antenas de hilo

Las antenas de hilo, también conocidas como antenas de alambre o dipolos, son uno de los tipos más simples y comunes de antenas utilizadas en sistemas de comunicación. Estas antenas consisten esencialmente en un conductor largo y delgado, generalmente un cable metálico, que se extiende horizontal o verticalmente según el diseño específico[25]. Un ejemplo de antenas de hilo son las antenas Yagi que se explican a continuación.

Antenas Yagi

Nombradas en honor a su creador, el japonés Hidetsugu Yagi, las antenas tipo Yagi se erigen como pioneras entre las antenas convencionales. Su diseño se distingue por la ingeniosa combinación de un dipolo básico con elementos adicionales conocidos como reflectores y directores, también denominados elementos parásitos. Esta configuración simple posibilita la creación de antenas altamente eficientes y notablemente direccionales.

Estas antenas constituyen una disposición de elementos independientes, donde solo uno de ellos se encarga de transmitir las ondas de radio. La cantidad de elementos, en particular el número de elementos directores desempeña un papel crucial en la determinación de la

ganancia y la dirección de la antena. Aunque las antenas Yagi no alcanzan el mismo nivel de direccionalidad que las antenas parabólicas, superan en este aspecto a las antenas panel, ofreciendo así un equilibrio notable entre rendimiento y directividad[26].

3.1.6.2 Antenas planas

Las antenas planas, también conocidas como antenas de superficie o antenas planas multicapa, son un tipo de tecnología de antenas que difiere significativamente de las antenas tradicionales de alambre o dipolos. Estas antenas utilizan una estructura plana, a menudo impresa sobre un sustrato dieléctrico, en lugar de elementos tridimensionales convencionales[25]. Las antenas planas más conocidas son las antenas Microstrip o tipo parche que se explican a continuación.

Antenas Microstrip

Las antenas tipo microstrip, también conocidas como antenas tipo parche o antenas de película delgada, son dispositivos de radiación utilizados en aplicaciones de comunicaciones inalámbricas y sistemas de microondas. Estas antenas están construidas mediante la impresión de un parche conductor sobre un sustrato dieléctrico, generalmente de baja constante dieléctrica. El parche conductor actúa como elemento radiante, y la estructura delgada y plana de la antena facilita su integración en dispositivos electrónicos, como circuitos impresos.

La geometría y las dimensiones del parche conductor, así como la elección del sustrato, influyen en las características de rendimiento de la antena tipo microstrip, como la frecuencia de resonancia, la impedancia, la directividad y la ganancia. Estas antenas son conocidas por su perfil delgado, bajo peso y facilidad de fabricación, lo que las hace especialmente adecuadas para aplicaciones en las que se requiere un diseño compacto y una integración eficiente en sistemas electrónicos modernos[17].

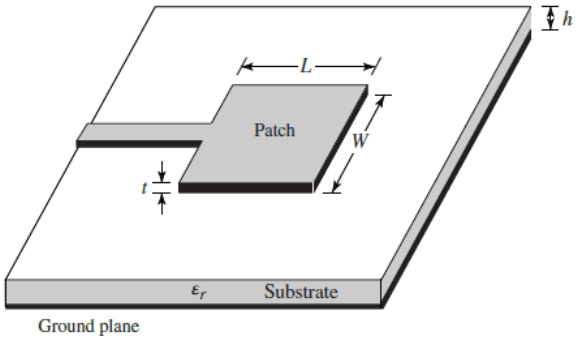

Figura 7. Diseño básico de una antena tipo parche.[17]

3.1.6.3 Antenas de apertura

Las antenas de apertura son un tipo especializado de antenas utilizadas principalmente en sistemas de radar y teledetección. Estas antenas se caracterizan por su capacidad para formar haces de radiación direccionales y enfocar la energía de transmisión o recepción en direcciones específicas[25]. A continuación, se explican algunas antenas de apertura.

Antenas Parabólicas

Las antenas parabólicas usan características físicas, así como antenas de elementos múltiples para alcanzar una ganancia y direccionalidad muy alta. Estas antenas usan un plato reflector para enfocar las ondas de radio recibidas por la antena a un punto focal. El plato también funciona para capturar la energía radiada por la antena y enfocarla en un haz estrecho al transmitir. Al concentrar toda la potencia que llega a la antena y enfocarla en una sola dirección, este tipo de antena es capaz de proveer muy alta ganancia.

Antenas tipo bocina

Las antenas tipo bocina fueron desarrolladas a finales del siglo XIX para ser usadas en aplicaciones de alta frecuencia tales como transmisiones de microonda. El primer registro de

una antena tipo bocina data de 1897, año en el que el investigador J. Chunder Bose (London's Royal Institution) llevó a cabo un experimento en el cual se utilizó una antena del tipo piramidal (collecting funnel) operando a una frecuencia de 60GHz[27].

Este tipo de antenas se usa ampliamente como elemento de alimentación para grandes antenas de radioastronomía[28], seguimiento de satélites[29] y comunicaciones que se encuentran instaladas en todo el mundo. Además de su utilidad como fuente de alimentación para reflectores y lentes, es un elemento común de las matrices en fase y sirve como estándar universal para la calibración y las mediciones de ganancia de otras antenas de alta ganancia. Su aplicabilidad generalizada se deriva de su simplicidad en la construcción, facilidad de excitación, versatilidad, gran ganancia y rendimiento general preferido.
La antena tipo bocina no es más que un tubo hueco de diferentes secciones transversales, que ha sido ahusado (abocinado) hasta una abertura más grande. El tipo, la dirección y la cantidad de conicidad (ensanchamiento) pueden tener un gran efecto sobre el rendimiento general del elemento como radiador [30].

3.1.7 SDR

La tecnología de radio definida por software (SDR, por sus siglas en inglés) se basa en la implementación de las funciones de radiofrecuencia de un sistema de comunicaciones a través de módulos de software sobre una plataforma de hardware genérica, en lugar de utilizar componentes electrónicos dedicados para cada tarea específica. De esta forma, en un sistema SDR los procesos de recepción, modulación/demodulación, filtrado, amplificación, entre otros, se efectúan mediante algoritmos que corren sobre un procesador, equipado con un convertidor analógico-digital que captura la señal del aire a la entrada proveniente de la antena[31]. La radio definida por software es capaz de constituir un nodo de radio de cualquier tipo, desde un enlace punto a punto hasta un elemento en una gran red ad hoc de radios. Puede usarse como un RFFE para un script de MATLAB o un modelo de Simulink o puede programarse y usarse como una radio independiente completa[32].

3.1.7.1 Componentes de un SDR

La mayoría de los dispositivos SDR modernos suelen compartir un diseño estructural similar, que constituye las cadenas de recepción y/o transmisión para traducir datos del dominio de RF analógico al dominio de banda base analógica y a muestras de I/Q y, finalmente, a un paquete de software en el cual se procesan los datos como por ejemplo MATLAB [32].
En la figura 8 se muestra el diagrama de un SDR donde se detallan los bloques de hardware y software que lo componen.

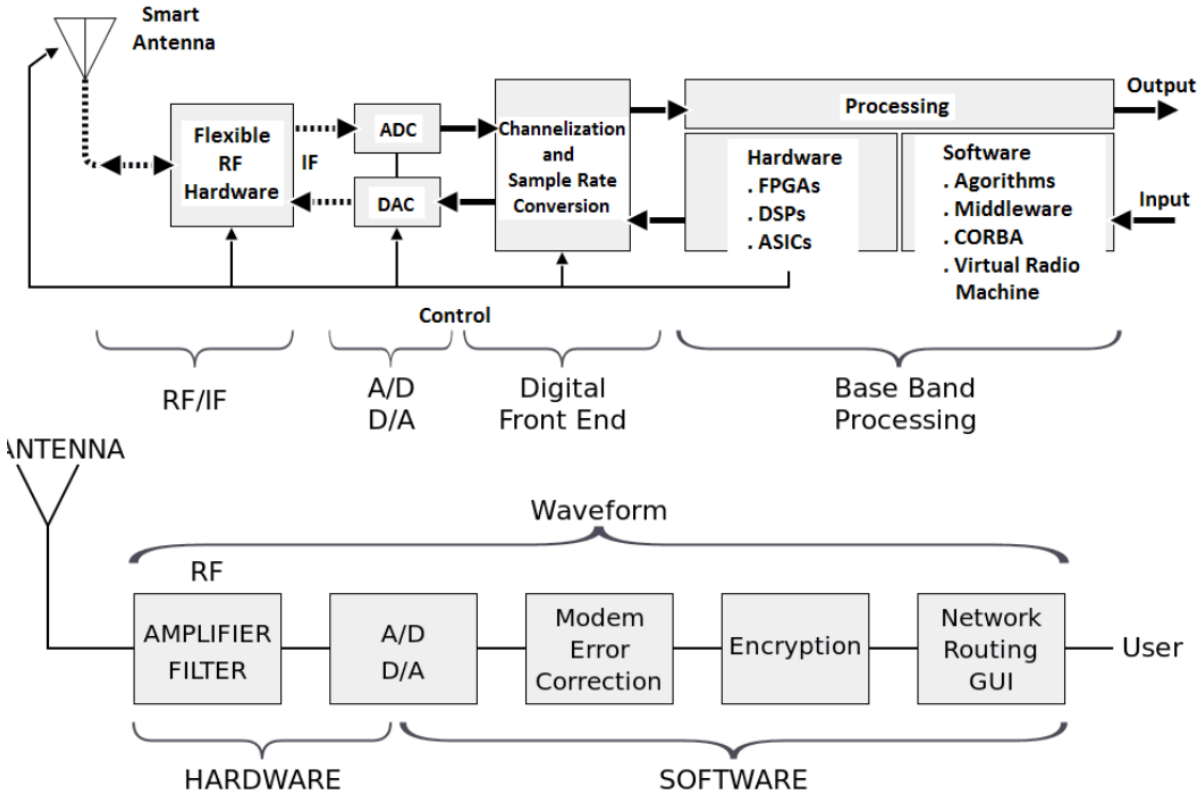

Figura 8. Diagrama típico de un SDR. [31]

3.1.8 USRP

Un USRP, es un Sistema Periférico Universal de Radio, que se define de este modo ya que desde su creación la idea general fue permitir a un equipo computacional, funcionar como un software de radio de alto rendimiento y con capacidad de operación de banda ancha, donde el computador sirve como una banda base digital y como una sección de frecuencia intermedia del sistema de radio comunicaciones. El USRP está perfectamente diseñado para permitir un acople ideal eléctrica y mecánicamente con otras tarjetas adicionales como son: transmisores, receptores, receptores de televisión, etc., consiguiendo un traslado ideal de la información entre la sección banda base con la de IF y la de RF con la frecuencia a la que se desea transmitir[33]. La figura 9 presenta un diagrama de bloques de un dispositivo USRP, este detalla tanto la parte del transmisor como la parte del receptor.

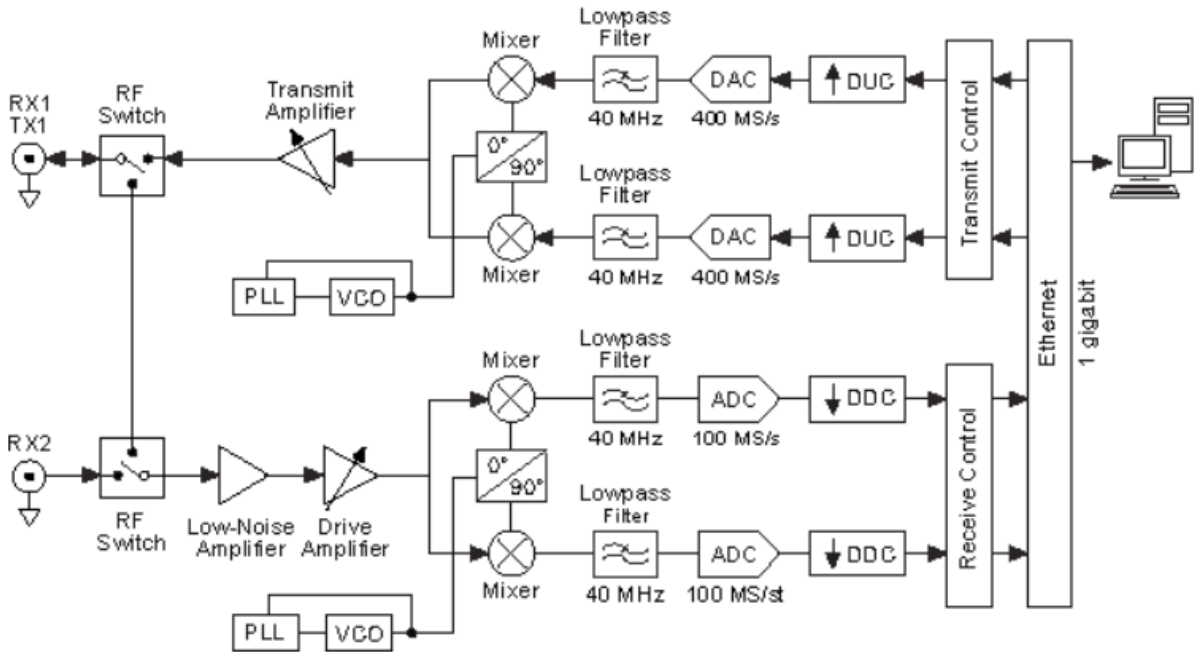

Figura 9. diagrama típico de un USRP.

3.1.8.1 USRP B200mini

La USRP B200mini ofrece una radio definida por software/radio cognitiva 1x1 en el tamaño de una tarjeta de presentación. Con un amplio rango de frecuencia de 70 MHz a 6 GHz y un FPGA Xilinx Spartan-6 programable por el usuario, esta plataforma flexible y compacta es ideal tanto para aplicaciones de aficionados como de OEM. El front-end de RF utiliza el transceptor RFIC AD9364 de Analog Devices con 56 MHz de ancho de banda instantáneo. La placa está alimentada por bus mediante un USB 3.0 de alta velocidad para la transmisión de datos a la computadora host.

La serie USRP B200mini también incluye conectores para GPIO, JTAG y sincronización con una referencia de reloj de 10 MHz o una señal de entrada de referencia de tiempo PPS[34].

3.1.9 Esquemas de Modulación y Modulación Digital

Los esquemas de modulación son técnicas utilizadas en comunicaciones para transmitir información a través de señales portadoras. La modulación implica la variación de una propiedad de la onda portadora de acuerdo con la información que se quiere transmitir. Existen diferentes tipos de modulación tales como la modulación digital que es una técnica en telecomunicaciones y procesamiento de señales en la que la información digital, como datos binarios, se codifica y transmite a través de señales analógicas o digitales. En este proceso, alguna de las características de la onda portadora se modifica de acuerdo con la secuencia de bits a transmitir[35]. La modulación digital permite la transmisión eficiente y precisa de datos digitales, siendo fundamental en numerosas aplicaciones, como las comunicaciones inalámbricas, la transmisión de datos por fibra óptica y la radiodifusión digital.

Dentro de la modulación digital encontramos esquemas de modulación tales como la modulación QAM, PSK, QPSK, entre otras. Estos esquemas de modulación utilizan la representación de datos I/Q que son dos señales comúnmente denominadas fase (I) y cuadratura (Q) que facilitan la demodulación y recuperación precisa de la información original.

3.1.9.1 Datos I/Q

Los datos I/Q son un método para describir las características de magnitud y fase de una señal, Los cuales nos permiten tener una visión de la representación de una señal[36].
Una onda sinusoidal se puede escribir en forma de coordenadas polares como se muestra en la siguiente ecuación:

$$f(t) = A\cos(2\pi ft + \varphi) \qquad (6)$$

Donde A es la amplitud, f la frecuencia y φ la fase de la señal.

Una onda sinusoidal también se puede representar en un sistema de coordenadas cartesianas complejas por sus componentes reales y complejas. La componente (I) se puede escribir como:

$$I(t) = A\cos(2\pi ft) \qquad (7)$$

y la componente de cuadratura (Q) se puede escribir como:

$$Q(t) = A\sin(2\pi ft) \qquad (8)$$

Gráficamente, las proyecciones I y Q de la onda sinusoidal de coordenadas polares están en los ejes x e y, respectivamente, como se ilustra en el siguiente gráfico.

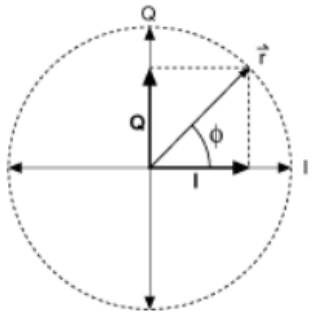

Figura 10. Gráfica de las proyecciones I/Q[36]

En la figura 10, la frecuencia de la onda sinusoidal se muestra como la tasa de rotación del vector r alrededor del círculo. La magnitud del vector (M) viene dada por:

$$M = \frac{2It + 2Qt}{2} \tag{9}$$

Y la fase del vector está dada por:

$$\varphi = tan{-}1\left(\frac{Q}{I}\right) \tag{10}$$

A pesar de que los datos de magnitud y fase podrían considerarse más intuitivos en un primer análisis, las consideraciones inherentes al diseño del hardware llevan a la conclusión de que los datos I (en fase) y Q (en cuadratura) son la opción más adecuada para las formas de onda de radiofrecuencia (RF). La representación I/Q se revela como una buena herramienta para la visualización y medición de la calidad de la modulación, aportando una perspectiva fundamental en la evaluación de señales complejas. Esta representación, como se detalla en los esquemas de modulación digital que se exploran a continuación, emerge como una elección estándar que facilita el análisis y la optimización de la modulación en entornos de comunicación inalámbrica.

3.1.9.2 Modulación QAM

La modulación por amplitud en cuadratura (QAM, por sus siglas en inglés "Quadrature Amplitude Modulation") es una técnica de modulación en la que la información va a ser modulada tanto en amplitud como en fase. Es decir, la señal de la portadora será modificada en amplitud y fase.
En este esquema de modulación se utilizan dos señales portadoras con una diferencia de fase de 90 grados entre ellas. Estas dos señales, a menudo denominadas componentes en fase (I) y en cuadratura (Q), se combinan para transportar la información. La amplitud de cada componente representa diferentes niveles de información, y la combinación de la amplitud y fase permite la transmisión de múltiples bits por símbolo[37].

La modulación por amplitud en cuadratura es un tipo de modulación M-aria en la que para grupos de k bits, podemos obtener $M = 2^k$ salidas diferentes.

En el caso de 16-QAM, se utilizan 16 combinaciones posibles de amplitudes y fases para representar cuatro bits por símbolo (ya que $2^4 = 16$). Estos 16 estados se organizan en una constelación en un diagrama de constelación QAM.

En una constelación 16-QAM como se muestra en la figura 11, los puntos representan las combinaciones específicas de amplitud y fase asociadas con cada símbolo. Cada punto en la constelación representa una combinación única de cuatro bits. La distancia entre los puntos en la constelación es importante, ya que afecta la robustez de la señal ante posibles errores de transmisión.

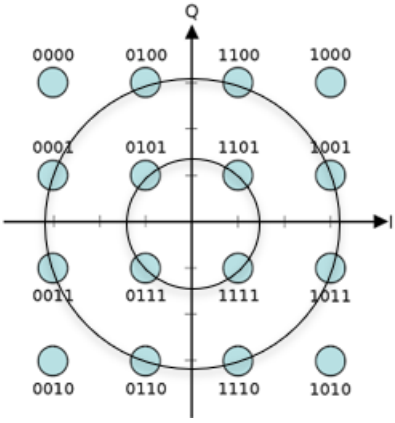

Figura 11. Constelación 16-QAM.

Aunque 16-QAM permite transmitir más información por símbolo en comparación con QAM de menor orden (por ejemplo, 4-QAM), también es más susceptible a errores de transmisión debido a la menor distancia entre los puntos en la constelación. Por lo tanto, la elección del esquema de modulación, como 16-QAM, depende de los requisitos específicos de la aplicación y las condiciones del canal de comunicación.

3.1.9.3 Modulación PSK

La modulación por desplazamiento de fase (PSK, por sus siglas en inglés "Phase Shift Keying") es una técnica fundamental en el ámbito de las comunicaciones digitales que se emplea para transmitir información a través de cambios en la fase de una onda portadora. En este método, la variación de la fase de la onda portadora está directamente relacionada con los valores de los bits que se están transmitiendo.

La modulación PSK utiliza una constelación de fases en la que cada símbolo representa una fase específica. Comúnmente, se emplea PSK para representar bits binarios, y existen diversas variantes como BPSK (Binary Phase Shift Keying) y QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)[38].

3.1.9.4 Modulación QPSK

la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK), es una forma de modulación digital angular y de amplitud constante. La QPSK es una técnica M-aria de codificación en la que M = 4 (de ahí el nombre "cuadratura", que significa "4"). Con esta codificación, son posibles cuatro fases de salida para una sola frecuencia de portadora. Como hay cuatro fases distintas de salida, debe haber cuatro condiciones distintas de entrada. Ya que la entrada digital a un modulador QPSK es una señal binaria, para producir cuatro condiciones distintas de entrada se necesita más de un solo bit de entrada. Con dos bits hay cuatro condiciones posibles: 00, 01, 10 y 11.

En consecuencia, en la QPSK, los datos binarios de entrada se combinan en grupos de dos bits, llamados dibits. Cada dibit de código genera una de las cuatro fases posibles de salida. Así, para cada dibit de dos bits sincronizado en el modulador, se obtiene un solo cambio en la salida. Entonces, la rapidez de cambio en la salida (baudios) es la mitad de la rapidez de entrada de bits[39].

Tabla 2.Tabla de verdad QPSK

Entrada Binaria		$fQPSK$	Fase de Salida QPSK
I	Q		
0	0	$-\cos(w_c t) - sen(w_c t)$	-135°
0	1	$-\cos(w_c t) + sen(w_c t)$	-45°
1	0	$\cos(w_c t) - sen(w_c t)$	135°
1	1	$\cos(w_c t) + sen(w_c t)$	45°

En la figura 12, se observan cada uno de los 4 posibles fasores de salida que representan los símbolos de modulación QPSK, estos se encuentran a una misma amplitud, Así, la información binaria se debe codificar por completo en la fase de la señal de salida.

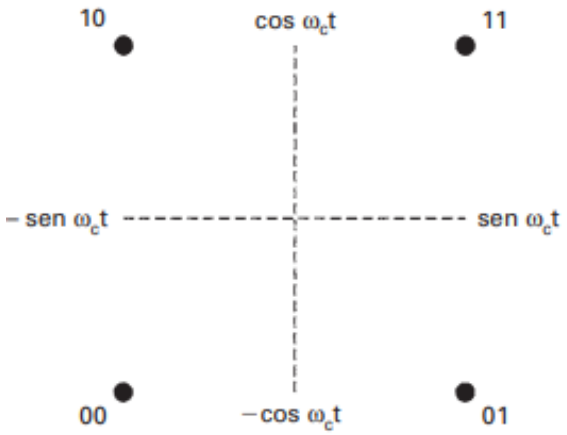

Figura 12. Diagrama de constelación QPSK. [39]

4. DESARROLLO DEL PROYECTO DE GRADO

4.1 Requerimientos

Para determinar la lista de todos los requerimientos necesarios para el buen funcionamiento del sistema, se tiene en cuenta la naturaleza del sistema, la información recopilada y además el software, los espacios y los equipos que estaban a disposición por parte de la universidad se establecieron los siguientes requerimientos.

4.1.1 Requerimientos funcionales

- El sistema debe funcionar con una frecuencia que sea catalogada por la ANE como frecuencia de radio aficionado para evitar posibles interferencias con ondas de radiofrecuencia externas.
- El sistema debe lograr la modulación y transmisión de información.
- El sistema debe reconstruir y visualizar la información recibida.

4.1.2 Requerimientos de calidad

- El sistema debe operar de manera óptima bajo las condiciones atmosféricas de la ciudad de Bogotá.
- El sistema debe validar la calidad del enlace por medio de la tasa de error de Bits (BER).

4.2 Metodología del Diseño

4.2.1 Investigación y documentación

En la primera etapa del proyecto se realiza la investigación sobre el funcionamiento básico de los sistemas inalámbricos terrestres para la transmisión de información entre dos puntos, teniendo en cuenta la información obtenida en esta etapa se plantea la solución al problema teniendo en cuenta sus requerimientos.

Partiendo de un estudio sobre condiciones ambientales y de infraestructura que existen en la zona del Parque Nacional Rio Puré se realiza la respectiva investigación sobre qué solución satisface de mejor manera los requerimientos mencionados en la sección 4.1. Se determina que, para un enlace de comunicaciones punto a punto, la directividad de la antena es un parámetro crucial. El uso de antenas direccionales garantiza una transmisión y recepción de información precisa al establecer lo que se conoce como línea de vista entre ambas antenas. Además, se considera la gran densidad de vegetación, la cual puede interferir y generar perdidas en la transmisión, Por lo tanto, la elección de la banda de radiofrecuencia debe ser cuidadosa, asegurándose de pueda superar estos obstáculos.

En cuanto a los esquemas de modulación y codificación es fundamental destacar cómo estas técnicas desempeñan un papel esencial en la optimización de la transmisión de datos en el enlace de comunicaciones punto a punto. La modulación, al alterar las propiedades de una onda portadora como su magnitud o fase, nos permite adaptar la señal para que sea más eficiente en la transmisión a largas distancias. Por otro lado, la codificación se encarga de representar la información de manera que sea resistente a posibles interferencias o errores durante la transmisión. Estas decisiones estratégicas no solo influyen en la velocidad de transferencia, sino que también aseguran la integridad de los datos, siendo cruciales para

superar desafíos inherentes al entorno, como posibles fluctuaciones en la señal o interferencias electromagnéticas.

Una vez terminada la etapa de investigación sobre el funcionamiento y los requerimientos de los radioenlaces punto a punto, se procede con las etapas en las cuales se determina concretamente el sistema a implementar, tal y como se describe en las siguientes subsecciones.

4.2.2 Elección de la frecuencia del enlace

La elección de la frecuencia ultra alta (UHF) emerge como la mejor opción tras la revisión en la etapa de investigación para la implementación de un enlace punto a punto que abarque tanto entornos selváticos, presentes en el Parque Natural Rio Puré, como áreas urbanas. La menor susceptibilidad a perdidas e interferencias de fuentes externas como ruido o las producidas por la atmosfera y la capacidad de mantener una señal fuerte a distancias más largas[11], hacen que las ondas UHF sean altamente confiables, incluso en condiciones climáticas adversas. Por otro lado, la regulación específica del espectro en la banda UHF hace que esta banda del espectro esté poco congestionada, contribuyendo así a una transmisión de datos eficiente y confiable.

Teniendo en cuenta el “Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia” de la ANE[6], se encontró que el rango de frecuencias de 1240 MHz – 1300MHZ que hace parte de la banda UHF está destinado en parte a radioaficionados (ver tabla 3) el cual es un servicio que permite la realización del proyecto acatando la gestión y el control del espectro por parte de la ANE. Teniendo esto en cuenta la frecuencia seleccionada fue la de 1.27GHz.

Tabla 3. Asignación del rango de frecuencias entre 1240 y 1300MHz dentro del Cuadro Nacional de Atribución de Bandas.[40]

Rango	Servicio
1240 – 1300 MHz	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE
1240 – 1300 MHz	RADIOLOCALIZACIÓN
1240 – 1300 MHz	RADIONAVEGACIÓN POR SATÉLITE (espacio – espacio)
1240 – 1300 MHz	RADIONAVEGACIÓN POR SATÉLITE (espacio – tierra)
1240 – 1300 MHz	INVESTIGACIÓN ESPACIAL (activo)
1240 – 1300 MHz	AFICIONADOS

4.2.3 Elección de antenas

A partir de la investigación y el estudio sobre las condiciones de implementación del radio enlace, y teniendo clara la frecuencia seleccionada, se emprendió la búsqueda de la opción de antenas más idónea para el proyecto. Dentro de las características consideradas para la selección de las antenas, se destacan los rangos de frecuencia de resonancia. Debido a que la frecuencia seleccionada para este proyecto es de 1.27 GHz, es necesario que las antenas operen eficientemente en este rango. Asimismo, se tuvieron en cuenta parámetros de desempeño como la ganancia y la potencia, ya que valores bajos en ambos parámetros podrían comprometer la viabilidad de la implementación del enlace. Finalmente, la impedancia de las antenas fue un aspecto fundamental, siendo necesario que se encuentren acopladas a 50Ω, ya que este es el valor de impedancia compatible con los dispositivos USRP que forman parte del sistema.

La tabla 4 muestra las antenas que estuvieron en consideración para ser adquiridas con el propósito de implementar el proyecto.

Tabla 4. Lista de antenas tenidas en cuenta para la implementación del radio enlace.

Referencia	Frecuencia (GHz)	Ganancia a 1.27GHz (dBi)	Potencia Max. (W)	Impedancia (Ω)
TekBox TBMA4 - 1 GHz 8 GHz, Double Ridged Horn Antenna	1 - 8	6.86	100	50
Octave Horn Antenna SAS-590-10	1 - 2	14	300	50
Standard Gain Horn Antenna SAS-580	1.12 – 1.70	14.7	550	50
Yagi-Uda Antenna	1 – 1.71	13	250	50
Grid Parabolic Dish Antenna	0.7 – 3	20	250	50

Aunque las antenas de la tabla 4 cumplen con los requisitos de desempeño del radioenlace, se optó por seleccionar la antena TekBox TBM4-1. Esta antena de tipo bocina ofrece un amplio rango de operación de 1 a 8 GHz, lo cual la hace adecuada para aplicaciones de banda ancha que requieran cubrir múltiples frecuencias portadoras dentro de este espectro. Su ganancia de 6.86 dBi a 1.27 GHz, si bien no es la más alta de la tabla, resulta suficiente para enlaces punto a punto de corto a mediano alcance. Además, al tratarse de una antena tipo bocina esta cuenta con una alta directividad, lo cual permite una transmisión y recepción eficiente de la señal en la trayectoria deseada.

4.2.4 Elección del software y el dispositivo USRP

Las dos opciones de USRP disponibles para la implementación del radioenlace eran la USRP B200 mini y la USRP 290. La selección del USRP se basó en consideraciones de

compatibilidad con la interfaz de software. La USRP B200 mini es más versátil al ser compatible tanto con MATLAB como con LabVIEW, mientras que la USRP 2901 es compatible exclusivamente con LabVIEW. La elección de utilizar MATLAB en conjunto con la USRP B200 mini fue motivada por el hecho de que usa un lenguaje de programación que permite la realización de código en lugar de bloques con funciones.

Con el software y el USRP definidos, se procedió a establecer la comunicación entre ambos mediante la utilización del Communications Toolbox Support Package for USRP Radio[41], un conjunto de herramientas en MATLAB diseñado para ser compatible con la USRP B 200 mini, facilitando la interacción entre el software y el hardware. Para garantizar un funcionamiento adecuado, se requieren complementos adicionales como: el Communications Toolbox, el DSP System Toolbox™, y el Signal Processing Toolbox™. Estos elementos se revelaron como indispensables para lograr la integración y el rendimiento óptimo del sistema, asegurando una comunicación eficiente y coherente entre el software MATLAB y el dispositivo USRP seleccionado.

4.2.5 Primer diseño conceptual del sistema

Considerando la información recopilada hasta el momento en las etapas previas del proyecto acerca de los radioenlaces y su implementación en MATLAB, se procede a realizar un diseño preliminar del sistema. En la Figura 13 se presenta un diagrama de bloques, destacando los procesos fundamentales del radioenlace.

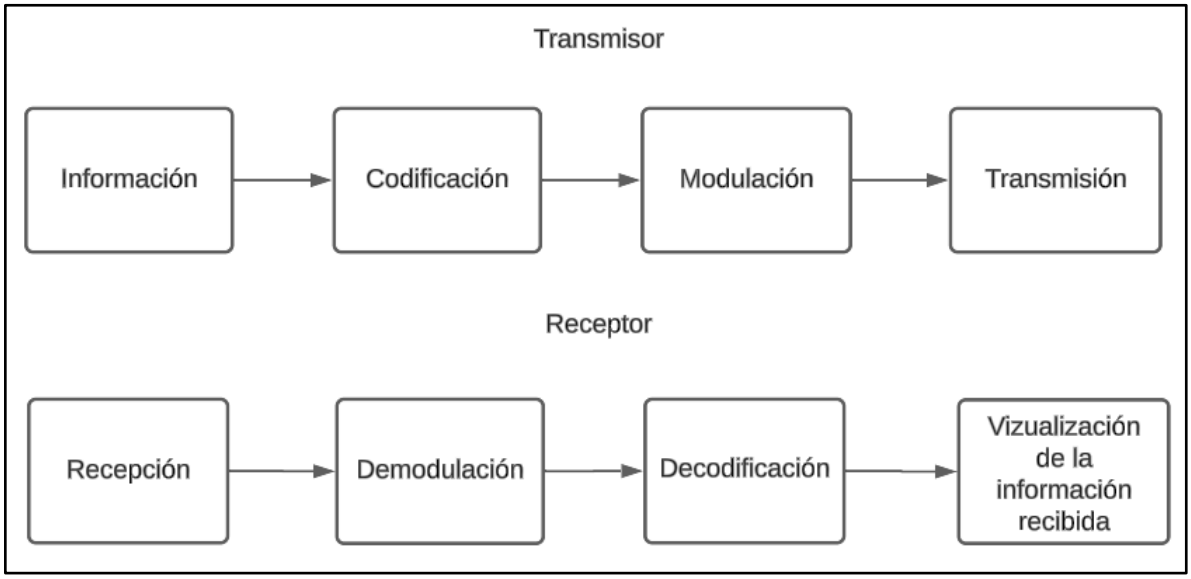

Figura 13.Diagrama de bloques inicial del radioenlace.

En el transmisor, se identifican cuatro etapas clave. La primera consiste en la preparación de la información a enviar, seguida por la segunda etapa, donde se lleva a cabo el proceso de codificación de la información, principalmente mediante la binarización de los datos. Posteriormente, la cadena de bits es sometida a la etapa de modulación y finalmente es transmitida.

En cuanto al receptor, se plantea al proceso inverso. La información recibida pasa por una etapa de demodulación para obtener la cadena de números binarios, a partir de la cual se reconstruye el mensaje original. Este diseño preliminar establece las bases para el desarrollo y la implementación del radioenlace, abordando de manera clara las operaciones esenciales tanto en el transmisor como en el receptor.

4.2.6 Elección de los esquemas de modulación.

En esta fase del proyecto se seleccionan los esquemas de modulación que se van a usar para la implementación del proyecto, entre las opciones se encontraban la modulación AM, QAM, PSK, BPSK, o QPSK. Luego de revisar la documentación correspondiente y de entender el

funcionamiento y las aplicaciones de distintos esquemas de modulación se opta por elegir las modulaciones digitales como QAM (Quadrature Amplitude Modulation) y QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) debido a que estos esquemas de modulación destacan por su capacidad para aprovechar de manera eficiente el espectro de frecuencia disponible, permitiendo una mayor tasa de transmisión de datos. Su resistencia al ruido y la capacidad de adaptarse a las variaciones en las condiciones del canal hacen que QAM y QPSK sean opciones ideales para asegurar una comunicación robusta y estable. La flexibilidad intrínseca de estas técnicas para representar múltiples bits por símbolo, junto con su capacidad para transmitir información en forma de amplitud y fase, o únicamente de fase, las convierte en elecciones estratégicas para la transmisión de datos. En definitiva, la adopción de la modulación QAM y QPSK en el radioenlace se justifica por su capacidad para mejorar la eficiencia espectral, la velocidad de transmisión y la fiabilidad en la comunicación.

4.2.7 Implementación de los esquemas de modulación en MATLAB

El objetivo principal de esta etapa del proyecto consiste en implementar y evaluar los esquemas de modulación digital previamente seleccionados, haciendo uso del software MATLAB. Usando la documentación oficial de MATLAB se identificaron las funciones apropiadas para la implementación en código dichos esquemas de modulación. Las funciones que permiten realizar estos códigos son “qammod” y “qademmod” para la modulación QAM, mientras que las funciones “pskmod” y “pskdemod” sirven para la modulación QPSK.

A partir del estudio detallado del funcionamiento teórico-práctico de estas funciones y los ejemplos provistos por la documentación oficial de cada función, se procede a diseñar los códigos que implementan cada esquema de modulación y demodulación. Este proceso facilitó la comprensión paso a paso de los principios operativos subyacentes en ambas técnicas de modulación digital.

Posteriormente, se llevaron a cabo diversas pruebas modulando y demodulando tanto datos textuales como imágenes con los códigos desarrollados. Para validar la capacidad de los

esquemas de modulación para transmitir información de forma íntegra, asegurando una reconstrucción exacta de los datos originales una vez completada la fase de demodulación.

4.2.8 Configuración de las etapas de transmisión y recepción

Una vez desarrollados los códigos para implementar los esquemas de modulación digital seleccionados, se configuraron dispositivos USRP para habilitar las funciones de transmisión y recepción inalámbrica de las señales moduladas. Esta etapa del proyecto involucró dos fases principales:

En primer lugar, se realizó la parametrización adecuada de los equipos USRP, definiendo sus parámetros operativos esenciales tales como frecuencia central, ancho de banda, factor de muestreo, ganancia del transmisor y el receptor, la duración de la transmisión, entre otros. El correcto ajuste de estos valores resulta determinante para un funcionamiento óptimo de las radios definidas por software.

En una segunda fase, se incorporaron bloques adicionales de procesamiento digital de señales tanto en el transmisor como en el receptor, con el objetivo de mejorar el rendimiento y calidad del enlace inalámbrico. Estos bloques incluyeron principalmente filtros de conformación espectral, amplificadores de ganancia, compensadores de sincronismo y frecuencia, así como estimadores y detectores de preámbulos.

4.2.9 Implementación del radioenlace

En esta etapa del proyecto se integran todos los bloques funcionales desarrollados previamente, obteniendo los códigos finales en MATLAB que conforman el sistema completo de radioenlace digital. Estos códigos se dividen en dos secciones principales: el programa transmisor y el programa receptor.

En cuanto a la implementación física se realiza la conexión de Los dispositivos USRP a sus respectivas antenas, teniendo claro que uno de los USRP se usa como transmisor y el otro como receptor por lo que se debe usar el conector correspondiente en cada caso. Los USRP van conectados en este caso a un computador que se encarga de ejecutar los códigos de transmisión y recepción. En la figura 14 se observa el diagrama que describe la implementación física del radioenlace.

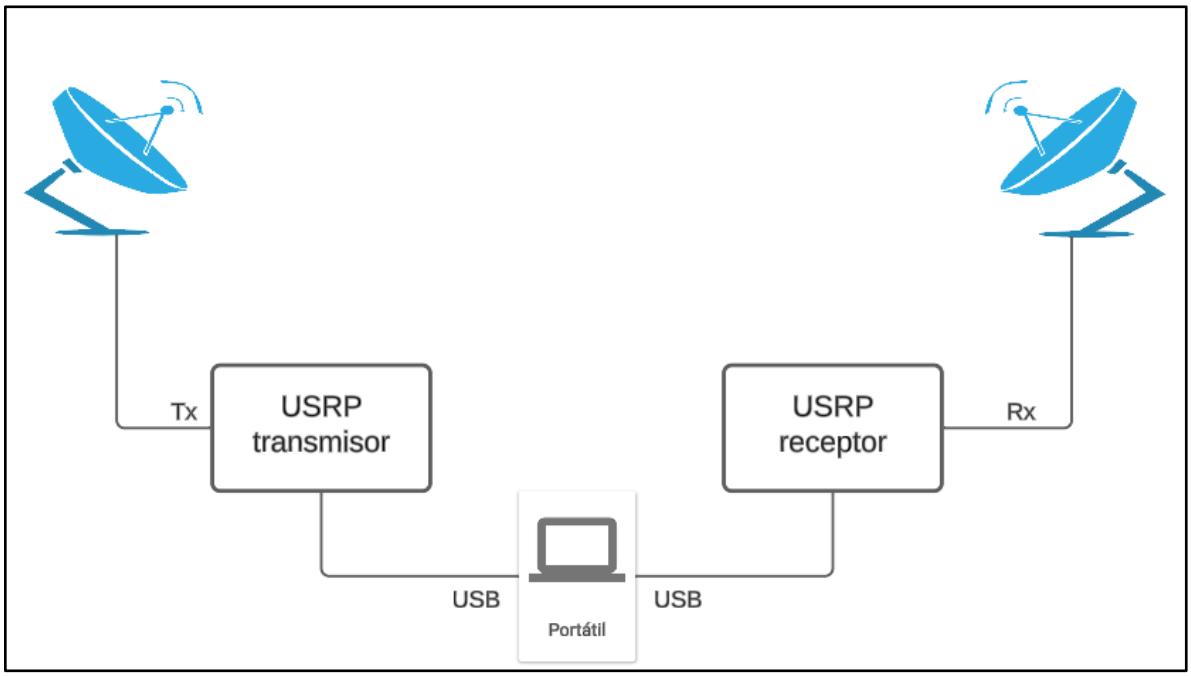

Figura 14. Diagrama de la implementación física del radioenlace.

4.3 Descripción técnica del producto

En esta sección se describen el funcionamiento y las características de cada una de las partes que conforman el radioenlace.

A continuación, se expone la información técnica relevante de las antenas seleccionadas para la implementación del proyecto.

4.3.1 Antenas utilizadas en el radioenlace

La TMBA4 (figura 15) es una antena tipo bocina de doble cresta con su elemento radiante hecho de un sustrato de PCB chapado en los bordes. La carcasa está hecha de acero inoxidable.

Esta antena funciona con una frecuencia característica de 1GHz – 8GHz y cuenta con un patrón de radiación direccional típico de antenas bocina de doble cresta[42].

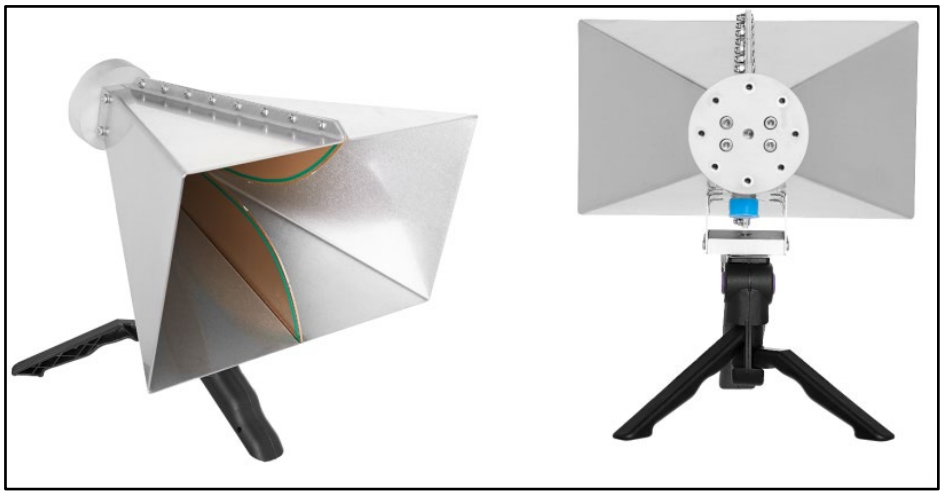

Figura 15. Antena TBMA4. [42]

4.3.1.1 Especificaciones Técnicas

- Tipo: bocina de doble cresta
- Rango de frecuencia: 1 GHz – 8 GHz
- Impedancia nominal: 50 Ω
- Conector: tipo N hembra
- Potencia máxima RF de entrada continua: 100 W
- Ganancia isotrópica: 6 … 14 dBi
- Factor de antena: 24 … 43 dB/m
- Relación de adelante hacia atrás: promedio. 20dB

- Relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR): < 3:1 en todo el rango de frecuencia; < 2:1 promedio

4.3.1.2 Patrón de Radiación

La figura 16 describe el patrón de radiación de la antena TMBA4 cuando trabaja a una frecuencia de 1,3 GHz, se observa como la antena radia de forma direccional a su máxima potencia con una apertura aproximada de 30° tanto en el plano H como en el plano E.

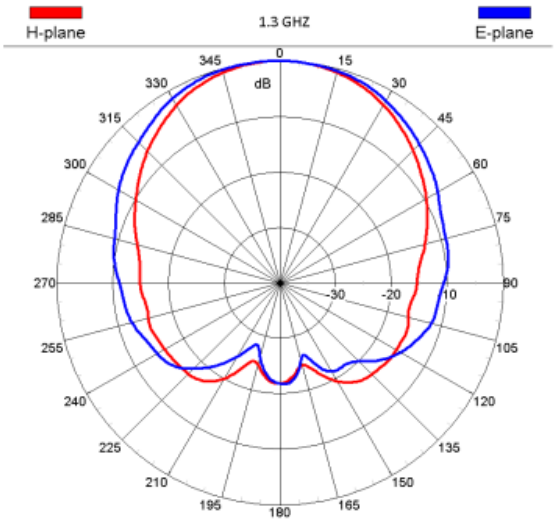

Figura 16. Patrón de radiación de los planos E y H de la antena a una frecuencia de 1,3 GHz.[42]

4.3.1 Diseño final del radioenlace

4.3.1.1 Diseño del transmisor

Tal como muestra la Figura 17, el diseño del transmisor está compuesto por 4 etapas principales. La primera corresponde al generador de la señal, que se encarga de acondicionar la información antes de ser modulada. Esto involucra por ejemplo la conversión a una secuencia de bits, la adición de un preámbulo al inicio de trama que permite la sincronización en la recepción y encapsulamiento en tramas con la estructura adecuada.

La segunda etapa ejecuta la modulación digital propiamente de los datos, mediante la técnica seleccionada (QPSK o QAM). La tercera etapa efectúa un filtrado con un filtro RRC (Root Raised Cosine) sobre la señal modulada, con el propósito de limitar la interferencia inter-simbólica que se puede producir durante la transmisión a través del canal radio.

Finalmente, la etapa 4 corresponde a la transmisión inalámbrica de la trama modulada y filtrada, la cual se lleva a cabo empleando la radio definida por software USRP asignada al emisor y una antena.

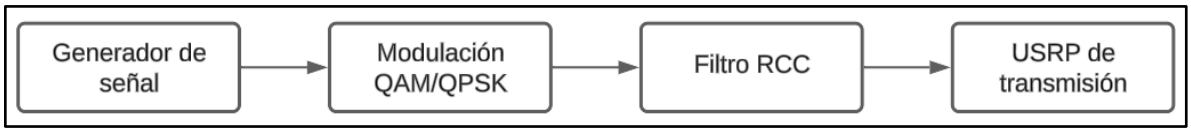

Figura 17. Diagrama de bloques del transmisor

4.3.1.2 Diseño del receptor

El receptor corresponde con la parte más compleja del sistema, como se observa en la figura 18 el receptor cuenta con 8 etapas principales. La primera etapa corresponde con la recepción de la información usando el dispositivo USRP asignado al receptor conectado a una antena.

Luego, la segunda etapa aplica un amplificador de ganancia automático (AGC) para ajustar la potencia de señal a los niveles adecuados. A continuación, se aplica un filtro inverso RRC (Root Raised Cosine) sobre la señal recibida para compensar el primer filtro RRC que se utiliza en el transmisor, luego del filtro la señal pasa por un compensador de frecuencia que ayuda a corregir cualquier error que se pudiera haber presentado en la frecuencia de la señal.

En la etapa 5 se utiliza un sincronizador de la portadora para compensar el desplazamiento de frecuencia residual y el desplazamiento de fase en la señal, la etapa 6 detecta el preámbulo

informativo agregado en transmisión para delimitar el inicio de la trama de datos. Dicha información digital pasa después por un sincronizador de frames que se encarga de ordenar la información recibida para que finalmente pase de forma correcta al bloque del demodulador (QPSK/QAM seleccionado) que extrae los símbolos asignados en el mapeo. Finalmente, estos símbolos son procesados para reorganizar y reconstruir fielmente los datos originales enviados por el transmisor

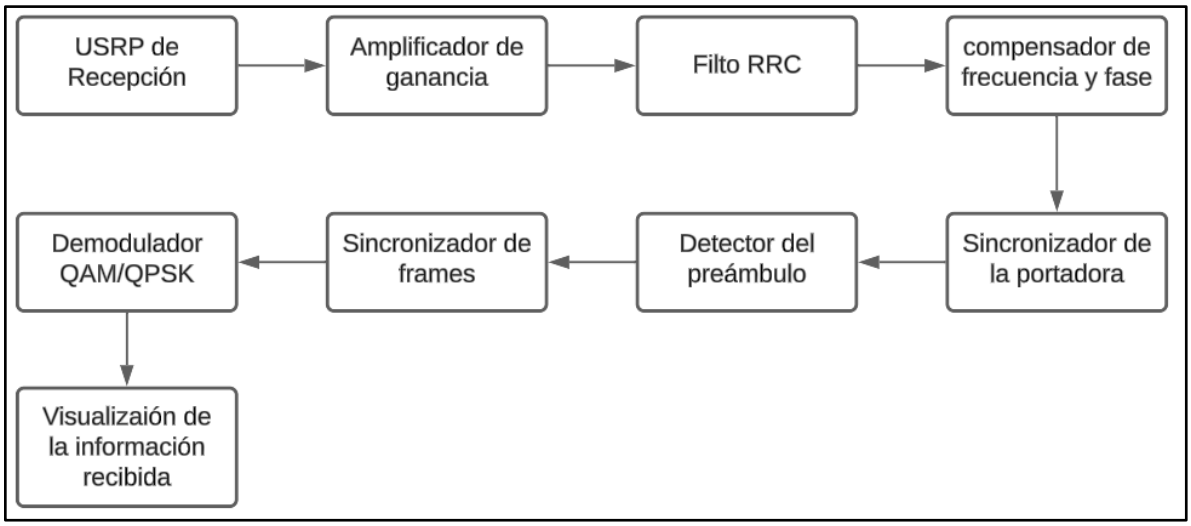

Figura 18. Diagrama de bloques del receptor

4.3.2 Funcionamiento de los esquemas de modulación en MATLAB

Esta subsección explica el funcionamiento de los esquemas de modulación. Es preciso aclarar que los códigos correspondientes a la modulación presentados a continuación no incluyen, por ejemplo, el preámbulo o el filtro RRC, de igual forma los códigos correspondientes a la demodulación no incluyen los demás bloques que hacen parte del diseño del receptor, esto con el motivo de centrar la explicación específicamente en el funcionamiento de los esquemas de modulación usados en el proyecto.

4.3.2.1 Modulación QAM para cadenas de texto

En el contexto de este tipo de modulación, se tiene la opción de emplear tanto 4-QAM como 16-QAM. Es importante considerar que la modulación 4-QAM presenta una menor susceptibilidad al ruido, aunque su tasa de transmisión es más modesta. Por otro lado, la modulación 16-QAM posibilita la transmisión de más bits por símbolo, generando una tasa de transmisión considerablemente superior. Esta característica resulta especialmente valiosa cuando se requiere enviar una gran cantidad de bits en un intervalo de tiempo reducido. No obstante, es importante tener presente que, en contrapartida, la modulación 16-QAM exhibe una mayor susceptibilidad al ruido. La elección entre ambas variantes dependerá, por lo tanto, de las necesidades específicas del escenario de transmisión, ponderando la prioridad entre la resistencia al ruido y la velocidad de transmisión en función de los requisitos particulares del enlace punto a punto.

Según lo anterior la implementación de esta modulación se realizó de la siguiente manera.

```
% Parámetros
Mensaje = 'Mensaje de prueba QAM.';
binaryText = reshape(dec2bin(uint8(Mensaje), 8).'- '0', 1, [])
M = 16; % M-QAM

% Modulación QAM
bitsPerSymbol = log2(M);
numBits = length(binaryText);
numSymbols = numBits / bitsPerSymbol;
binaryTextReshaped = reshape(binaryText, bitsPerSymbol, numSymbols).';
decimalValues = bin2dec(char(binaryTextReshaped + '0'));
modulatedSymbols = qammod(decimalValues, M);
```

Figura 19. Código de la modulación m-QAM para texto.

En la Figura 19 se presenta el código correspondiente a la modulación QAM para texto. En primer lugar, se emplea la variable "binaryText" para almacenar la cadena de números binarios asociada al mensaje que se desea modular. Esta cadena se fragmenta en bits por símbolo; en el caso particular de la utilización de 16-QAM, se asignan 4 bits por símbolo. En

el ejemplo proporcionado, contamos con una información de 176 bits distribuidos en 4 bits por símbolo, resultando en un total de 44 símbolos a modular.

Tabla 5. Generador de los símbolos para la modulación QAM.

N° símbolo	Cadena binaria de 4 bits	Valor en base 10
1	0100	4
2	1101	13
3	0110	6
4	0101	5
5	0110	6
…	…	…
44	1110	14

La tabla 5 muestra el proceso que realiza el código con cada uno de los símbolos antes de modularlos. Se toman 4 bits por cada símbolo y luego los convierte en su valor decimal, ahora tenemos una cadena de 44 números decimales que tienen un valor de 4 bits cada uno, esta cadena de números decimales se pasa por la función "qammod (decimalvalues, M)" cuya salida serán los símbolos modulados.

```
modulatedSymbols = 44×1 complex
    -1.0000 + 3.0000i
     1.0000 + 1.0000i
    -1.0000 - 3.0000i
    -1.0000 + 1.0000i
    -1.0000 - 3.0000i
     1.0000 - 3.0000i
    -1.0000 - 1.0000i
    -3.0000 - 1.0000i
```

Figura 20. Parte de los símbolos modulados.

En la figura 20 se puede observar la modulación de los símbolos, estos símbolos modulados son una cadena de números imaginarios cuya amplitud y fase se ven modificada. Esta es la información que se transmite en el radio enlace.

Ahora para demodular los símbolos y obtener el mensaje en el receptor se utiliza el código que se muestra en la figura 21.

```
% Demodulación QAM
demodulatedDecimalValues = qamdemod(modulatedSymbols, M);
demodBinary = dec2bin(demodulatedDecimalValues).';
cadenaBin = reshape(demodBinary, 1, []);

% Convertir bits demodulados a texto
demodulatedText = char(bin2dec(reshape(cadenaBin, 8, []).'));

% Mostrar resultados
fprintf('Texto Original:\n%s\n\n', Mensaje);
fprintf('Texto Demodulado:\n%s\n', demodulatedText);
```

Figura 21. Código de la demodulación m-QAM para texto

Para la demodulación del texto se hace el proceso inverso a la modulación, comenzamos pasando los símbolos modulados por la función “qamdemod (modulatesSymbols, M)” esta función nos entrega una cadena de números decimales, luego hay que convertirla en una cadena binaria usando la función “dec2bin”. Como cada valor decimal contiene 4 bits, la cadena resultante de la conversión nos da un vector 4x44 por lo que toca usar la función “reshape” para reordenarla de modo que nos entregue un vector 1x176, ahora solo resta convertir esta cadena de binarios en texto. En la figura 22 se observa la salida que se obtiene al ejecutar el código de modulación y demodulación QAM para cadenas de texto.

```
Texto Original:
Mensaje de prueba QAM.

Texto Demodulado:
Mensaje de prueba QAM.
```

Figura 22. Resultado del código de modulación m-QAM para texto

4.3.2.2 Modulación QAM para imágenes B/N

La modulación QAM para imágenes en escala de grises es bastante similar, la mayor diferencia es que se genera directamente un vector de decimales directamente, además, debido a la gran cantidad de información que representa una imagen en comparación a un texto no es posible usar 4-QAM ya que la tasa de transferencia sería tan baja que la calidad de la imagen se vería gravemente afectada.

```
originalImage1 = imread('Lena_Gray.jpg');

% Convertir la imagen en un vector unidimensional
imageVector = originalImage1(:);
M = 64; % Número de símbolos en la constelación
% Convertir valores de intensidad a índices de constelación
symbolIndices1 = int16((double(imageVector) / 255) * (M - 1)); % Escalado a [0, M-1]

% Crear la constelación QAM
constellation = qammod(0:M-1, M);

% Modulación QAM
modulatedSymbols = constellation(symbolIndices1 + 1);
```

Figura 23. código de la modulación m-QAM para imágenes B/N.

En la Figura 23 se muestra el código pertinente a la modulación m-QAM aplicada a imágenes en blanco y negro. En este escenario, se optó por utilizar 64-QAM debido a la considerable cantidad de bits que representan la imagen. La función "imread" se emplea para obtener la matriz de intensidad de la imagen, la cual está compuesta por números enteros representativos de la intensidad de cada píxel. Dado que estos valores son suficientes para llevar a cabo la modulación, no es necesario convertirlos en una cadena de binarios.

Una vez obtenida la matriz de intensidad, se procede a transformarla en un vector unidimensional para, posteriormente, convertir los valores de intensidad en índices de constelación. En la etapa final, se crea una constelación QAM compuesta por 64 símbolos, utilizándola para modular los índices de constelación y generando así la información modulada destinada a la transmisión.

En la figura 24 se aprecia una parte de los símbolos modulados, que de igual forma se representan como una cadena de números imaginarios.

```
modulatedSymbols = 1x50625 complex
     7.0000 + 5.0000i   7.0000 + 5.0000i   7.0000 + 5.0000i   7.0000 + 5.0000i   7.0000 + 7.0000i  ...
```

Figura 24. Parte de los símbolos modulados.

De forma similar que en la demodulación QAM para texto, aquí se hace el proceso inverso a la modulación con el objetivo de obtener la matriz de intensidad de la imagen. En la figura 25 se observa el código usado para la demodulación de la imagen.

```
% Demodulación QAM
demodulatedSymbols = qamdemod(modulatedSymbols, M);

% Convertir índices demodulados a valores de intensidad
demodulatedIndices2 = reshape(demodulatedSymbols, size(imageVector));
demodulatedImageVector2 = (demodulatedIndices2 / (M - 1)) * 255;

% Reconstruir la matriz de intensidad de la imagen
demodulatedImage2 = reshape(demodulatedImageVector2, size(originalImage1));

% Mostrar la imagen original y la imagen demodulada
subplot(1, 3, 1);
imshow(originalImage1);
title('Imagen Original');

subplot(1, 3, 2);
imshow(demodulatedImage2, []);
title('Imagen Demodulada');
```

Figura 25. Código de la demodulación para imágenes B/N.

El proceso inicial para reconstruir la imagen a partir de la información recibida, representada por los símbolos modulados, implica la demodulación de estos símbolos mediante la función "qamdemod". Este procedimiento proporciona los índices de modulación, que son posteriormente transformados en valores de intensidad correspondientes a la imagen original. Dado que estos valores de intensidad se presentan como un vector unidimensional, es necesario convertirlos en una matriz considerando las dimensiones específicas de la imagen original.

Una vez obtenida la matriz de intensidad, se realiza la visualización de la imagen reconstruida mediante la aplicación de la función "imshow". La figura 26 muestra la comparación de la imágenes original y demodulada después de ejecutar el código de la modulación QAM.

Figura 26. comparación entre la imagen original y la imagen demodulada generada por el código de modulación QAM

4.3.2.1 Modulación QPSK para cadenas de texto

La modulación QPSK transmite dos bits por símbolo, lo que permite transmitir más información que otros esquemas de modulación de menor orden, esto es especialmente bueno a la hora de transmitir imágenes. Los símbolos se modulan teniendo en cuenta 4 condiciones distintas para obtener las 4 fases de salida, estas condiciones se crean a partir de cada una de las posibles combinaciones que existen al unir dos bits (dibits), siendo estas: 00, 01, 10, Y 11.

De acuerdo con lo anterior, la implementación de esta modulación se realiza de la siguiente manera.

```
mensaje = 'mensaje de prueba para el radioenlace';
% Convierte el mensaje en una secuencia de bits
mensaje_binario = reshape(dec2bin(mensaje, 8)', 1, []);
num_bits = length(mensaje_binario);
if mod(num_bits, 2) ~= 0
    mensaje_binario = ['0', mensaje_binario];
    num_bits = num_bits + 1;
end
% Divide los bits en símbolos QPSK de 2 bits
bits_por_simbolo = 2;
num_simbolos = num_bits / bits_por_simbolo;
simbolos_qpsk = zeros(1, num_simbolos);

%Asignación de simbolo a cada dibit
for i = 1:num_simbolos
    bits = mensaje_binario((i - 1) * bits_por_simbolo + 1:i * bits_por_simbolo)
    simbolos_qpsk(i) = bin2dec(bits)
end

% Modulación QPSK
M = 4;
senal_modulada = pskmod(simbolos_qpsk, M,pi/4);
```

Figura 27. Código de la modulación QPSK para texto.

En la figura 27 se presenta el código de la modulación QPSK para texto. Similar a como se realiza en la modulación QAM lo primero que se hace es convertir a binario la cadena de texto que se quiere modular, a partir del número de bits que se obtienen estos se dividen en pares “dibits” para calcular el número de símbolos que representarán la información modulada. Cada dibit representará un símbolo de modulación que se les es asignado como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Representación del valor de modulación QPSK para cada par de bits.

Combinación de dibits	Símbolo asignado
00	1
01	2
10	3
11	4

```
bits = '01'
simbolos_qpsk = 1×148
     1     0     0     0     0

bits = '10'
simbolos_qpsk = 1×148
     1     2     0     0     0

bits = '11'
simbolos_qpsk = 1×148
     1     2     3     0     0

bits = '01'
simbolos_qpsk = 1×148
     1     2     3     1     0
```

Figura 28. Demostración del proceso de asignación de símbolo a cada dibit.

La Figura 28 ilustra el proceso de asignación de símbolos a partir de una cadena de bits mediante la modulación QPSK. Como se observa, esta técnica agrupa los bits dos a dos formando "dibits", a los cuales luego se hace corresponder un símbolo de la constelación como se mostró en la tabla 6. De este modo, los primeros 4 dibits de la cadena en el ejemplo, que son 01, 10, 11 y 01, se mapean a los símbolos 1, 2, 3 y 1 respectivamente formando una cadena de símbolos. Este procedimiento se repite sucesivamente para todos los pares de bits, que en total son 148 dibits para el caso planteado.

Una vez realizada la conversión de la cadena de bits a símbolos, el siguiente paso consiste en efectuar la modulación digital mediante QPSK. Para ello se emplea la función “pskmod” de MATLAB, configurada con el parámetro M=4 para especificar una modulación QPSK con 4 puntos en la constelación. Adicionalmente, se define un desfase de $\pi/4$ radianes en la portadora. De este modo, “pskmod” mapea cada símbolo discreto a uno de los 4 fasores de la constelación QPSK y genera la señal modulada correspondiente. La Figura 29 muestra la secuencia de símbolos QPSK resultante a la salida del modulador.

```
senal_modulada = 1×148 complex
    -0.7071 + 0.7071i   0.7071 - 0.7071i  -0.7071 - 0.7071i  -0.7071 + 0.7071i  -0.7071 + 0.7071i ···
```

Figura 29. Cadena de símbolos modulados por QPSK.

Ahora con los símbolos modulados que representan la información a transmitir se puede realizar la demodulación para recuperar la información original utilizando el código de la figura 30.

```
% Demodulación QPSK
simbolos_demodulados = pskdemod(senal_recibida, M,pi/4);

% Convierte los símbolos demodulados en bits nuevamente
bin = dec2bin(simbolos_demodulados);
datos_originales =[bin];
% Reorganizar los datos
datos_reorganizados = datos_originales';
% Convertir la matriz en una sola cadena
cadena_concatenada = char(datos_reorganizados(:)');
texto_demodulado = char(bin2dec(reshape(cadena_concatenada, 8, []).')).';

disp('texto original');
disp(mensaje);
% Visualizar el texto demodulado y la tasa de error de bits
disp('Texto Demodulado:');
disp(texto_demodulado);
```

Figura 30. Código de la demodulación QPSK para cadenas de texto.

Al igual que en QAM, el proceso de demodulación QPSK consiste en invertir las operaciones realizadas durante la modulación, con el objetivo de recuperar la información original. Inicialmente, la secuencia de símbolos modulados QPSK es procesada con la función "pskdemod" de MATLAB utilizando el mismo desfase de portadora π/4 rad especificado en el modulador. Esto elimina la modulación QPSK, obteniéndose nuevamente los símbolos discretos de la constelación.

Posteriormente, a partir de cada símbolo se extraen los dibits asociados según el mapeo configurado. La reagrupación ordenada de todos los dibits se reorganiza con el fin de obtener la cadena de bits que representa la información transmitida. Finalmente, dicha cadena de bits

es procesada para reconstruir el texto original enviado. En la figura 31 se muestra la salida dada por el código de la modulación QPSK para cadenas de texto.

```
texto original
mensaje de prueba para el radioenlace
Texto Demodulado:
mensaje de prueba para el radioenlace
```

Figura 31. Resultado dado por el código de modulación QPSK para texto.

4.3.2.2 Modulación QPSK para imágenes B/N

En este caso, la modulación para una imagen en escala de grises sigue el mismo principio que la modulación para cadenas de texto, con un par de cambios en el tratamiento de la información. En la figura 32 se observa el código utilizado para este tipo de modulación.

```
imagen = imread('Lena_Gray.jpg');
imagen_binaria = reshape(de2bi(imagen(:), 8, 'left-msb')', 1, []);
num_bits = length(imagen_binaria);
if mod(num_bits, 2) ~= 0
    imagen_binaria = ['0', imagen_binaria];
    num_bits = num_bits + 1;
end
% Divide los bits en símbolos QPSK de 2 bits
bits_por_simbolo = 2;
num_simbolos = num_bits / bits_por_simbolo;
simbolos_qpsk = zeros(1, num_simbolos);
% Asignación de simbolos
for i = 1:num_simbolos
    bits = imagen_binaria((i - 1) * bits_por_simbolo + 1:i * bits_por_simbolo);
    bits = num2str(bits);
    simbolos_qpsk(i) = bin2dec(bits);
end

% Parámetros de la modulación QPSK
M = 4;
senal_modulada = pskmod(simbolos_qpsk, M, pi/4);
```

Figura 32. Código de la modulación QPSK para imágenes B/N.

Para esta modulación se usa la matriz de intensidad de la imagen producida por la función "imread" que como se mostró en la modulación QAM de imágenes B/N contiene valores

enteros. Estos valores son convertidos a binarios y reordenados de modo que quede una única cadena sucesiva de números binarios. Luego estos binarios se dividen de dibits y se les asigna su respectivo símbolo según la tabla 6 mostrada anteriormente. Los símbolos obtenidos son modulados usando la función "pskdmod" configurada con el parámetro M=4 para especificar una modulación QPSK con 4 puntos en la constelación y se define un desface en la portadora de π/4 radianes. La figura 33 muestra los símbolos modulados usando QPSK.

```
senal_modulada = 1×202500 complex
    0.7071 - 0.7071i   0.7071 + 0.7071i  -0.7071 + 0.7071i  -0.7071 - 0.7071i   0.7071 - 0.7071i ···
```

Figura 33. símbolos de la imagen modulados con QPSK.

El código de la demodulación QPSK para imágenes B/N se muestra en la figura 34.

```
% Demodulación QPSK
simbolos_demodulados = pskdemod(senal_modulada, M,pi/4);

% Convierte los símbolos demodulados en una cadena de bits
bits_demodulados = dec2bin(simbolos_demodulados, bits_por_simbolo);
% Convierte la cadena de bits demodulados en un vector
matriz = reshape(bits_demodulados', 8, []).';

% Convierte el vector en la matriz de intensidad
imagen_demodulada = reshape(bin2dec(matriz), size(imagen, 1), size(imagen, 2));

% Visualización de la imagen demodulada
figure;
subplot(2, 1, 1);
imshow(uint8(imagen));
title('Imagen Original');

subplot(2, 1, 2);
imshow(uint8(imagen_demodulada));

title('Imagen Demodulada');
```

Figura 34. Código de la demodulación QPSK para imágenes B/N.

De modo similar que para cadenas de texto aquí lo primero que se hace es demodular los símbolos usando la función "pskdemod" y el mismo desfase de portadora π/4 rad especificado en el modulador para elimina la modulación QPSK, y obtener nuevamente los

símbolos discretos de la constelación. Seguido a esto se convierten los símbolos en una cadena de números binarios que luego se transforman en la matriz de intensidad que se usa para visualizar la imagen final. En la figura 35 se muestra la comparación entre la imagen original y la imagen entregada por el código de modulación QPSK.

Figura 35. comparación entre la imagen original y la imagen demodulada generada por el código de modulación QPSK.

A continuación, se detalla el funcionamiento de las etapas correspondientes al transmisor.

4.3.3 Funcionamiento del transmisor

4.3.3.1 Generador de la señal.

El generador de la señal que corresponde con la primera etapa del transmisor tiene dos tareas importantes:

La primera es convertir la información ya sea texto o imagen, en una cadena de bits que sirva para ser traducida en símbolos que posteriormente serán modulados.

La segunda tarea es agregar un preámbulo o encabezado a la cadena de bits de modo que sirva más adelante para mejorar la sincronización con el receptor. Lo anterior se puede observar en el diagrama de la figura 36.

Figura 36. Diagrama del generador de la señal.

Esta etapa del sistema hace uso de un preámbulo, el cual corresponde a un código de bits finito compuesto por valores de -1 y +1. Que en este caso está conformado por 13 bits. El programa replica dicha secuencia con el objetivo de obtener un total de 26 bits, garantizando de este modo que, al separar el preámbulo extendido en pares de bits para el mapeo a símbolos, se obtengan 13 símbolos.

Adicionalmente, con fines de compatibilidad, los valores originales de -1 se sustituyen por 0, conformando finalmente el preámbulo por una secuencia de 0s y 1s de 26 bits, que serán asignados en grupos de 2 bits a los símbolos correspondientes según el tipo de modulación empleada.

Luego de obtener los 26 bits del preámbulo, estos se concatenan al principio de la información binarizada, ya sea de texto o imagen, para obtener la información que será modulada. La programación del generador de la señal se encuentra disponible dentro del código en el anexo A.

4.3.3.2 Filtro RRC del transmisor

La razón de utilizar un filtro RRC (filtro paso-bajo con respuesta cosenoidal del inglés Root Raised Cosine) es disminuir la interferencia entre símbolos y suavizar los cambios de amplitud de símbolos consecutivos al momento de la transmisión, con el fin de facilitar la recuperación de los mismos mejorando la calidad del enlace.

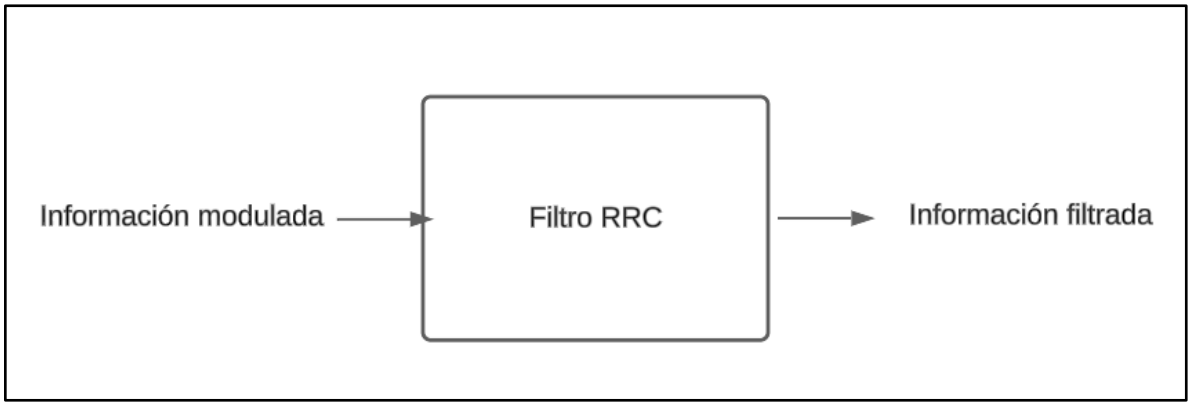

Figura 37. Código de la implementación del filtro RRC en el transmisor

Como se observa en la Figura 37, luego de que la información fue modulada, esta etapa aplica el filtro RCC de modo que procesa frame a frame realizando la conformación espectral correspondiente. La señal filtrada resultante es finalmente, la que será transmitida usando el dispositivo USRP emisor cuyo funcionamiento se muestra a continuación.

4.3.3.3 Etapa de transmisión

Para realizar la transmisión de la información, primero se debe configurar el dispositivo USRP que será usado para transmitir.

La configuración del transmisor USRP se lleva a cabo mediante la función "comm.SDRuTransmitter" de MATLAB, que permite definir los parámetros operativos bajo los cuales se gobernará el funcionamiento del dispositivo USRP.

Entre los parámetros esenciales que se deben establecer dentro de esta función se encuentran: la frecuencia portadora en la cual se realizará la transmisión, la ganancia o amplificación aplicada a la señal antes de enviarla, y la tasa de muestreo utilizada para la digitalización de la señal modulada.

Finalmente, para ejecutar la transmisión se debe especificar el tiempo de la misma, teniendo en cuenta cuánto tardará la información en transmitirse por completo, de modo que el transmisor no se detenga demasiado pronto. Además, esto sirve para mejorar la sincronización entre el emisor y el receptor, ya que ambos trabajarán bajo el mismo tiempo de funcionamiento. La programación de la etapa de transmisión se encuentra disponible dentro del código en el anexo A.

4.3.4 Funcionamiento del receptor

En esta sección se explica el funcionamiento de cada una de las etapas que comprenden el extremo receptor del sistema, la implementación en código de cada una de ellas se encuentra disponible en el anexo B.

4.3.4.1 Configuración del USRP receptor

Para poder recibir la información, primero es necesario realizar la configuración del dispositivo URSP de recepción. Esta se realiza utilizando la función “comm.SDRuReceiver” de MATLAB, que permite definir los parámetros de funcionamiento del USRP.

Dentro de los parámetros que deben ser especificados al invocar esta función se encuentran: la frecuencia central de la portadora a sintonizar, el valor de ganancia de recepción aplicado sobre la señal, la tasa de muestreo utilizada en el proceso de digitalización, y la cantidad de muestras por trama de datos que serán recibidas y procesadas.

4.3.4.2 Controlador automático de ganancia (AGC)

Usando la función “comm.AGC” en MATLAB, se logra configurar y aplicar un control automático de ganancia a una señal de entrada. Esta función ajusta dinámicamente la ganancia de la señal de entrada para mantener la potencia de la señal de salida dentro de un rango específico.

Por esta etapa pasa la información mientras está siendo captada por el receptor, de modo que a la salida de la función AGC se obtiene la información que ha sido recibida por el sistema.

4.3.4.3 Configuración del filtro RRC del receptor

Luego de ser amplificada, la información esta pasa por un filtro RCC que realiza la función inversa al primer filtro que se aplica en la etapa de transmisión, de esta forma se obtienen los datos que corresponden a la información transmitida antes de ser filtrada, es decir, la información correspondiente a los símbolos modulados.

4.3.4.4 Compensador de frecuencia y fase

En esta etapa, se utiliza la función "comm.CoarseFrequencyCompensator" para compensar los desplazamientos de frecuencia gruesa. Este proceso implica la estimación y corrección del desplazamiento. Inicialmente, se estima el desplazamiento de frecuencia utilizando técnicas como la correlación de la señal recibida con una señal de referencia conocida o algoritmos de estimación de frecuencia como la trasformada rápida de Fourier. Posteriormente, la función compensa dicho desplazamiento aplicando una corrección de frecuencia inversa a la señal recibida.

Luego de realizar la compensación de la frecuencia gruesa se utiliza la función “comm.PhaseFrequencyOffset” para estimar y compensar los desplazamientos de fase y frecuencia residuales en la señal recibida.

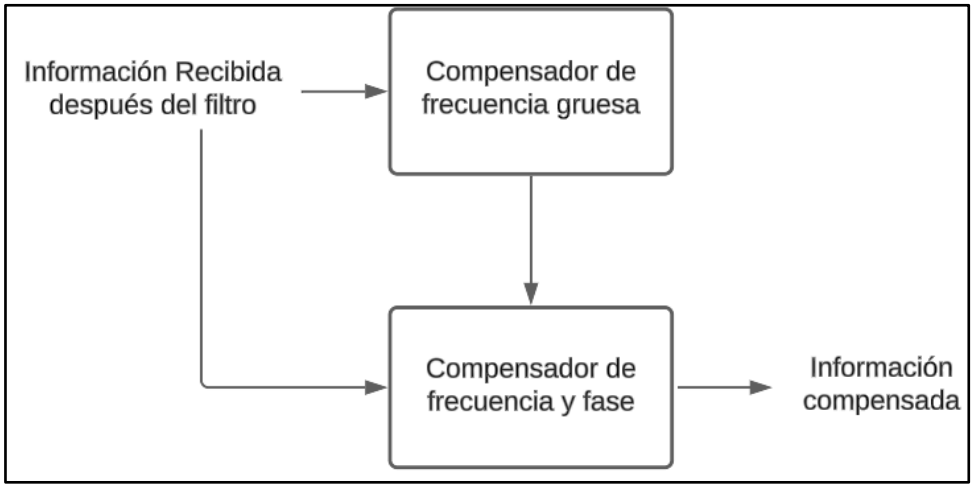

Figura 38. Diagrama del proceso que realiza la etapa del compensador de frecuencia y fase.

Como se muestra en la figura 38, la información recibida pasa por el compensador de frecuencia gruesa que se encarga de determinar el desplazamiento más grande de frecuencia generado en la transmisión y hacer la respectiva corrección a la información. Luego, el compensador de frecuencia y fase recibe la información compensada y la no compensada para poder estimar los desplazamientos tanto en frecuencia como en fase y así, realizar la corrección correspondiente.

4.3.4.5 Sincronizador de la portadora

Esa etapa tiene una función similar al compensador de frecuencia y fase, realiza una estimación y compensación de los desplazamientos tanto en fase como en frecuencia de la portadora de la señal, con el fin de evitar rotaciones de constelación y degradación en el rendimiento del receptor.

4.3.4.6 Detector del preámbulo

Esta etapa se encarga de encontrar el preámbulo dentro de la información recibida. Para crear el detector del preámbulo, se utiliza la función "comm.PreambleDetector" en MATLAB. Como se muestra en la figura 39, el detector recibe la información previamente sincronizada y los símbolos modulados que conforman el preámbulo dentro de la información transmitida.

Posteriormente, el detector inicia la búsqueda del preámbulo dentro de la información recibida. Una vez encontrado, guarda la ubicación del preámbulo en el "índice del preámbulo".

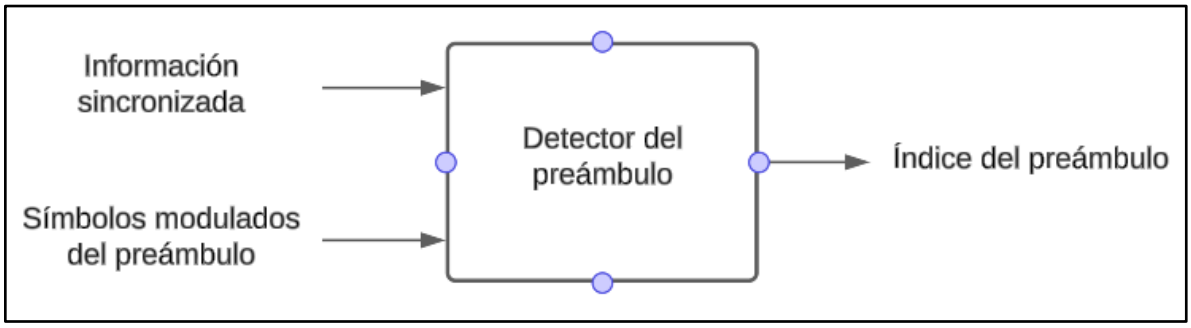

Figura 39. Diagrama de del funcionamiento del detector del preámbulo.

4.3.4.7 Sincronizador de frames

Como se muestra en la figura 40, esta etapa recoge la información sincronizada junto al índice del preámbulo y con esa información se encarga de separar los símbolos modulados del preámbulo y así obtener los datos relevantes para reconstruir la información original.

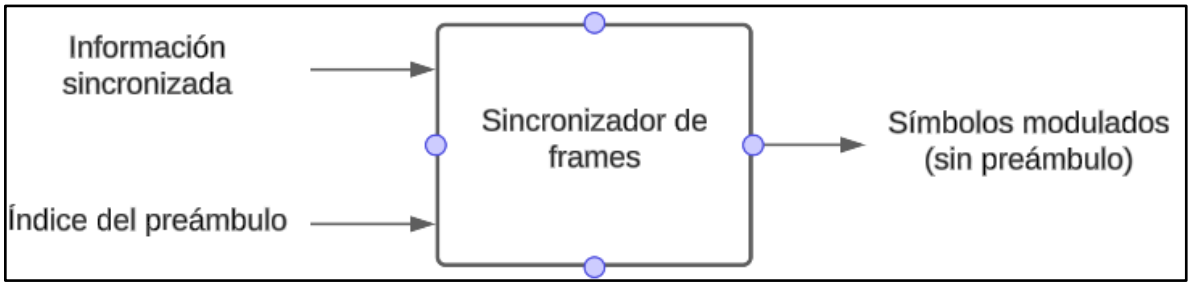

Figura 40,. Diagrama del funcionamiento del sincronizador frames.

4.3.4.8 Demodulación y visualización de la información recibida

Después de obtener los símbolos del sincronizador de frames, esta etapa se encarga de demodularlos para obtener la cadena de bits correspondiente a la información original. Posteriormente, se realizan los procesos necesarios para reconstruir la información a partir de dicha cadena de bits. Este proceso varía ligeramente dependiendo del esquema de modulación y de si se transmite texto o imagen. El funcionamiento detallado, según el tipo de modulación y la información transmitida, se abordó en la sección 4.3.2.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados se obtuvieron a partir de la realización de pruebas dentro de los espacios de laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia, donde se implementó el radioenlace. Como se muestra en la figura 41, se realizó la transmisión de información entre dos antenas conectadas a dos dispositivos USRP. La distancia entre las antenas es de aproximadamente un metro. Se utilizó un único computador conectado a ambos USRP para ejecutar los códigos de MATLAB del transmisor y del receptor.

Una vez hechas todas las conexiones correspondientes y la configuración de los dispositivos USRP, donde se especifica 1.27 GHz como la frecuencia a utilizar, se procede a ejecutar los códigos de transmisión y recepción para cada uno de los casos.

Figura 41. implementación del radioenlace.

5.1 Resultados de la transmisión de texto usando modulación 16-QAM

Al ejecutar los códigos del radioenlace usando 16-QAM para el envío de texto, se tiene que los símbolos que se reciben muestran una pequeña diferencia en amplitud comparados con los símbolos que fueron transmitidos. En la tabla 7 se aprecia esta comparación de la información sin el preámbulo.

Tabla 7. Comparación entre los símbolos modulados transmitidos y los símbolos modulados recibidos.

Símbolos modulados transmitidos	Símbolos modulados recibidos
-1.0000 + 3.0000i 3.0000 + 3.0000i -1.0000 - 3.0000i 1.0000 - 1.0000i -1.0000 - 3.0000i 1.0000 + 3.0000i -1.0000 - 3.0000i -3.0000 + 1.0000i -3.0000 - 3.0000i 1.0000 + 3.0000i ⋮	-1.1258 + 2.9308i 2.9820 + 3.0856i -0.6345 - 3.2508i 1.0024 - 0.7066i -0.8577 - 2.5994i 1.2931 + 2.6591i -0.8048 - 2.9045i -2.7519 + 0.8625i -2.8032 - 3.0457i 1.1554 + 3.2791i ⋮

Esta diferencia se puede observar también en la figura 42, donde se presenta el diagrama de constelación. Se logra apreciar la presencia de ruido o interferencia que se traduce en un pequeño corrimiento o superposición de los conjuntos de puntos que representan los símbolos en el diagrama.

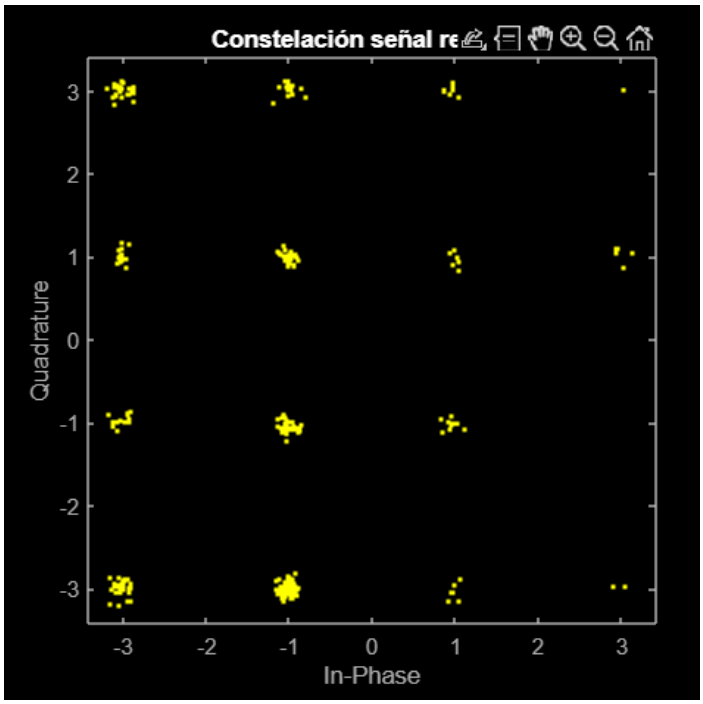

Figura 42. Diagrama de constelación de la información recibida usando 16-QAM para el envío de texto

A pesar de esta interferencia, el código logró demodular correctamente cada uno de los símbolos, de modo que el nivel de ruido presentado no es considerable como para dañar la transmisión. En la figura 43, se muestra el texto impreso por la consola en MATLAB donde se aprecia que la transmisión y recepción del texto se completó correctamente.

```
Texto Enviado:
Hola, este es un mensaje de prueba para el radioenlace del proyecto de
grado, se está utilizando 16-QAM como esquema de modulación.

Texto Recibido:
Hola, este es un mensaje de prueba para el radioenlace del proyecto de
grado, se está utilizando 16-QAM como esquema de modulación.
```

Figura 43. Comparación entre el texto enviado y el texto recibido por el radioenlace usando modulación 16-QAM

Para esta prueba no se tuvo en cuenta la tasa de error de bits (BER) debido a que la cantidad de bits transmitidos es demasiado pequeña como para obtener una estimación precisa que pueda ser tomada en cuenta, aun así, como se aprecia en la figura 43, la información fue recibida sin error aparente.

5.2 Resultados de la transmisión de texto usando modulación QPSK

Al emplear la modulación QPSK para la transmisión de datos de texto a través del radioenlace, se logró recuperar fielmente la información en el extremo receptor. La figura 44 exhibe el diagrama de constelación de la señal QPSK demodulada, donde se distinguen claramente los cuatro grupos de puntos correspondientes a los cuatro símbolos válidos de este esquema.

Cada uno de estos grupos se ubica en sus respectivos cuadrantes del plano complejo I/Q, indicando una adecuada separación entre símbolos y una mínima presencia de interferencias o ruido.

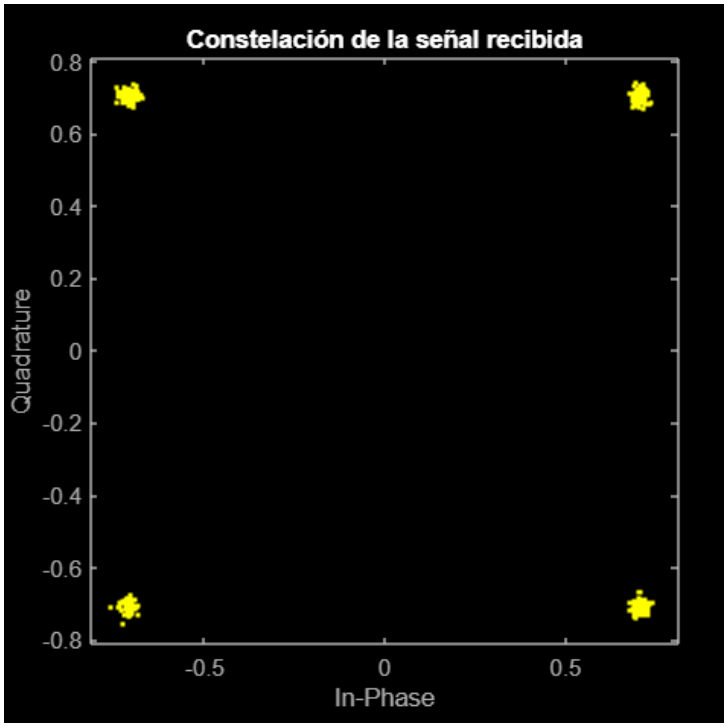

Figura 44. Diagrama de constelación de la información recibida usando QPSK para el envío de texto

En la figura 45, se observa la comparación entre el texto original transmitido y el texto impreso por la consola de MATLAB en el receptor, dado que la demodulación QPSK se completó de forma correcta el texto revido concuerda completamente con el texto enviado.

```
Texto Enviado:
Hola, este es un mensaje de prueba para el radioenlace del proyecto de
grado, la modulación utilizada es QPSK

Texto Recibido:
Hola, este es un mensaje de prueba para el radioenlace del proyecto de
grado, la modulación utilizada es QPSK
```

Figura 45. Comparación entre el texto enviado y el texto recibido por el radioenlace usando modulación QPSK

Similar a como sucede la prueba anterior, la cantidad de bits transmitidos no es suficiente como para obtener una estimación precisa de la tasa de error de bits (BER)

A continuación, en las tablas 8 y 9, se procede a realizar un análisis del cumplimiento de los distintos requerimientos planteados en la sección 4.1.

Tabla 8. Análisis de los requerimientos funcionales.

Descripción	Cumplimiento
El sistema debe funcionar con una frecuencia que sea catalogada por la ANE como frecuencia de radio aficionado para evitar posibles interferencias con ondas de radiofrecuencia externas.	El sistema funciona a una frecuencia de 1.27GHz, que fue escogida precisamente teniendo en cuenta la disponibilidad según la ANE como se aprecia en la subsección 4.2.2.
El sistema debe lograr la modulación y transmisión de información.	Este requerimiento se cumple, ya que el sistema logra la modulación y transmisión de información según lo presentado en el análisis de resultados.
El sistema debe reconstruir y visualizar la información recibida.	Las figuras 43 y 45 muestran como el sistema permite reconstruir y visualizar la información recibida.

Tabla 9. Análisis de los requerimientos de calidad.

Descripción	Cumplimiento
El sistema debe operar de manera óptima bajo las condiciones atmosféricas de la ciudad de Bogotá.	El radioenlace se implementó en la ciudad de Bogotá donde se completó con éxito la transmisión de información.
El sistema debe validar la calidad del enlace por medio de la tasa de error de Bits (BER).	El sistema puede determinar la tasa BER comparando las cadenas de bits transmitida y recibida, pero dado que los resultados presentados en el documento no cuentan con la suficiente cantidad de información tramitada como para hacer una estimación precisa, para el sistema el valor de BER es de 0.0.

6. CONCLUSIONES

Se desarrolló un radioenlace punto a punto que permite la transmisión de información de manera inalámbrica. Para su implementación, se utilizaron dos antenas que cumplían con los parámetros establecidos en el documento, dos dispositivos USRP encargados de la transmisión y recepción de señales, esquemas de modulación como QAM y QPSK, y el software MATLAB para la programación del radioenlace. Este sistema se implementó y puso a prueba en la ciudad de Bogotá, permitiendo observar su comportamiento y funcionamiento. Del análisis de los resultados obtenidos, se puede concluir que:

1. Las antenas seleccionadas para la implementación del radioenlace permiten la transmisión y recepción de información bajo una frecuencia de trabajo de 1,27 GHz y, al ser de tipo bocina, su directividad es perfecta para establecer un enlace con línea de vista. Además, su acople a una impedancia de 50Ω les permite funcionar junto a los dispositivos USRP.
2. El radioenlace implementado demostró ser adecuado para la transmisión de datos de texto cortos, alcanzando una tasa de error despreciable con ambos esquemas de modulación (16-QAM y QPSK) bajo las condiciones de prueba. Sin embargo, la presencia de ruido observable en los diagramas de constelación indica que se requeriría mejorar la relación señal-ruido para permitir enlaces de mayor alcance preservando una baja tasa de error.
3. Para la transmisión de textos cortos como los utilizados en las pruebas, la tasa de error de bits (BER) es despreciable, ya que no es posible obtener una medición precisa y confiable usando tan poca información.
4. Se realizaron pruebas de transmisión de imágenes, donde se obtuvo una tasa de error de bits considerable (aproximadamente de 0.489) lo que significa que la recepción de la información no es correcta. Dentro de los posibles factores que pueden afectar la correcta recepción de las imágenes, la sincronización entre los dispositivos USRP se debe garantizar para obtener resultados apropiados, lo anterior se concluye dado que las condiciones de ruido en el canal, apuntamiento y distancia entre antenas se mantuvieron constantes durante las pruebas.

7. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta el desarrollo del proyecto y los resultados obtenidos se postulan las siguientes recomendaciones con el objetivo de mejorar su funcionamiento y expandir su alcance.

1. Evaluar diferentes bandas de frecuencia, tanto por encima como por debajo de 1,27 GHz, para determinar aquellas que presenten un mejor comportamiento en términos de propagación en ambientes boscosos.
2. Explorar esquemas de modulación digital más robustos y eficientes en cuanto a tasa de transferencia, como pueden ser QAM de mayor orden (256-QAM) u OFDM con el fin de transmitir imágenes y datos de alta tasa con mayor confiabilidad.
3. Considerar el uso de un reloj externo conectado entre los dispositivos USRP, esto puede ayudar a mejorar la sincronización entre el transmisor y el receptor con el fin de reducir el número de perdidas en la transmisión.
4. Estudiar mecanismos de ecualización y corrección de errores en tiempo real para mitigar el desvanecimiento de la señal y mantener una alta calidad de transmisión.
5. Investigar métodos de optimización del uso del espectro para maximizar el ancho de banda disponible y la eficiencia espectral del enlace.
6. Realizar pruebas en campo representativas del escenario amazónico real, considerando efectos como vegetación densa, condiciones climáticas adversas, irregularidades del terreno, entre otros factores que pudiesen impactar al radioenlace.
7. Realizar simulaciones del radio enlace teniendo en cuenta pérdidas y desvanecimientos por multi trayectorias.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] H. N. Sares Quiroz, "Implementación de un sistema de transmisión y recepción inalámbrica OFDM de imagen en ambiente real usando USRP y LabVIEW", Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2016.

[2] N. E. Arévalo Arias, "Transmisión y recepción de imagen con modulación QPSK usando radio definido por software", Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2017.

[3] J. R. Sanabria Lemos y D. A. Nieva Suárez, "Sistema de comunicación SDR para modulaciones PSK y QAM", Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2018. [En línea]. Disponible en: https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/0e194d3c-101c-4ad4-b2e3-7f6f8e8bdd95/content

[4] C. A. Guio Rodríguez, L. F. Jiménez, J. N. Cuadrado González, y G. A. Rodríguez Penagos, "Plan de Manejo Parque Nacional Natural Rio Pure". 2004.

[5] Y. Xing y T. S. Rappaport, "Terahertz Wireless Communications: Co-sharing for Terrestrial and Satellite Systems above 100 GHz", *IEEE Communications Letters*, pp. 1–5, mayo de 2021.

[6] A. N. del Espectro, "Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia", 2017.

[7] Wayne. Tomasi, "EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO", en *Sistemas de comunicaciones eléctricas.*, 4a ed., Pearson Education, Inc., 2003, pp. 4–6.

[8] J. A. Bava y A. J. Sanz, *Microondas y recepción satelital*. Editorial Hispano Americana, 1995. [En línea]. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/36183

[9] Unión internacional de Telecomunicaciones UIT, "Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones", vol. V.431-8. Ginebra, suiza, 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-8-201508-I!!PDF-S.pdf

[10] Wayne. Tomasi, “EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO”, en *Sistemas de comunicaciones eléctricas.*, 4a ed., Pearson Education, Inc., 2003, pp. 4–6.

[11] P. V Nikitin y K. V. S. Rao, “Antennas and Propagation in UHF RFID Systems”, en *2008 IEEE International Conference on RFID*, 2008, pp. 277–288. doi: 10.1109/RFID.2008.4519368.

[12] J. L. Martinez, “¿Qué es un radioenlace?” [En línea]. Disponible en: https://jlmartinez-es.medium.com/qué-es-un-radioenlace-159ab9a66775

[13] J. Hernández Constante y J. C. Aldaz Rosas, “Cálculo de Radio Enlace Terrestre”, *SOMI XXXI Congreso de Instrumentación*, septiembre de 2016. Consultado: el 3 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/309591673

[14] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT, “Rec. UIT-R P.525-2”. Ginebra. [En línea]. Disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-2-199408-I!!PDF-S.pdf

[15] “Tasa de error de bits (BER) - Definición y explicación”. [En línea]. Disponible en: https://techlib.net/techedu/tasa-de-error-de-bits-ber/

[16] “IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas”, *IEEE Std 145-1983*, pp. 1–31, 1983, doi: 10.1109/IEEESTD.1983.82386.

[17] C. A. Balanis, “Antennas”, en *Antenna Theory Analysis and Design*, 4a ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016, pp. 1–22.

[18] C. A. Balanis, “Radiation Pattern”, en *Antenna Theory Analysis and Design*, 4a ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016, p. 25.

[19] K. W. Pérez Albuja, “Diseño de la red inalámbrica de área metropolitana, para proveer servicios de internet, aplicando el estándar IEEE 802”, Ibarra, 2017.

[20] C. A. Balanis, “Radiation Pattern”, en *Antenna Theory Analysis and Design*, 4a ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016, p. 35.

[21] C. A. Balanis, “Radiation Intensity”, en *Antenna Theory Analysis and Design*, 4a ed., John Wiley & Sons, Inc., 2016, p. 37.

[22] C. A. Balanis, “Directivity”, en *Antenna Theory Analysis and Design*, 4a ed., John Wiley & Sons, Inc., 2016, p. 41.

[23] G. de J. Alarcón Hernández y W. Reyes Contreras, “Diseño de una antena serpenteada para aplicaciones de RFID en la banda UHF 915 MHz”, Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 2015.

[24] “IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas”, *IEEE Std 145-1983*, pp. 1–31, 1983, doi: 10.1109/IEEESTD.1983.82386.

[25] J. M. Huidobro, “Antenas de telecomunicaciones”, *Revista Digital de ACTA* , vol. 18, 2013.

[26] juan C. Gomez, L. Barrero Páez, y R. Celeita, “Diseño de antenas Yagi Uda usando algoritmos genéricos”, Bogotá, 2003.

[27] B. Kidney, “Horn Antennas Engineering 9816 - Antennas”, 2001.

[28] A. Baldominos, J. Manuel, y S. Puente, “Optimización de la Quad-Ridge Flared Horn para la estación VGOS del Observatorio de Yebes”, Yebes, España, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/330727560

[29] J. Nateghi, L. Mohammadi, y G.R. Solat, “Analysis of the four-horn monopulse for LEO satellite tracking using the exact model”, 11th International Conference on Advanced Communication Technology . [En línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4809664

[30] C. A. Balanis, “Horn Antennas”, en *Antenna Theory Analysis and Design Fourth Edition*, 4a ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016, p. 719.

[31] J. K. A. Soares, “Software defined radio: investigación y verificación de pruebas en una plataforma libre”, *Revista científica multidisciplinaria base de conocimiento*, vol. 8, pp. 228–244, sep. 2016.

[32] T. F. Collins, R. Getz, Di Pu, y A. M. Wyglinsk, “Understanding SDR Hardware”, en *Software-Defined Radio for Engineers*, United States of America, 2018, pp. 171–172.

[33] E. Jami y D. Defaz, “USRP (UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PHERIPHETRAL)”, *ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO*.

[34] Ettus Research, “USRP™ B200mini Series Product Overview”, Texas. [En línea]. Disponible en: www.ni.com

[35] R. Sotelo y D. Durán, “Modulación digital: aplicación a la televisión digital en DVB”, *Memoria investigaciones de ingeniería*, vol. 6, pp. 42–63, el 1 de octubre de 2008. [En

línea]. Disponible en: https://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/263

[36] "IQ Data Explained | Amateur Radio – PEØSAT". [En línea]. Disponible en: https://www.pe0sat.vgnet.nl/sdr/iq-data-explained/

[37] J. Luque Rodríguez y S. Clavijo Suero, "Modulación QAM", en *Modulación de Señales Digitales*, Sevilla: Universidad Politécnica de Sevilla, 1995, pp. 60–67.

[38] J. L. Rodríguez y S. C. Suero, "Modulación PSK", en *Modulación de Señales Digitales*, Universidad Politécnica de Sevilla, 1995, pp. 30–36.

[39] Wayne. Tomasi, "Manipulación por desplazamiento cuaternario de fase", en *Sistemas de comunicaciones eléctricas.*, 4a ed., Pearson Education, Inc., 2003, p. 484.

[40] Agencia Nacional del Espectro, "Cuadro Nacional de Atribución de Bandas - CNABF". [En línea]. Disponible en: https://portalespectro.ane.gov.co/Style%20Library/ane_master/cnabf-tecnico.aspx

[41] The MathWorks Inc., "Communications Toolbox™ Support Package for USRP™ Radio User's Guide". 2023. [En línea]. Disponible en: https://la.mathworks.com/help/pdf_doc/supportpkg/usrpradio/usrpradio_ug.pdf

[42] TekBox, "1 GHz – 8 GHz Double Ridged Horn Antenna". 2020. [En línea]. Disponible en: https://res.cloudinary.com/iwh/image/upload/q_auto,g_center/assets/1/26/TekBox_TBMA4-Manual.pdf

ANEXOS

ANEXO A: CÓDIGO DEL TRANSMISOR

A continuación, se presenta el código usado para ejecutar la transmisión de la información. En este caso, el código corresponde a la transmisión de imágenes usando modulación QPSK, para realizar la transmisión usando otro tipo de modulación el código debe ser modificado teniendo en cuenta la información presentada en la sección 4.3.2. En cualquiera de los casos la estructura principal del código es la misma.

```
RolloffFactor = 0.5;
RaisedCosineFilterSpan = 10;
UpsamplingFactor = 1;

rrcFiltertx = comm.RaisedCosineTransmitFilter( ...
                'RolloffFactor',                RolloffFactor, ...
                'FilterSpanInSymbols',          RaisedCosineFilterSpan, ...
                'OutputSamplesPerSymbol',       UpsamplingFactor);

% Secuencia de Barker compleja (preámbulo)
BarkerCode = [+1 +1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1];
BarkerCodeComplex = complex(BarkerCode);
longitud_deseada = 26;
num_repeticiones = ceil(longitud_deseada / length(BarkerCode));
preambulo = repmat(BarkerCode, 1, num_repeticiones);


imagen_a_transmitir = imread('Lena_Gray.jpg');
imagen_binaria = reshape(de2bi(imagen_a_transmitir(:), 8, 'left-msb')', 1,
[]);


datos_preambulo = [preambulo, imagen_binaria];
% Separación de los datos en simbolos
if mod(num_bits, 2) ~= 0
    datos_preambulo = ['0', datos_preambulo];
    num_bits = num_bits + 1;
end
bits_por_simbolo = 2;
num_simbolos = num_bits / bits_por_simbolo;
simbolos_qpsk = zeros(1, num_simbolos);


for i = 1:num_simbolos
    bits = datos_preambulo((i - 1) * bits_por_simbolo + 1:i *
bits_por_simbolo);
```

```
    bits = num2str(bits);
    simbolos_qpsk(i) = bin2dec(bits);
end


% Modulación QPSK
M = 4;
senal_modulada = pskmod(simbolos_qpsk, M,pi/4);
% Aplicar el filtro RRC a los símbolos modulados
senal_modulada_filtrada = rrcFiltertx(senal_modulada);


% Parámetros de la transmisión
frecuencia_portadora = 1.27e9;
ganancia_transmisor = 45;
SerialNum = '31BA19F';
InterpolationFactor = 2;
tasa_de_muestreo = 5e6;
bits_por_muestra = 2;
cantidad_de_datos = length(senal_modulada);
tasa_bits = length(imagen_binaria);
Ef_aspectral = 2;
Ancho_banda = tasa_bits/Ef_aspectral;


% Configuración del sistema USRP
tx = comm.SDRuTransmitter(...
    'Platform', 'B200', ...
    'SerialNum', SerialNum , ...
    'CenterFrequency', frecuencia_portadora, ...
    'Gain', ganancia_transmisor, ...
    'MasterClockRate', tasa_de_muestreo,...
    'InterpolationFactor', InterpolationFactor, ...
    'EnableTimeTrigger',true, ...
    'TriggerTime',5);


duracion_transmision = (cantidad_de_datos / (tasa_de_muestreo *
bits_por_muestra));


currentTime = 0;
stop = 100;


while currentTime < stop
   tx(senal_modulada(:));
     currentTime=currentTime+duracion_transmision;
end
release(tx);
```

ANEXO B: CÓDIGO DEL RECEPTOR.

A continuación, se presenta el código usado para ejecutar la recepción de la información. En este caso, el código corresponde a la recepción de imágenes usando modulación QPSK, para realizar la recepción usando otro tipo de demodulación el código debe ser modificado teniendo en cuenta la información presentada en la sección 4.3.2. En cualquiera de los casos la estructura principal del código es la misma.

```
imagen = imread('Lena_Gray.jpg');

% Parámetros de la recepción
frecuencia_portadora = 1.27e9;
ganancia_receptor = 40;
tasa_muestreo = 5e6;
bits_por_muestra = 1;
SampleRate = 202513;
duracion_transmision = ((SampleRate) / (tasa_muestreo * bits_por_muestra));
num_muestras = duracion_transmision * tasa_muestreo;
bits_por_simbolo = 2;
M = 4;
DecimationFactor = 1;
FrameSize = 202500;
HeaderLength = 13;
DesiredPower = 2;
AveragingLength = 50;
MaxPowerGain = 20;
RolloffFactor = 0.5;
RaisedCosineFilterSpan = 10;
InputSamplesPerSymbol = 1;
MaximumFrequencyOffset = 9e3;
PostFilterOversampling = 2;
PhaseRecoveryLoopBandwidth = 0.01;
PhaseRecoveryDampingFactor = 0.707;
TimingRecoveryDampingFactor = 1;
TimingRecoveryLoopBandwidth = 0.01;
TimingErrorDetectorGain = 2.7;
PreambleDetectorThreshold = 8;


 preambulo = sqrt(2)/2 * (-1-1i) * [+1; +1; +1; +1; +1; -1; -1; +1; +1; -1;
+1; -1; +1];

rrcFilterRx = comm.RaisedCosineReceiveFilter( ...
                    'RolloffFactor',            RolloffFactor, ...
```

```
                    'FilterSpanInSymbols',      RaisedCosineFilterSpan, ...
                    'InputSamplesPerSymbol',    InputSamplesPerSymbol, ...
                    'DecimationFactor',         DecimationFactor);

coarseFreqCompensator = comm.CoarseFrequencyCompensator( ...
                    'Modulation',               'QPSK', ...
                    'Algorithm',                'FFT-based', ...
                    'SampleRate',               SampleRate/DecimationFactor,
...
                    'FrequencyResolution', 1000);

phaseFreqOffset = comm.PhaseFrequencyOffset( ...
                'PhaseOffset',              0, ...
                'FrequencyOffsetSource',    'Input port', ...
                'SampleRate',               SampleRate/DecimationFactor);


agc = comm.AGC('DesiredOutputPower', DesiredPower, ...
                'AveragingLength', AveragingLength, ...
                'MaxPowerGain', MaxPowerGain);


carrierSync = comm.CarrierSynchronizer( ...
                'Modulation',               'QPSK', ...
                'ModulationPhaseOffset',    'Auto', ...
                'SamplesPerSymbol',         PostFilterOversampling, ...
                'DampingFactor',            PhaseRecoveryDampingFactor, ...
                'NormalizedLoopBandwidth',  PhaseRecoveryLoopBandwidth);


symbolSync = comm.SymbolSynchronizer('TimingErrorDetector','Gardner (non-
data-aided)', ...
                'SamplesPerSymbol',         PostFilterOversampling, ...
                'DampingFactor',            TimingRecoveryDampingFactor, ...
                'NormalizedLoopBandwidth',  TimingRecoveryLoopBandwidth, ...
                'DetectorGain',             TimingErrorDetectorGain);


preambleDetector = comm.PreambleDetector((preambulo(:)), ...
                'Input',                    'Symbol', ...
                'Threshold',                PreambleDetectorThreshold);


pFrameSync = comm.internal.examples.FrameSynchronizer(  ...
                'OutputFrameLength',        FrameSize, ...
                'PreambleLength',           HeaderLength / 1);


DescreamblerData = comm.Descrambler('CalculationBase', DescramblerBase, ...
```

```
                                    'InitialConditions',
DescramblerInitialConditions, ...
                                    'Polynomial', DescramblerPolynomial);


% Configuración del dispositivo USRP
rx = comm.SDRuReceiver(...
    'Platform', 'B200', ...
    'SerialNum', '3116B2A', ...
    'CenterFrequency', frecuencia_portadora, ...
    'Gain', ganancia_receptor, ...
    'MasterClockRate', tasa_muestreo, ...
    'DecimationFactor', 1, ...
    'SamplesPerFrame', 202513,...
    'OutputDataType', 'double', ...
    'EnableTimeTrigger',true, ...
    'TriggerTime',5);


datos_recibidos = [];
preambulo_detectado = false;
pCnt=0;
pMeanFreqOff=0;
currentTime = 0;
stop = 60;


while currentTime < stop
    datos = rx();

   datosAGC = agc(datos);


     filtro = rrcFilterRx(datosAGC);


     [~, freqOffsetEst] = coarseFreqCompensator(filtro);
     freqOffsetEst = (freqOffsetEst + pCnt * pMeanFreqOff)/(pCnt+1);
             pCnt = pCnt + 1;
     pMeanFreqOff = freqOffsetEst;


     coarseCompSignal = phaseFreqOffset(filtro, -freqOffsetEst);


      fineCompSignal = carrierSync(coarseCompSignal);


    % Detección de preámbulo
    if ~preambulo_detectado
```

```
        [prbIdx, dtMt] = preambleDetector(fineCompSignal);
        if prbIdx > 0
            preambulo_detectado = true;
            datos_recibidos = fineCompSignal(prbIdx:end);
        end
    else
    end
    [symFrame, isFrameValid] = pFrameSync(datos_recibidos, prbIdx, dtMt);
    if isFrameValid
    en
    currentTime = currentTime + duracion_transmision;
end
release(rx);


dt = reshape(symFrame, 1, 202500);
rxSig = awgn(dt,25);
scatterplot(rxSig)


% Demodulación QPSK
simbolos_demodulados = pskdemod(dt, M, pi/4);


% Convierte los símbolos demodulados en una cadena de caracteres de bits
bits_demodulados = dec2bin(simbolos_demodulados, bits_por_simbolo);


% Convierte la cadena de bits demodulados en una matriz
matriz = reshape(bits_demodulados', 8, []).';
imagen_demodulada = reshape(bin2dec(matriz), size(imagen, 1), size(imagen,
2));


figure;
subplot(2, 1, 1);
imshow(uint8(imagen));
title('Imagen Original');

subplot(2, 1, 2);
imshow(uint8(imagen_demodulada));
title('Imagen Demodulada');
```