REPÚBLICA DEL ECUADOR
Escuela Politécnica Nacional
"E SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.

- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.

- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

PRUEBAS DE CAMPO SOBRE PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN RADIOENLACE CON EQUIPOS DE RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE

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

CRISTHIAN FERNANDO LUNA GER

DIRECTOR: DR. ROBIN GERARDO ÁLVAREZ RUEDA

Quito, noviembre 2019

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Cristhian Fernando Luna Ger, bajo mi supervisión.

Ph.D. Robin Álvarez Rueda
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Cristhian Fernando Luna Ger, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

Cristhian Fernando Luna Ger

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi madre, hermanos y a la memoria de mi padre, quiénes me apoyaron a lo largo de mi vida y sobre todo en mi carrera estudiantil.

AGRADECIMIENTO

A mis tíos, primos por su buen trato, cariño, y ayuda incondicional.

A mi tutor de tesis, por su tiempo y consejos invertidos en el desarrollo del proyecto.

A los docentes de la Facultad de Eléctrica/Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional por haber compartido sus conocimientos y experiencias de vida a lo largo de mi preparación profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA II
DEDICATORIA III
AGRADECIMIENTO IV
ÍNDICE DE CONTENIDO V
RESUMEN VIII
ABSTRACT IX
1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 OBJETIVOS 2
1.2 ALCANCE 2
1.3 MARCO TEÓRICO 4
1.3.1 PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS 4
1.3.1.1 Ondas electromagnéticas 4
1.3.1.2 Formas de propagación terrestre de las ondas electromagnéticas 9
1.3.2 SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE COMUNICACIÓN 10
1.3.2.1 Radioenlace 10
1.3.2.1 Presupuesto del enlace 15
1.3.3 RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE 36
2. METODOLOGÍA 36
2.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA 36
2.1.1 HARDWARE UTILIZADO EN LA IMPLEMENTACIÓN 36
2.1.1.1 Antena RocketDish-2G24 37
2.1.1.2 Equipo de Radio Definido por Software Adalm Pluto 42
2.1.1.3 Computador, Mástil 49
2.1.2 SOFTWARE 50
2.1.2.1 GNU Radio 50
2.1.2.2 Radio Mobile 57
2.1.3 ENSAMBLADO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN/RECEPCIÓN 62
2.2 ESQUEMAS PARA PRUEBAS DE PROPAGACIÓN 64
2.2.1 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS DE TRANSMISIÓN POR ESPACIO LIBRE 64

2.2.2 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR ZONA DE FRESNEL 65
2.2.3 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR APUNTAMIENTO 65
2.2.3.1 Evaluación de pérdidas por ángulo de elevación 65
2.2.3.2 Evaluación de pérdidas por ángulo de azimut 66
2.2.4 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR POLARIZACIÓN 67
2.2.5 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS POR INFLUENCIA DE TERRENO 68
2.2.5.1 Tierra promedio 68
2.2.5.2 Tierra húmeda 68
2.2.5.3 Superficie agua 69
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 69
3.1 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS DE TRANSMISIÓN POR ESPACIO LIBRE 70
3.2 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR ZONA DE FRESNEL 72
3.3 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR APUNTAMIENTO 74
3.3.1 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS POR ÁNGULO DE ELEVACIÓN 74
3.3.2 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS POR ÁNGULO DE AZIMUT 78
3.4 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR POLARIZACIÓN 81
3.5 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS POR INFLUENCIA DEL TERRENO 83
3.5.1 TIERRA PROMEDIO 83
3.5.1.1 Medición de potencia 84
3.5.1.2 Simulación del Radioenlace en Radio Mobile 84
3.5.1.3 Cálculo Teórico 87
3.5.2 TIERRA HÚMEDA 89
3.5.2.1 Medición de Potencia 90
3.5.2.2 Simulación del radioenlace en Radio Mobile 90
3.5.2.3 Cálculo teórico 91
3.5.3 SUPERFICIE AGUA 92
3.5.3.1 Medición de potencia 93
3.5.3.2 Simulación del Radioenlace en Radio Mobile 94
3.5.3.3 Cálculo teórico 94
3.6 DISTANCIA MÁXIMA ALCANZADA CON EL RADIOENLACE 97
3.6.2 NIVEL DE POTENCIA 98
3.6.3 SIMULACIÓN DEL ENLACE EN RADIO MOBILE 98
3.6.4 CÁLCULO TEÓRICO 99
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 101

4.1 CONCLUSIONES..... 101
4.2 RECOMENDACIONES 103
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 104
ANEXOS 107

RESUMEN

El presente trabajo de titulación consiste en realizar una serie de pruebas de campo para evaluar las pérdidas por propagación de onda electromagnética, considerando: distancia del radioenlace, frecuencia de operación, apuntamiento de la antena (ángulo de elevación y ángulo de azimut), polarización de la antena, altura de las antenas en la primera zona de Fresnel y la influencia del terreno (tierra promedio, tierra húmeda y superficie de agua).

Las pruebas se las realizará mediante la implementación de un radioenlace, que consiste en: equipos portátiles de Radio Definido por Software SDR-Adalm Pluto, antenas Direccionales Ubiquiti RocketDish 2G24, computadores y mástil. Se utilizará el software GNU Radio para operar los equipos de Radio Definido por Software y medir la potencia en recepción. Los resultados obtenidos se compararán con resultados teóricos y simulados.

Adicionalmente se presentará una aplicación del radioenlace en un diagrama de GNU Radio para la transmisión full-dúplex de audio/voz en tiempo real. La implementación del sistema de transmisión y recepción servirá de ayuda para desarrollar futuras aplicaciones con el uso de equipos SDR.

PALABRAS CLAVE: Propagación, Radioenlace, Antenas, SDR, GNU Radio.

ABSTRACT

The present work consists a series of field testing to evaluate the losses due to electromagnetic wave propagation, considering: radio link range, operating frequency, antenna pointing (elevation angle and azimuth angle), polarization of the antenna, antenna height in the first Fresnel zone and the influence of the terrain (average ground, wet ground and water surface).

The tests will be carried out through the implementation of a radio link, which consists of: Software Defined Radio SDR-Adalm Pluto portable equipments, Ubiquiti RocketDish 2G24 directional antennas, computers and radio mast. The GNU Radio software will be used to operate the Software Defined Radio equipments and measuring the reception power. The results obtained will be compared with theoretical and simulated results.

Additionally, a radio link application will be presented in a GNU Radio diagram for real-time full-duplex audio/voice transmission. The implementation of the transmission and reception system will help to develop future applications with the use of SDR equipments.

KEYWORDS: Propagation, Radio Link, Antennas, SDR, GNU Radio

1. INTRODUCCIÓN

Los radioenlaces terrenales forman parte fundamental de la infraestructura de telecomunicaciones de la mayoría de los países del mundo, dicho sistema utiliza la propagación de ondas electromagnéticas a través de un medio no guiado como es el espacio para efectuar un enlace de radiocomunicaciones punto a punto. Una correcta estimación de las pérdidas en la propagación de ondas electromagnéticas tiene una importancia crucial para el adecuado funcionamiento de la red y la calidad de los servicios prestados.

En la formación tradicional de un estudiante se tiene la base teórica sobre la propagación de ondas electromagnéticas en sistemas de radioenlaces, por ejemplo: se conoce por el modelo de espacio libre que las pérdidas aumentan a medida que se incrementa la distancia y/o frecuencia de operación, también hay que despejar la primera zona de Fresnel para garantizar un radio enlace, o que una antena con cierta polarización no puede captar señales en la polarización contraria, pero no se conoce en cuanto varían los resultados reales de los resultados aplicando la teoría. Conocer de manera práctica las pérdidas que sufre una señal en los sistemas de radioenlace terrenales punto a punto mejorarán la preparación preprofesional de cualquier estudiante de la carrera de Telecomunicaciones.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es implementar un radioenlace terrenal punto a punto en un ambiente rural utilizando equipos de Radio Definido por Software, variar algunos de sus parámetros, medir la potencia de la señal en recepción y comparar los resultados prácticos obtenidos con los resultados calculados y simulados.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Desarrollar el cálculo teórico de un radioenlace teniendo en cuenta los parámetros considerados que son: pérdida por espacio libre (frecuencia de operación y distancia entre el transmisor y receptor), altura de las antenas, ganancia de las antenas, tipo de terreno (tierra promedio, tierra húmeda y agua dulce).
- Simular el presupuesto del radioenlace utilizando el software gratuito Radio Mobile.
- Implementar el radioenlace con equipos de Radio Definido por Software (SDR), medir el pico de potencia y evaluar las pérdidas por: apuntamiento (ángulo de elevación, ángulo de azimut), polarización de la antena, variación de la altura de las antenas con respecto al radio de la primera zona de Fresnel, influencia del terreno (tierra promedio, tierra húmeda y agua dulce).
- Comparar los resultados prácticos con los resultados simulados y resultados aplicando la teoría.

1.2 ALCANCE

Para las pruebas de propagación se implementará un radioenlace terrenal punto a punto con línea de vista, que constará de un sistema de transmisión y un sistema de recepción se desarrollará diagramas de bloques en GNU Radio para la transmisión y recepción de una portadora de valor constante y se utilizará equipos de radio definido por software de bajo costo para el envío y recepción de la señal (ver Figura 1.1).

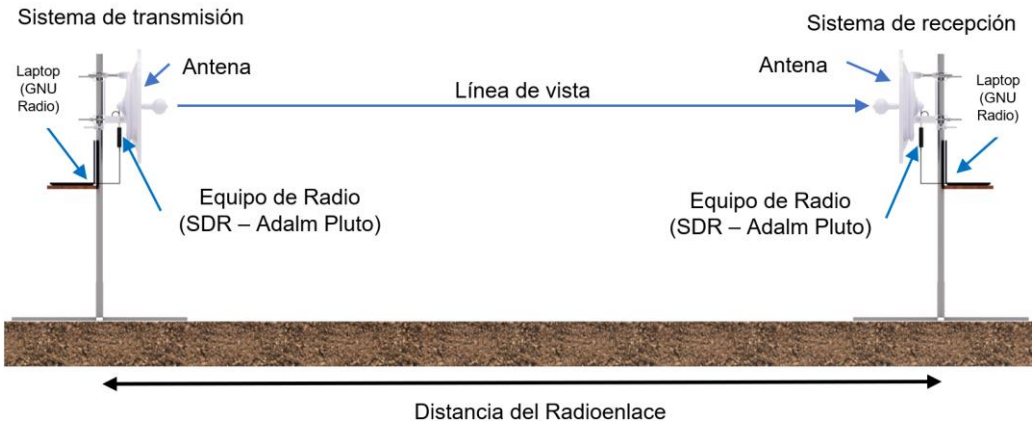


Figura 1.1 Radioenlace terrenal punto a punto

En la Figura 1.2 observamos el presupuesto del radioenlace del sistema planteado de la Figura 1.1, en el cual se parte de una potencia inicial (Ptx) del equipo de radio definido por software, cruzando por algunos factores que ayudan (segmentos en azul) y otros que se oponen (segmentos en rojo) al avance de la onda electromagnética, hasta llegar a una potencia final (Prx).

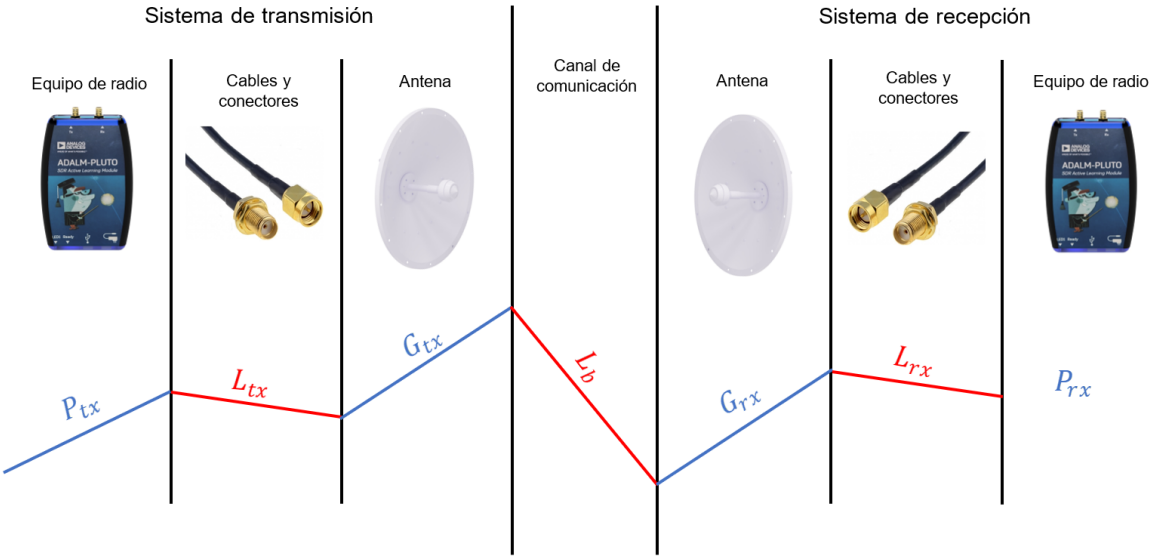


Figura 1.2 Presupuesto del radioenlace

Como se observa en la Figura 1.3 se tendrá en cuenta para la parte de la implementación del radioenlace las pérdidas producidas por apuntamiento de la antena (ángulo de elevación y ángulo de azimut), polarización de la antena, altura de las antenas en la primera zona de Fresnel, tipo de superficie (tierra, tierra húmeda y agua).

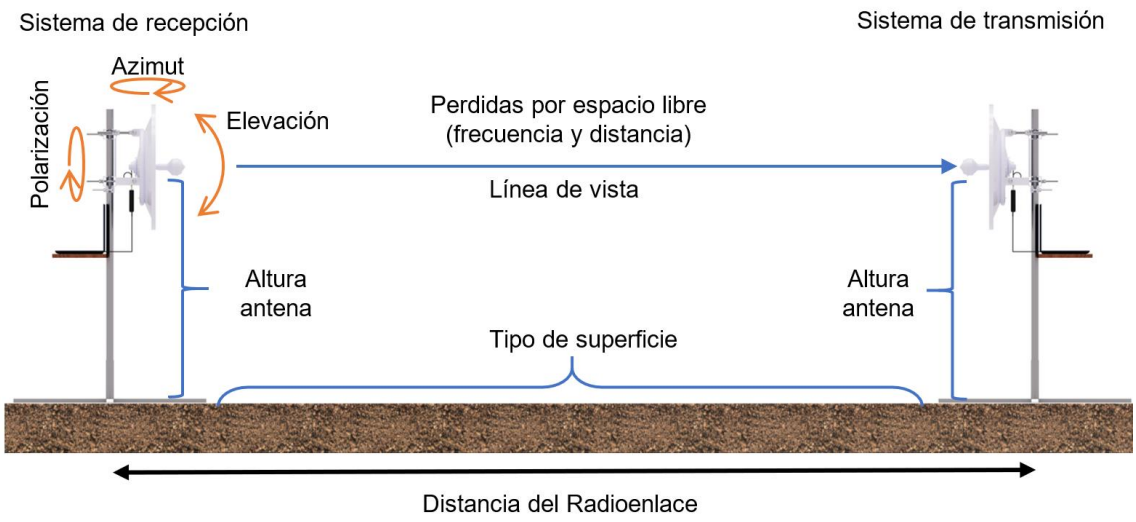


Figura 1.3 Variables del radioenlace

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

1.3.1.1 Ondas electromagnéticas

Una onda electromagnética es la forma de propagación de energía a través del espacio y como se observa en la Figura 1.4 se compone de un campo eléctrico (E) y un campo magnético (H), dichos campos son perpendiculares, es decir que existe una separación de 90° grados entre ellos y tienen una dirección de propagación que está dada por la dirección del [1]Vector de Pointyng [1]. Las oscilaciones de la onda electromagnética son periódicas, entonces se denomina a la frecuencia de la onda electromagnética como la rapidez con la que se repiten los ciclos y la distancia de un ciclo se conoce como longitud de onda [2].

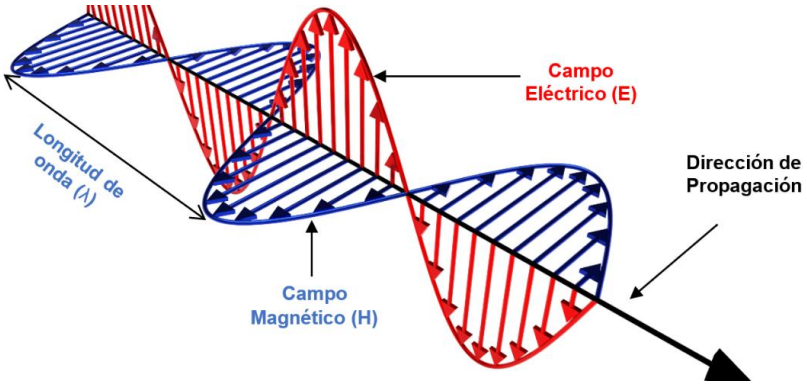


Figura 1.4 Onda Electromagnética

Las ondas electromagnéticas viajan a través del espacio libre y no requieren de un medio material para propagarse y al igual que la luz se propagan a la velocidad de 300 000 km/s, las ondas de radio se propagan desde frecuencias de 10 kHz hasta los 10 THz, y a lo largo del trayecto son propensas a sufrir atenuaciones debido a obstáculos como también a pérdidas básicas por espacio libre [2]. Todas las radiaciones del espectro electromagnético presentan las propiedades típicas de un movimiento ondulatorio, como es la, atenuación absorción, reflexión, difracción, refracción y la interferencia.

Atenuación

La ley del cuadrado inverso de la radiación describe en forma matemática la reducción de densidad de potencia a medida que las ondas se alejan de la fuente, en consecuencia, la cantidad de energía por unidad de área es menor. La reducción de densidad de potencia con la distancia equivale a una pérdida de potencia, y se suele llamar atenuación de la

[1] Vector de Poynting: se define como el producto vectorial del campo eléctrico y el campo magnético, el módulo representa la intensidad de la onda y cuya dirección resultante representa la dirección de propagación de la onda electromagnética.

onda. La atenuación de la onda se expresa en general en función del logaritmo común de la relación de densidades de potencia (pérdida en dB) [3].

Absorción

Este efecto se produce cuando las ondas electromagnéticas pasan a través de un medio transfiriendo energía a él, o el medio absorbe una parte de esa energía. Los metales y el agua se consideran absorbentes perfectos. En el agua las ondas electromagnéticas provocan que las moléculas se muevan y capturen energía de la onda, la mayor atenuación se produce a 22 GHz con vapor de agua [4].

Refracción

La refracción se produce cuando una onda pasa de un medio material a otro con diferente índice de refracción, en consecuencia, la onda experimenta un cambio de dirección y velocidad. Los efectos de la refracción se toman en cuenta en distancias de trayecto de decenas de kilómetros o más [5].

Según la ley de Snell:

- La velocidad no cambia en la onda reflejada, pues no hay cambio de medio.
- El ángulo de incidencia respecto a la normal es el mismo que el ángulo de reflexión.
- Una parte de la señal, llamada onda transmitida, penetra en el material por refracción, esto genera una pérdida de energía, y dependerá del tipo de material y será absorbida por él.

Interferencia

Se refiere a una colisión con otra onda de la misma frecuencia, pero de diferente fuente, el resultado de las dos señales se puede anular o amplificar dependiendo de la fase de dichas señales. Se puede tener los siguientes tipos de interferencia:

- Interferencia co-canal: Es causada por la presencia de señales electromagnéticas que utilizan el mismo ancho de banda del canal en el que se está operando, su nivel depende de las características de rechazo co-canal del receptor y las características de emisión del transmisor [6].

- Interferencia de canal adyacente: Esta interferencia se debe a la presencia de señales electromagnéticas que opera en el canal adyacente, depende de las características de filtrado del receptor y de la separación entre canales [6].

Reflexión

Es un rebote o cambio de dirección de la onda cuando choca con un material que, en función de su densidad, reflejará una parte de la señal y absorberá otra. Se refleja en metales, superficies de agua y también en suelos lisos. Dependiendo de la superficie donde incide la onda, podemos hablar de [7] :

- Reflexión Difusa: las superficies ásperas o irregulares dispersan las ondas en muchas direcciones, absorbiendo más energía e incluso destruyendo completamente la señal.
- Reflexión Especular: las superficies lisas producen una reflexión muy buena, absorbiendo poca energía y reflejando casi por entero la señal.
- Reflexión Semidifusa: las superficies mixtas tendrán un comportamiento entre difuso y especular.

Criterio de rugosidad de Rayleigh

Establece que una superficie semi-áspera refleja como si fuera una superficie lisa siempre que el coseno del ángulo de incidencia sea mayor que λ/8d, donde d es la profundidad de la irregularidad de la superficie, y λ es la longitud de la onda incidente. La reflexión en una superficie semi-áspera se ilustra en la Figura 1.5. La Ecuación 1.1 representa el criterio de Rayleigh [8].

$$\cos(\theta) > \frac{\lambda}{8d} \tag{1.1}$$

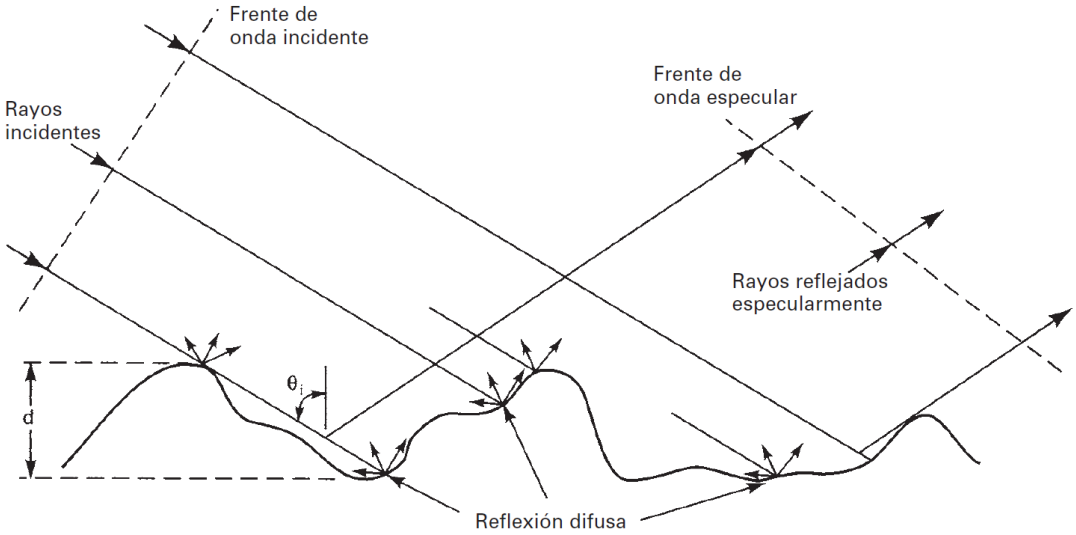


Figura 1.5 Reflexión en una superficie semi-áspera

Difracción

La difracción es el mecanismo por el cual las ondas de cualquier tipo se propagan alrededor de los obstáculos. En los trayectos donde existen obstáculos, la difracción es el mecanismo de propagación más importante. Se puede reducir considerablemente este efecto despejando la primera zona de Fresnel [9].

Principio de Huygens

En 1678 Huygens propuso un modelo donde cada punto de un frente de ondas puede ser considerado como una fuente de ondas que se expande desde ese punto como se observa en la Figura 1.6 a), desde la cual se irradian y se alejan otras ondas secundarias, la anulación de ondas secundarias se hace en todas direcciones, excepto en la dirección de avance de los rayos. En la Figura 1.6 b) ocurre un efecto de difracción en la abertura del obstáculo. La difracción observada en la Figura 1.6 c) ocurre en la orilla del obstáculo, en este caso la anulación de ondas secundarias es parcial, este fenómeno permite que unas ondas secundarias avancen en torno a las aristas del obstáculo [9].

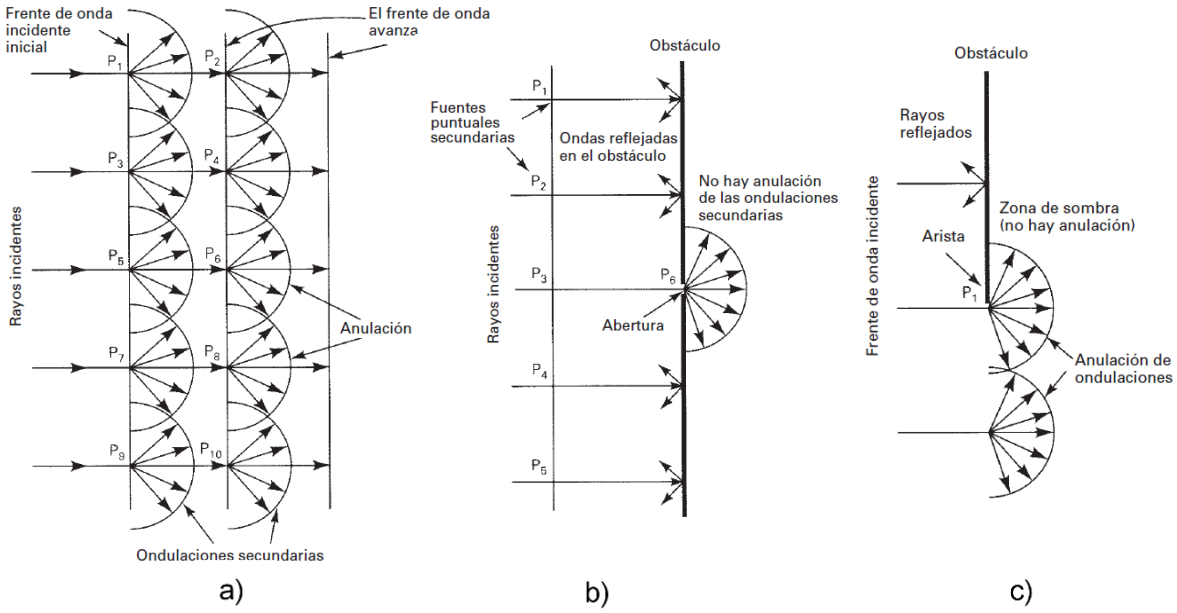


Figura 1.6 Difracción de las ondas electromagnéticas: a) principio de Huygens para un frente de onda plano; b) frente de una onda finita a través de una abertura; c) frente de onda rodeando una arista

Espectro radioeléctrico

La Tabla 1.1 muestra la distribución del espectro radioeléctrico según el Plan Nacional de Frecuencias del Ecuador. Los radioenlaces suelen operar en las bandas VHF, UHF y SHF. En el Plan Nacional de Frecuencias se atribuyen diferentes servicios de radiocomunicaciones para las bandas VHF, UHF Y SHF, tales como: enlaces radioeléctricos fijos, fijos por satélite, televisión digital terrestre, televisión satelital, servicios móviles etc. [10]

Tabla 1.1 División del espectro radioeléctrico

Número de banda	Símbolos (en inglés)	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)	Subdivisión métrica
4	VLF	3 a 30 kHz	Ondas miriamétricas
5	LF	30 a 300 kHz	Ondas kilométricas
6	MF	300 a 3000 kHz	Ondas hectométricas
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas
9	UHF	300 a 3000 MHz	Ondas decimétricas
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas
11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas
12	THF	300 a 3000 GHz	Ondas decimilimétricas

La Tabla 1.2 muestra las bandas de frecuencias atribuidos por el Plan Nacional de frecuencias para el servicio fijo.

Tabla 1.2 División del espectro radioeléctrico

Banda de frecuencias (MHz) para servicio fijo
216 a 328,6
335,4 a 399,9
401 a 406
406,1 a 470
698 a 960
1427 a 1535
1660,5 a 1690
1700 a 2690
3300 a 4200
4400 a 5000
5850 a 8500
9800 a 10000
10015 a 10068

1.3.1.2 Formas de propagación terrestre de las ondas electromagnéticas

En todo radioenlace terrestre las ondas electromagnéticas pueden llegar al receptor por distintos caminos como: onda terrestre (onda de superficie), onda espacial (onda transmitida por línea de vista directa y onda reflejada en el suelo), onda celeste (onda influencia por la atmósfera terrestre) [11], tal y como se muestra en la Figura 1.7.

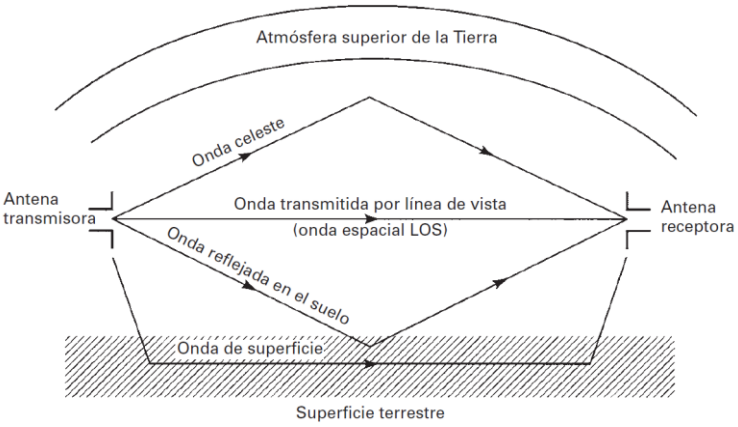


Figura 1.7 Formas de propagación de las ondas electromagnéticas

Propagación de ondas terrestres

También llamadas ondas superficiales y son ondas electromagnéticas que viajan por el contorno de la superficie terrestre, solo las ondas electromagnéticas con frecuencias de las bandas VLF, LF y MF pueden viajar por el contorno de la superficie terrestre, y para frecuencias superiores a 3MHz la interferencia causada por la onda de superficie es nula, entre mayor sea la frecuencia de operación mayor se verá atenuada la onda de superficie [11].

Propagación por ondas celestes

Son ondas electromagnéticas que se irradian en dirección al cielo, estas ondas son reflejadas o refractadas hacia la superficie terrestre por la ionósfera, también a la propagación de las ondas celestes se las denomina como una propagación ionosférica. La ionósfera es la región del espacio que se encuentra entre 50 y 400km sobre la superficie terrestre. Este tipo de propagación se ve más influencia por la distancia del radioenlace y el uso de frecuencias en las bandas LF, MF Y HF [11].

Propagación de ondas espaciales

Tal y como se muestra en la Figura 1.8 las ondas espaciales las conforman tanto las ondas electromagnéticas por línea de vista y las ondas reflejadas en el suelo. Las ondas electromagnéticas por línea de vista viajan en línea recta entre el transmisor y el receptor sin encontrarse con algún obstáculo en el trayecto, en cambio las ondas reflejadas por el

suelo corresponden a ondas electromagnéticas que fueron reflejadas por algún tipo de superficie [2].

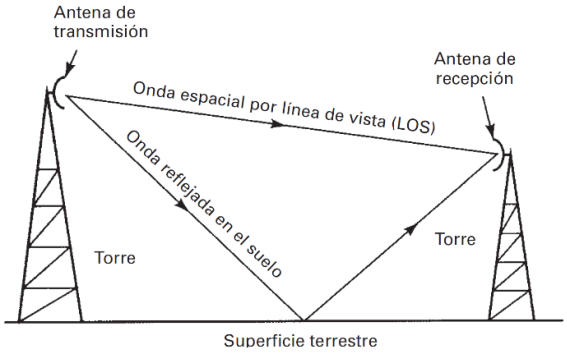


Figura 1.8 Propagación de ondas espaciales

1.3.2 SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE COMUNICACIÓN

En la Figura 1.9 se muestra un diagrama de bloques de un sistema electrónico de comunicación, y se compone por un transmisor, un medio de transmisión y un receptor. Un transmisor está conformado por uno o varios dispositivos electrónicos que convierten la información de una fuente en una señal eléctrica que será usada para transmitir información a través de un medio de transmisión. El medio de transmisión transporta las señales desde el transmisor hasta el receptor. Un receptor es un conjunto de dispositivos electrónicos que recibe del medio de transmisión las señales transmitidas y las reconvierte a su formato original [2].

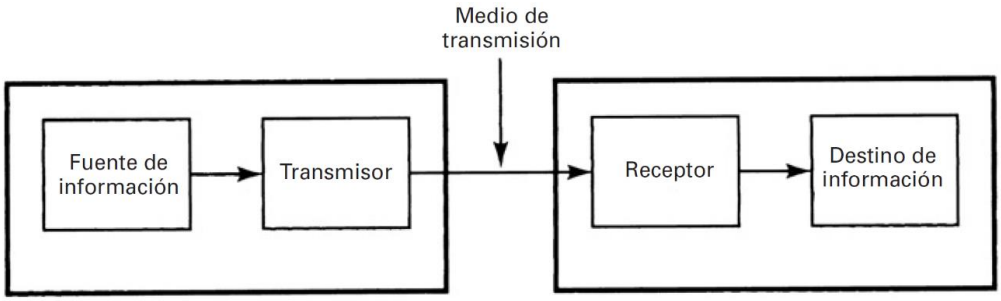


Figura 1.9 Sistema de comunicación

1.3.2.1 Radioenlace

Un radio enlace es un sistema de comunicación inalámbrica que interconecta dos nodos de telecomunicaciones y utilizan ondas electromagnéticas para transmitir información. Hay dos clases básicas de sistemas de comunicación inalámbrica y son: sistema punto a punto y sistema punto multipunto. Un radioenlace punto a punto es la configuración más común para sistemas de radiocomunicación fijas, son sistemas que usan antenas muy directivas

y permite radioenlaces de gran distancia y a la vez reduce los efectos de la propagación por trayectos múltiples. Un sistema punto multipunto tiene un nodo central que maneja la comunicación con las estaciones remotas, son conocidas como redes de difusión y son usadas para radiodifusión comercial (televisión terrestre, radio difusión sonora) [12].

1.3.2.1.1 Estructura de un radioenlace punto a punto

Como se muestra en la Figura 1.10, un radioenlace punto a punto consta de un sistema de transmisión y un sistema de recepción, en el sistema de transmisión tenemos un equipo de radiotransmisión, una antena transmisora y una torre de telecomunicaciones para conexión de equipos y montaje de la antena, en el sistema de recepción se tiene una antena receptora, un equipo receptor y de igual manera se tiene una torre de telecomunicaciones para conexión de equipos e instalación de la antena.

Equipo de radiotransmisión

Un radiotransmisor es un dispositivo electrónico que en su forma más básica está compuesto por un oscilador, un preamplificador y amplificadores de señal, que mediante una antena irradia a través del espacio ondas electromagnéticas que contienen información [13].

Torre de telecomunicaciones

Es una estructura diseñada para soportar antenas y permitir el correcto funcionamiento de un sistema de comunicación.

Equipo receptor de radio

Un radio receptor es un dispositivo electrónico que en su forma más básica está compuesto por un oscilador local y un amplificador de bajo ruido (LNA), que recibe ondas electromagnéticas captadas por la antena receptora y recupera la información enviada por un radiotransmisor.

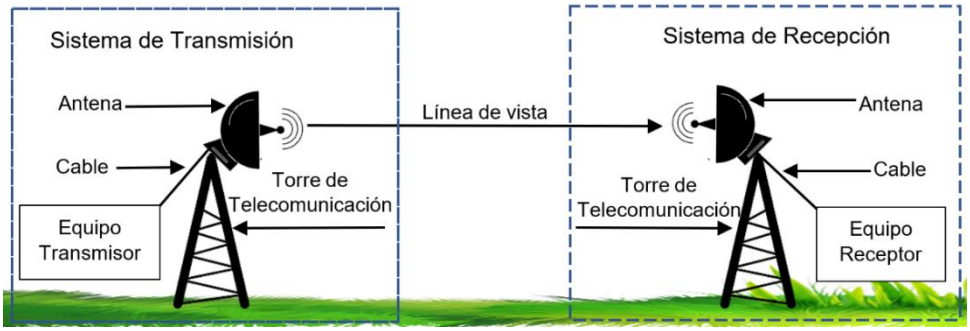


Figura 1.10 Estructura de un radioenlace punto a punto

Antena parabólica

Una antena parabólica se caracteriza por tener un directividad y ganancia muy alta, como se muestra en la Figura 1.11, la antena está formada por un plato parabólico y un foco. El plato parabólico concentra la energía hacia el foco lo que permite tener un haz de energía más estrecho (directivo), entre más grande sea el reflector mayor será la ganancia de la antena. Las antenas parabólicas son muy usadas en radioenlaces de radio terrestres y satelitales [2].

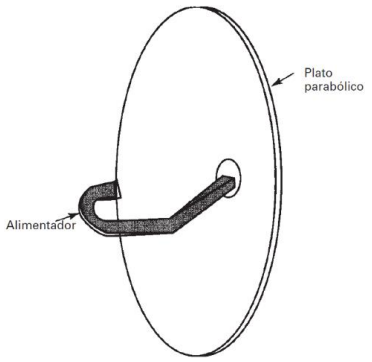


Figura 1.11 Antena parabólica con alimentador (foco)

La polarización de una antena puede ser elíptica, circular o lineal. Las antenas parabólicas suelen tener una polarización lineal, es decir una polarización vertical y/o horizontal. En la Figura 1.12 (a) se muestra la onda electromagnética con una polarización vertical, en donde la componente eléctrica de la onda es perpendicular a la superficie terrestre. En la Figura 1.12 (b) se muestra una onda electromagnética con una polarización horizontal, en donde la componente eléctrica de la señal es horizontal a la superficie terrestre.

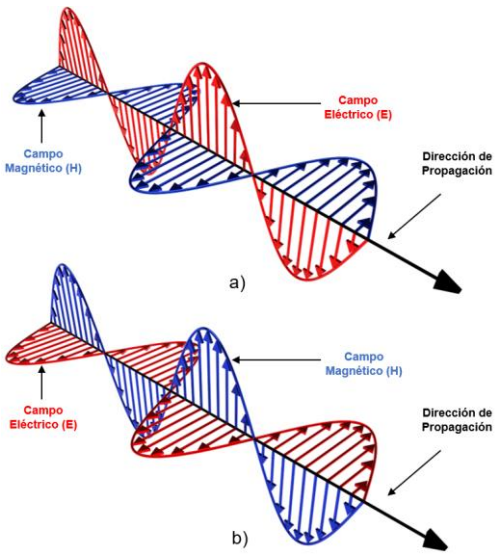


Figura 1.12 a) Polarización vertical y b) Polarización horizontal

Orientación de la antena

Para una correcta comunicación entre las antenas de un radioenlace punto a punto se toma cuenta el apuntamiento de una antena parabólica, como se muestra en la Figura 1.13 las coordenadas que se deben tomar en cuenta son el ángulo de elevación y azimut [2].

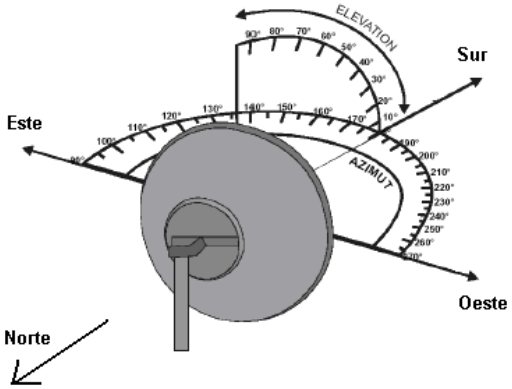


Figura 1.13 Orientación antena

- En ángulo de elevación corresponde al ángulo formado entre la antena parabólica con respecto al suelo.
- Acimut es el ángulo que forma la proyección del eje de la parábola sobre el suelo y se mide con respecto al norte geográfico.

Patrón de radiación

El patrón de radiación de una antena transmisora es una representación gráfica de cómo está distribuida la energía electromagnética en el espacio. El patrón de radiación para una antena receptora representa la variación de sensibilidad de una dirección a otra. En la Figura 1.14 se muestra un patrón de radiación en forma polar de una antena parabólica, se observa que el patrón de radiación está formado por varios lóbulos.

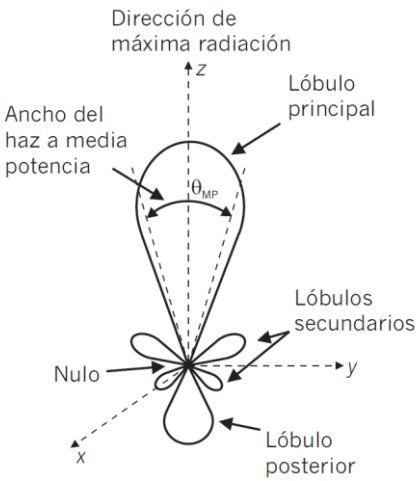


Figura 1.14 Partes de un patrón de radiación

La mayor cantidad de energía se concentra en el lóbulo principal y coincide con la dirección de máxima radiación, también se observa un lóbulo posterior, lóbulos secundarios, nulos que son puntos del diagrama donde casi no se irradia energía y por último el ángulo del haz a media potencia que representa los puntos del lóbulo principal en los cuales la potencia es la mitad (-3 dB) [14]. La ganancia de una antena representa la ganancia de la antena en cuestión con respecto a la ganancia de una antena isotrópica (por eso lleva el subíndice i) [15] .

VSWR

El parámetro de relación de onda estacionaria de voltaje de la antena nos indica la potencia efectiva enviada por el equipo a la antena y cuanta potencia es devuelta, la Ecuación 1.2 describe la cantidad de potencia reflejada en función del VSWR.

Los valores de la Tabla 1.3 se obtuvieron de la Ecuación 1.2 y muestra varios valores típicos de VSWR para una antena, por ejemplo, para un VSWR igual a 1.8:1 nos indica que el 91.8% de la potencia total llega a la antena y un 8.2% de potencia restante es reflejada. Usualmente se acepta que es seguro para un equipo de radio trabajar con un VSWR de hasta 3.0:1 [16].

$$\%Potencia\ reflejada = 100 * \left(\frac{VSWR-1}{VSWR+1}\right)^2 \tag{1.2}$$

Tabla 1.3 Valores VSWR

VSWR	% de pérdida de potencia	% de potencia que llega a la antena
1.0:1	0,0%	100,0%
1.1:1	0,2%	99,8%
1.2:1	0,8%	99,2%
1.3:1	1,7%	98,3%
1.4:1	2,8%	97,2%
1.5:1	4,0%	96,0%
1.6:1	5,3%	94,7%
1.7:1	6,7%	93,3%
1.8:1	8,2%	91,8%
2.0:1	11,1%	88,9%
2.2:1	14,1%	85,9%
2.4:1	17,0%	83,0%
2.6:1	19,8%	80,2%
3.0:1	25,0%	75,0%
4.0:1	36,0%	64,0%
5.0:1	44,4%	55,6%

Relación frente/atrás

La diferencia de potencia en decibelios entre el lóbulo de radiación principal y el secundario se conoce como relación frente/atrás y nos da una idea de cuanta energía es radiada en la dirección de máxima radiación y cuanta energía es radiada en el lóbulo posterior, un valor grande de la relación frente/atrás nos indica la presencia de un lóbulo posterior pequeño, este parámetro es útil cuando la interferencia hacia atrás es crítica en la elección de la antena que vamos a utilizar [5].

Factor XPD

El rechazo de polarización cruzada es una característica eléctrica de la antena. Idealmente si una antena tiene polarización vertical no puede captar señales con polarización horizontal. En la realidad la construcción de las antenas no es perfecta, por lo que una antena si puede recibir señales de la polarización contraria (cruzada) pero lo hace con niveles de 30 a 40 dB de atenuación [17].

1.3.2.1 Presupuesto del enlace

El presupuesto del enlace considera todas las ganancias y pérdidas que van desde el sistema de transmisión, pasando por el canal de comunicación y hasta el sistema de recepción, como se muestra en la Figura 1.13.

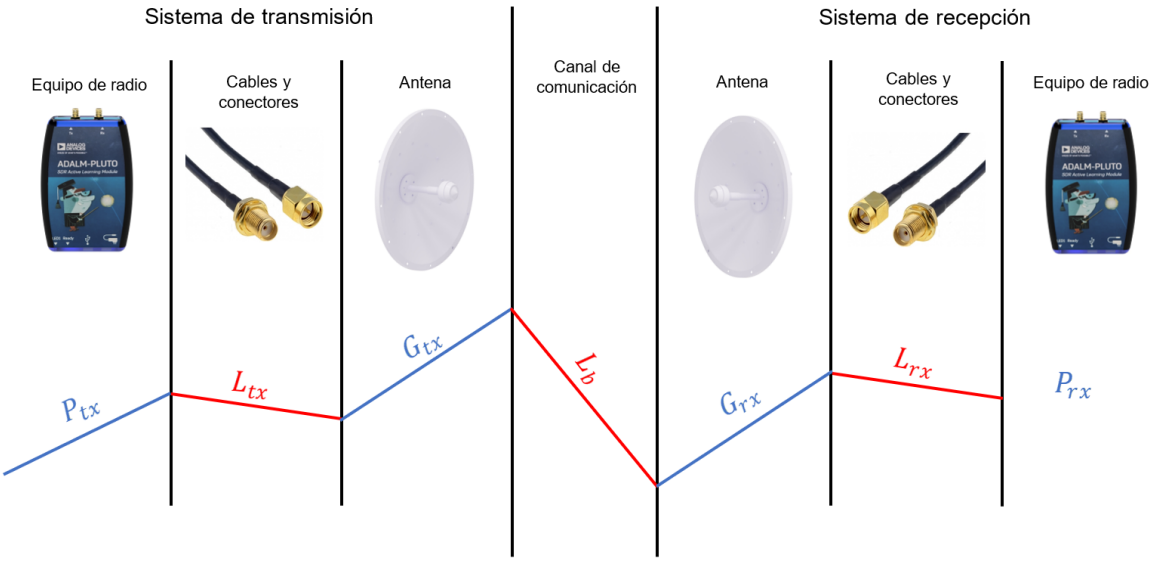


Figura 1.15 Variables del presupuesto del radioenlace

La Ecuación 1.3 estima la potencia de recepción mediante la sumatoria de las ganancias y pérdidas de la Figura 1.13.

$$Prx = Ptx + Gtx(dBi) - Ltx - L_b - Lrx + Grx(dBi) \tag{1.3}$$

Donde:

Prx:	Potencia esperada en la recepción.
Ptx:	Potencia de transmisión.
Gtx:	Ganancia de la antena transmisora.
Ltx:	Pérdida por conectores y cables en transmisión.
L_b:	Pérdidas básicas de propagación (espacio libre e influencia del terreno).
Lrx:	Pérdida por conectores y cables en la recepción.
Grx:	Ganancia de la antena receptora.

Las pérdidas por conectores serán de por lo menos 0,25 dB [18] por cada uno y las pérdidas debido a obstáculos en la línea de vista del radioenlace se garantizan despejando la zona de Fresnel.

Pérdidas debido a obstáculos (Zona de Fresnel)

En sistemas de radiocomunicación que operen a frecuencias altas es necesario contar con una línea de visión directa (LOS -Line Of Sight,) con el fin de evitar las pérdidas debido a obstrucción del radioenlace. A pesar de tener una línea de visión directa en el radioenlace (LOS) se puede llegar a tener pérdidas y para evitar estas pérdidas que se producen debido a obstrucción del enlace radioeléctrico se utiliza el criterio de las zonas de Fresnel [4].

Como se observa en la Figura 1.16 las zonas de Fresnel adoptan un elipsoide de revolución, la primera zona de Fresnel abarca hasta que la fase llegue a 180º. La segunda zona abarca hasta un desfase de 360º, y es un segundo elipsoide que contiene al primero.

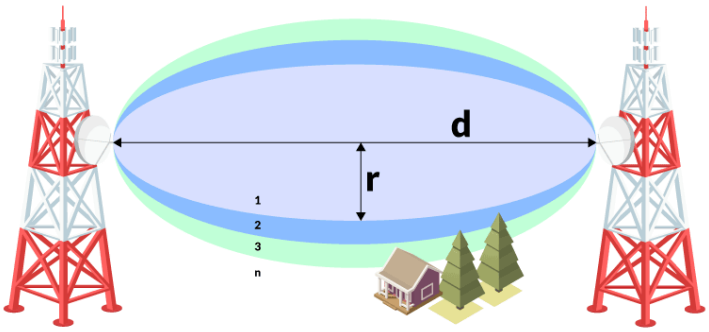


Figura 1.16 Zona de Fresnel

La primera zona de Fresnel es la que más afecta a la intensidad de la señal, la segunda zona afecta menos que la primera, y la tercera zona afecta menos que la segunda. Existe un número infinito de zonas de Fresnel (n) pero habitualmente se realizan los cálculos hasta la 3ª zona, porque a partir de ella, el efecto de cancelación se hace despreciable [19].

La teoría de la difracción indica que el trayecto directo entre el transmisor y el receptor debe estar libre de obstáculos, a partir de una altura por encima del suelo igual, como mínimo, al 60% del radio de la primera zona de Fresnel para que se cumplan las condiciones de propagación en el espacio libre [20].

En la Figura 1.17 se observa un radioenlace donde existe un obstáculo que compromete la zona de Fresnel.

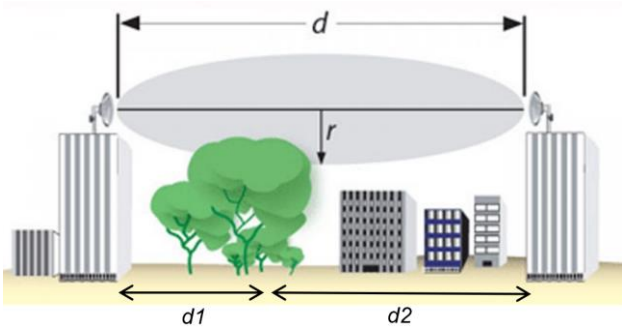


Figura 1.17 Obstrucción de la zona de Fresnel

Ecuación 1.4 describe el n-ésimo radio de la zona de Fresnel en función de la distancia entre el transmisor y el obstáculo (d1) y la distancia entre receptor y el obstáculo (d2).

$$r = 17.32\sqrt{\frac{n\, d_1\, d_2}{d\, f}} \tag{1.4}$$

Donde:

- r: Radio n-ésima zona de Fresnel (m)
- d: Distancia entre transmisor y receptor (km).
- f: Frecuencia de operación (GHz).
- d_1: Distancia entre el transmisor y el obstáculo (km).
- d_2: Distancia entre el receptor y el obstáculo (km).
- n: Número de la zona de Fresnel (n=1,2,3…)

La Ecuación 1.5 es una fórmula simplificada del radio máximo de la primera zona de Fresnel para la mitad del trayecto sin obstáculos.

$$r = 17.32\sqrt{\frac{d}{4f}} \tag{1.5}$$

Donde:

- r: radio de la primera zona de Fresnel (m)
- d: distancia entre transmisor y receptor (km).
- f: frecuencia de operación (GHz).

La Figura 1.18 muestra los resultados de la primera zona de Fresnel aplicando la Ecuación 1.5 con frecuencias de trabajo de 2,3 GHz, 2,4 GHz y 2,7 GHz. La Figura 1.18 se generó en MATLAB y se empleó el siguiente código:

```
%Zona de Fresnel
clear all
close all

%Datos
f=[2.3 2.4 2.7];     %Frecuencias de operación en GHz
d=0:0.005:2;         %Distancia del radioenlace en km
c=17.32;             %Constante

for i=1:3
%Zona de Fresnel
r=c*sqrt(d./(4*f(i)));  %Fórmula 1.4 Zona de Fresnel
plot(d,r)
hold on
end

grid on
title('Distancia del radioenlace vs Radio de la Primera Zona Fresnel');
xlabel('Distancia Radioenlace (km)');
ylabel('Radio de la primera Zona Fresnel (m)');
legend('2.3GHz','2.4GHz','2.7GHz')
```

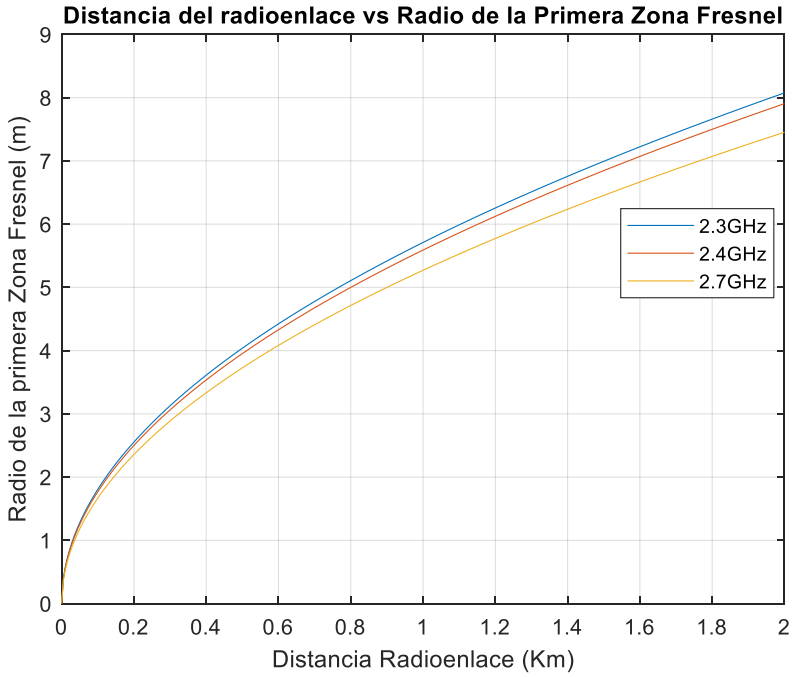


Figura 1.18 Radio máximo de la primera Zona de Fresnel a diferentes frecuencias de operación

En la Figura 1.18 observamos que el radio de la primera zona de Fresnel se incrementa a medida que la distancia del radioenlace crece, y por el contrario a una frecuencia mayor los radios de la zona de Fresnel son más estrechos.

Tabla 1.4 Comparación de radios máximos de la primera zona de Fresnel a diferentes frecuencias y distancias

	Zona de Fresnel					
	2,3 GHz		2,4 GHz		2,7 GHz	
Distancia del Radio enlace [m]	Radio de la primera zona de Fresnel [m]	60% del Radio de la primera zona de Fresnel [m]	Radio de la primera zona de Fresnel [m]	60% del Radio de la primera zona de Fresnel [m]	Radio de la primera zona de Fresnel [m]	60% del Radio de la primera zona de Fresnel [m]
50	1,28	0,77	1,25	0,75	1,18	0,71
100	1,81	1,08	1,77	1,06	1,67	1,00
200	2,55	1,53	2,50	1,50	2,36	1,41
500	4,04	2,42	3,95	2,37	3,73	2,24
1000	5,71	3,43	5,59	3,35	5,27	3,16
2000	8,08	4,85	7,91	4,74	7,45	4,47

En la Tabla 1.4 se toman algunos datos de la Figura 1.18 y se observa que los radios de las zonas de Fresnel crecen rápidamente a medida que aumenta la distancia del radioenlace, por el contrario, se observa que los radios disminuyen lentamente a medida que la frecuencia aumenta.

Pérdidas en espacio libre

Las pérdidas por espacio libre de una onda electromagnética se producen por el incremento del radio de la esfera a medida que se propaga por el espacio, es decir que al incrementarse el radio la energía cubre un área mayor a medida que avanza en el espacio (ver Figura 1.19). La propagación en condiciones de espacio libre es siempre por onda directa, se considera una trayectoria sin obstáculos y no se considera la absorción por los gases atmosféricos o el vapor de agua [2].

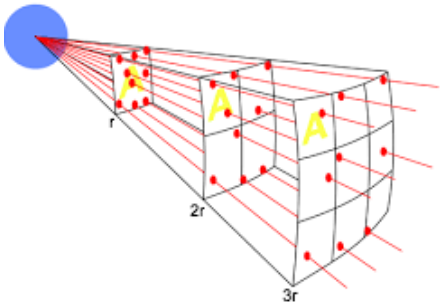


Figura 1.19 Dispersión de la energía en un área mayor a medida que la onda electromagnética avanza en el espacio

Según la recomendación ITU-R P.525-4 en un enlace punto a punto, es preferible calcular la atenuación de espacio libre considerando antenas isotrópicas, esta atenuación es también conocida como pérdida de transmisión básica de espacio libre [21], y se emplea la Ecuación 1.6.

$$L_{bf} = 20\ \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)\ \ (dB) \tag{1.6}$$

Donde:

L_{bf}: Pérdidas básicas de espacio libre (dB).

d: Longitud del trayecto (km).

λ: Longitud de onda que debe estar en la misma unidad que d.

La Ecuación 1.7 describe las pérdidas de espacio libre en dB, y en función de la frecuencia de operación y longitud del trayecto.

$$L_{bf} = 32{,}4 + 20\log(f_{Mhz}) + 20\log(d_{Km})\ \ (dB) \tag{1.7}$$

Donde:

L_{bf}: Pérdida en el espacio libre (dB).

f: Frecuencia (MHz).

d: Longitud del trayecto (km).

La Figura 1.20 muestra las curvas de pérdidas producidas por espacio libre considerando una distancia de 10 km y frecuencias de operación de 2,3 GHz, 2,4 GHz y 2,7 GHz. La Figura 1.20 se generó en MATLAB y se empleó el siguiente código.

```
%Atenuación por espacio libre
clear
close all

f=[2300 2400 2700];  %Frecuencias de operación
d=0:0.001:10;        %Distancia de propagación de la onda radioeléctrica
                     (0-10 km) con pasos de 1m

for i=1:3
      %Fórmula de Pérdidas por espacio libre
      PL=32.4+20*log10(f(i))+20*log10(d);
      plot(d,PL)
      hold on
end
grid on
xlabel("Distancia (km)")
ylabel("Potencia (dB)")
title("Pérdidas por Espacio Libre vs Distancia")
legend('f=2,3Ghz','f=2,4Ghz','f=2,7Ghz')
```

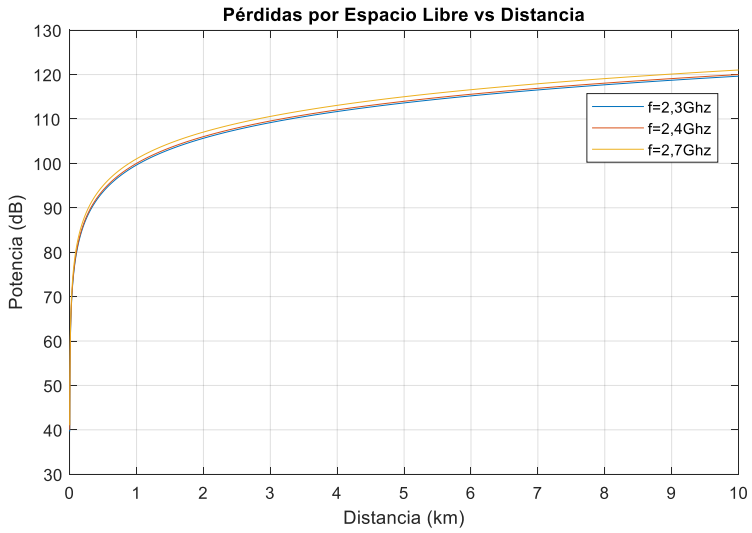


Figura 1.20 Pérdidas por espacio libre vs Distancia hasta 10 km

En la figura 1.20 se observa que las pérdidas por espacio libre se incrementan levemente a medida que la frecuencia sube, también observamos que las pérdidas por espacio libre tienen un gran impacto en el primer kilómetro del radioenlace, en dicho kilómetro observamos que hay una atenuación por pérdidas de espacio libre de aproximadamente 100 dB, pasado ese kilómetro observamos que para alcanzar los 10 kilómetros hay una atenuación por pérdidas de espacio libre adicional de 20 dB.

La Figura 1.21 tiene los mismos datos que la figura 1.20 solamente que la escala de distancia se ha reducido hasta un kilómetro.

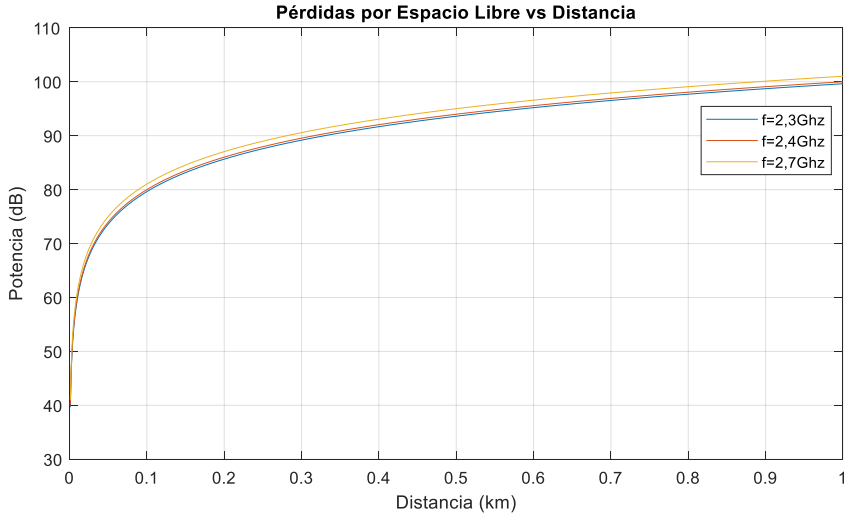


Figura 1.21 Pérdidas por espacio libre vs Distancia hasta 1 km

Igual que en el caso anterior, en la Figura 1.21 se observa que la mayor atenuación está en los primeros 100 m, y tiene un valor alrededor de los 80 dB, la atenuación se incrementa

levemente al incrementarse la frecuencia de operación de la antena, por ejemplo para una distancia de 100 m y una frecuencia de 2,3 GHz se obtiene una pérdida de 79,63 dB, para una frecuencia de 2,4 GHz se tiene una pérdida de 80 dB, y para una frecuencia de 2,7GHz se tiene una pérdida de 81,03 dB. Hablamos de una diferencia de potencia de 1,4 dB entre la frecuencia de operación máxima y mínima. Observamos también que se incrementa las pérdidas 6.0206 dB cuando la distancia se duplica.

Modelo de tierra plana

El modelo de tierra plana es aplicable para distancias cortas, en la que se desprecia la curvatura de la tierra y se considera un terreno liso. La estimación de las pérdidas por reflexión debido al terreno se puede analizar con el modelo de tierra plana y dichas pérdidas se considerarán en la Ecuación 1.3 del presupuesto del enlace como una atenuación por exceso (L_{ex}).

En la Figura 1.22 se observa las ondas electromagnéticas que se considerarán en la influencia del terreno, y son: un rayo directo y un rayo reflejado por el terreno.

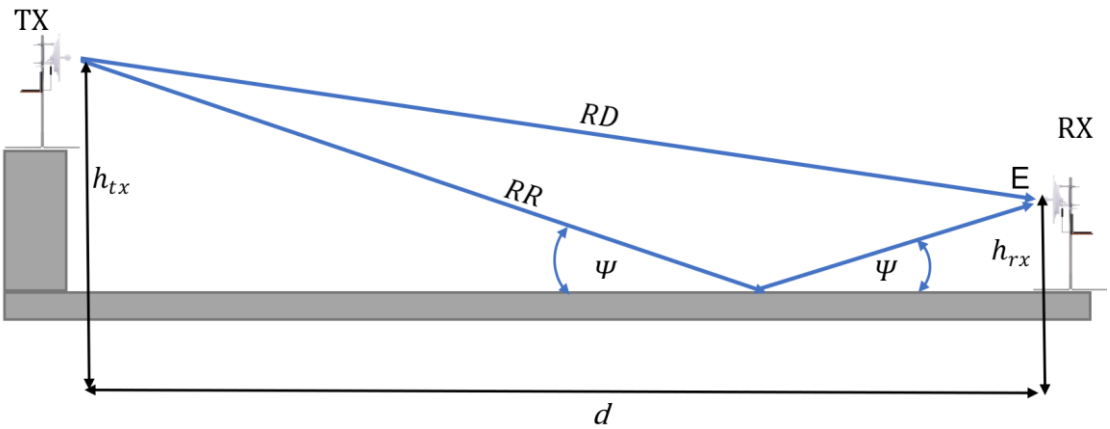


Figura 1.22 Parámetros del modelo de tierra plana

La Figura 1.22 muestra los siguientes parámetros:

- Ψ: Ángulo de reflexión
- h_{tx}: Altura antena de transmisión
- h_{rx}: Altura antena de recepción
- d: Distancia del radioenlace
- RD: Rayo Directo
- RR: Rayo Reflejado

La expresión del campo recibido de la Figura 1.22 viene dada por la Ecuación 1.8 [22]:

$$e = e_o\left(\underbrace{1}_{RD} + \underbrace{R * e^{-jB}}_{RR}\right) \tag{1.8}$$

Donde:

- e: Intensidad de campo en recepción en condiciones reales.
- $e_{o:}$ Intensidad de campo en recepción en condiciones de espacio libre.
- R: Magnitud del coeficiente de Reflexión
- B: Ángulo de desfase de la señal producido por el terreno.

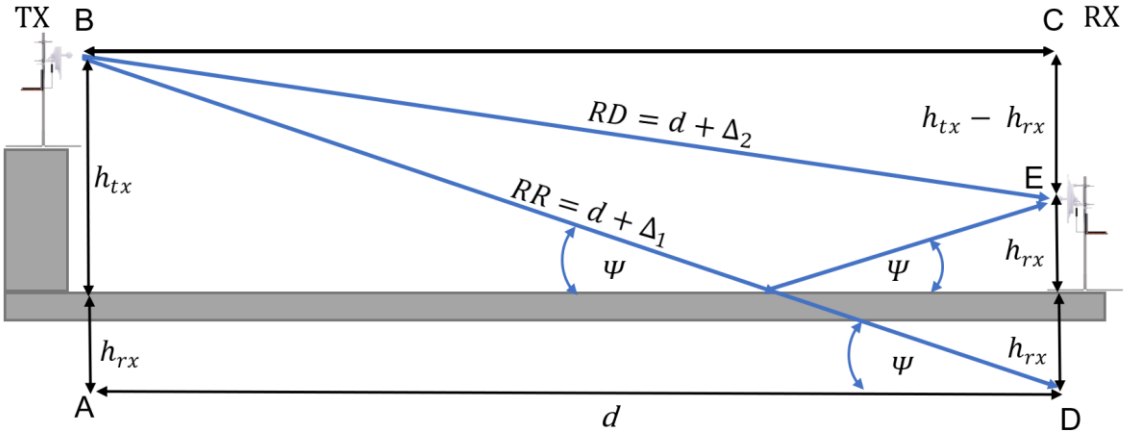


Figura 1.23 Expresiones geométricas del modelo de tierra plana

De la Figura 1.23 mediante consideraciones geométricas, se obtiene:

La Ecuación 1.9 que describe el ángulo de reflexión (triángulo ABD)

$$\tan \Psi = \frac{h_{tx} + h_{rx}}{d}$$

$$\Psi = arctan\left(\frac{h_{tx}+h_{rx}}{d}\right) \tag{1.9}$$

La expresión Δ_1 del triángulo ABD (por Pitágoras):

$$(d + \Delta_1)^2 = (h_{tx} + h_{rx})^2 + d^2$$

${\Delta_1}^2 \approx 0$, entonces Δ_1 se aproxima a:

$$\Delta_1 \cong \frac{(h_{tx} + h_{rx})^2}{2d}$$

La expresión Δ_2 del triángulo BCE (por Pitágoras):

$$(d + \Delta_2)^2 = (h_{tx} - h_{rx})^2 + d^2$$

${\Delta_2}^2 \approx 0$, entonces Δ_2 se aproxima a:

$$\Delta_2 \cong \frac{(h_{tx} - h_{rx})^2}{2d}$$

La Ecuación 1.10 describe la diferencia de trayecto entre el Rayo Reflejado y el Rayo Directo.

$$\Delta l = \Delta_1 - \Delta_2 = \frac{(h_{tx} + h_{rx})^2}{2d} - \frac{(h_{tx} - h_{rx})^2}{2d} = \frac{2 * h_{tx} * h_{rx}}{d}$$

$$\Delta l = \frac{2 * h_{tx} * h_{rx}}{d} \tag{1.10}$$

La Ecuación 1.11 describe la diferencia de fases entre el Rayo Reflejado y el Rayo Directo.

$$\Delta = \frac{2\pi * \Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} * \frac{2 * h_{tx} * h_{rx}}{d} = \frac{4\pi * h_{tx} * h_{rx}}{\lambda d} \tag{1.11}$$

Influencia del terreno

La reflexión de las ondas electromagnéticas se ven influidas por las propiedades eléctricas del terreno como es la permitividad dieléctrica y conductividad (Siemens/m).

La permitividad compleja está formada de una permitividad relativa (también conocida como constante dieléctrica) y de la conductividad del terreno, la permitividad compleja depende más del contenido de agua de la superficie.

- **La permitividad relativa** es un valor adimensional cuya relación está formada por la permitividad del medio dividido para la permitividad en el vacío, afecta a la propagación de la señal ya que incide directamente en la capacidad de absorción del terreno. La penetración de la señal es mayor y la reflexión de esta es menor para un bajo contenido de humedad [23].

- **La conductividad eléctrica** del terreno es la capacidad de un material para dejar pasar la corriente eléctrica a través de él, la penetración de la onda electromagnética es mayor para grandes longitudes de onda (frecuencias bajas) [24].

En el ANEXO A se muestran dos gráficas que corresponden a las curvas de las constantes eléctricas del terreno (Permitividad relativa y Conductividad) en función de la frecuencia de operación, dichas gráficas fueron tomadas de la recomendación P.527-3 de la ITU-R [25].

La Ecuación 1.12 representa la permitividad compleja del terreno en función de la permitividad relativa y la conductividad [26].

$$\varepsilon_o = \varepsilon_r - j60\sigma\lambda \tag{1.12}$$

Donde:

ε_o: Permitividad compleja.

ε_r: Permitividad relativa.

σ: Conductividad.

λ: Longitud de onda de la señal.

Las Ecuaciones (1.13) y (1.14) representan el coeficiente de reflexión para polarización vertical y horizontal respectivamente, se encuentran en la referencia [20] de la ITU.

$$R_V = \frac{\varepsilon_o * \sin(\Psi) - \sqrt{\varepsilon_o - \cos^2(\Psi)}}{\varepsilon_o * \sin(\Psi) + \sqrt{\varepsilon_o - \cos^2(\Psi)}} \tag{1.13}$$

$$R_h = \frac{\sin(\Psi) - \sqrt{\varepsilon_o - \cos^2(\Psi)}}{\sin(\Psi) + \sqrt{\varepsilon_o - \cos^2(\Psi)}} \tag{1.14}$$

La Figura 1.24 tiene como objetivo observar el comportamiento de la Ecuación 1.13 para frecuencias de 1 MHz, 4 MHz, 12 MHz, 100 MHz y 1 GHz en un escenario de superficie de tierra promedio. El ANEXO A tiene los valores de las constantes eléctricas del terreno en función de las frecuencias, la permitividad relativa para todas las frecuencias mencionadas es de 15 y asumiremos una conductividad promedio de 0.019 S/m. La Figura 1.24 se generó en MATLAB y se empleó el siguiente código:

```
%Coeficiente vs ángulo de reflexión
%Polarización Vertical

clear
close all
a=0:1:90;        %Ángulo de reflexión
a=(a*pi)/(180); %Ángulo reflexión en radianes
%Datos
er=15;         %Permitividad relativa
m=0.019;       %Conductividad S/m
f=[1e6 4e6 12e6 100e6 1000e6] ;  %Frecuencias de operación
c=3e8;         %Velocidad de la Luz en m/s

for i=1:5
    lamda=c./f(i);     %Longitud de onda
```

```
    %Fórmula de coeficiente de reflexión para polarización Vertical
    eo=er-((60*m*lamda)*1i);        %Permitividad compleja
    z=(sqrt(eo-(cos(a)).^2)./(eo));%Impedancia del suelo POL V
    Rv=((sin(a)-z)./(sin(a)+z));    %Coeficiente de reflexión POL V
    Rv2=abs(Rv);              %Valor absoluto del Coeficiente de Reflexión
    %Gráfica del coeficiente de reflexión en función del ángulo de
      reflexión (0-90°)
    plot((a*180)/pi,Rv2)
    hold on
end

grid on
xlabel('Ángulo reflexión \psi');
ylabel('|Rv|');
title('Coeficiente de reflexión  vs Ángulo de reflexión');
ylim([0 1])
legend('1 MHz','4 MHz','12 MHz','100 MHz','1 GHz');
```

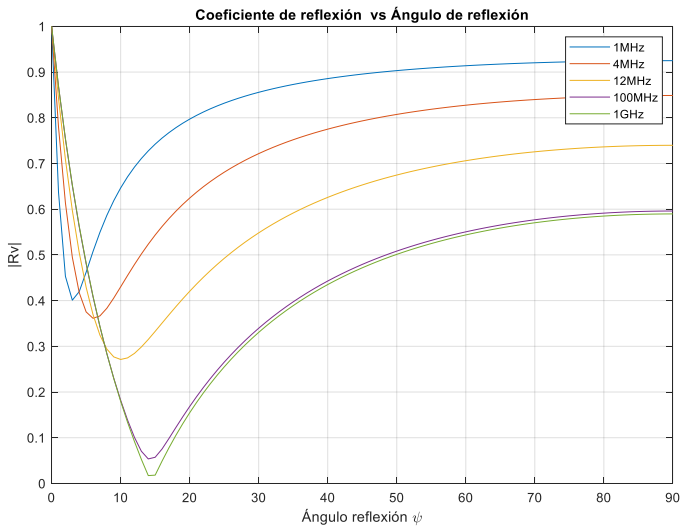


Figura 1.24 Coeficiente de reflexión para polarización vertical

En la Figura 1.24 observamos que el coeficiente de reflexión para polarización vertical es máximo cuando el ángulo de reflexión se aproxima a 0°, también se aprecia que el coeficiente de reflexión toma un valor mínimo en un ángulo de reflexión específico. A medida que aumenta la frecuencia hasta los 100 MHz, las curvas de la magnitud del coeficiente de reflexión disminuyen, las curvas de 100 MHz y 1 GHz se encuentran casi solapadas (varían muy poco).

La Figura 1.25 tiene como objetivo observar el comportamiento de la Ecuación 1.13 correspondiente al coeficiente de reflexión en polarización horizontal bajo las mismas condiciones de la Figura 1.24. La Figura 1.25 se generó en MATLAB y se empleó el siguiente código:

```
%Coeficiente vs ángulo de reflexión
%Polarización Horizontal
```

```
clear
close all
a=0:1:90;        %Ángulo de reflexión
a=(a*pi)/(180); %Ángulo de reflexión en radianes

er=15;           %Permitividad  relativa
m=0.019;         %Conductividad S/m

f=[1e6 4e6 12e6 100e6 1000e6] ;  %Frecuencias
c=3e8;         %Velocidad de la Luz en m/s

for i=1:5
      lamda=c/f(i);       %Longitud de onda

      %Fórmula de coeficiente de reflexión para polarización Vertical
      eo=er-((60*m*lamda)*1i);         %Permitividad compleja
      z=(sqrt(eo-(cos(a)).^2));        %Impedancia del suelo POL H
      Rv=((sin(a)-z)./(sin(a)+z));     %Coeficiente de reflexión POL H
      Rv2=abs(Rv);                     %Valor absoluto del Coeficiente de
                                        Reflexión
      %Gráfica del coeficiente de reflexión en función del ángulo de
      reflexión (0-90°)
      plot((a*180)/pi,Rv2)
      hold on
end

grid on
xlabel('Ángulo reflexión \psi');
ylabel('|Rv|');
title('Coeficiente de reflexión  vs Ángulo de reflexión');
ylim([0 1])
legend('1 MHz','4 MHz','12 MHz','100 MHz','1 GHz');
```

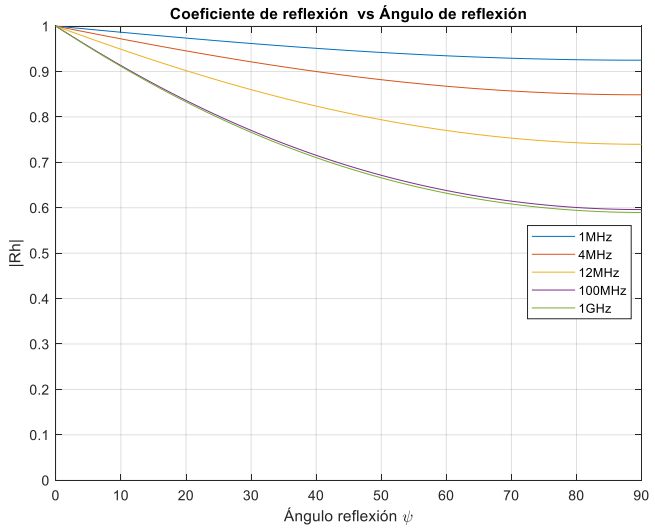


Figura 1.25 Coeficiente de reflexión para polarización horizontal

En la Figura 1.25 se observa que el coeficiente para polarización horizontal es máximo cuando el ángulo de reflexión se aproxima a 0° y el coeficiente es mínimo cuando el ángulo de reflexión se aproxima a 90°, también se observa que a medida que aumenta la frecuencia hasta los 100 MHz, las curvas de la magnitud del coeficiente de reflexión

disminuyen, las curvas de 100 MHz y 1 GHz se encuentran casi solapadas (varían muy poco).

La Figura 1.26 muestra el comportamiento de coeficiente de reflexión de polarización vertical en terrenos de tierra promedio, húmeda y superficies de agua con una frecuencia fija de 2.4 GHz.

Tabla 1.5 Valores para constantes eléctricas del tipo de suelo para frecuencia de 2.4 GHz tomado del ANEXO A

Tipo de suelo	Permitividad Relativa	Conductividad (S/m)
Tierra Moderadamente Seca	15	0,15
Tierra Húmeda	28	0,5
Agua Dulce	80	1

La Figura 1.26 se generó en MATLAB con los datos de la Tabla 1.5 y se empleó el siguiente código:

```
%Coeficiente vs ángulo de reflexión
%Polarización Vertical

clear
close all
a=0:1:90;        %Ángulo de reflexión
a=(a*pi)/(180); %Ángulo reflexión en radianes
er=[15 28 80];         %Permitividad relativa
m=[0.15 0.5 1];       %Conductividad S/m
f=2400e6 ;     %Frecuencia 2,4 GHz
c=3e8;         %Velocidad de la Luz en m/s

for i=1:3
      lamda=c./f;     %Longitud de onda
      %Fórmula de coeficiente de reflexión para polarización Vertical
      eo=er(i)-((60*m(i)*lamda)*1i);  %Permitividad compleja
      z=(sqrt(eo-(cos(a)).^2)./(eo)); %Impedancia del suelo POL V
      Rv=((sin(a)-z)./(sin(a)+z));    %Coeficiente de reflexión POL V
      Rv2=abs(Rv);                    %Valor absoluto del Coeficiente de
      Reflexión
      %Gráfica del coeficiente de reflexión en función del ángulo de
      reflexión (0-90°)
      plot((a*180)/pi,Rv2)
      hold on
end

grid on
xlabel('Ángulo reflexión \psi');
ylabel('|Rv|');
title('Coeficiente de reflexión  vs Ángulo de reflexión');
ylim([0 1])
legend('Tierra promedio','Tierra húmeda','Superficie agua');
```

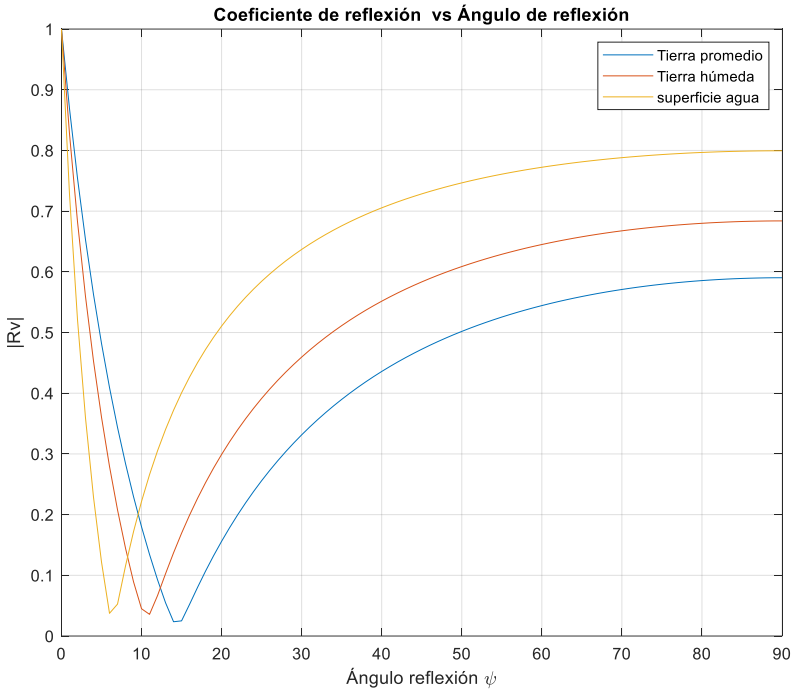


Figura 1.26 Coeficiente de reflexión para polarización vertical

En la Figura 1.26 observamos que pasado los 10° del ángulo de reflexión, la curva correspondiente a la superficie de agua tiene los valores más altos de coeficiente de reflexión respecto a las demás curvas, y por el contrario, la curva correspondiente a tierra promedio tiene los valores más altos de coeficiente de reflexión respecto a las demás curvas, en los ángulos de reflexión comprendidos entre 0-10°.

La Figura 1.27 muestra el comportamiento de coeficiente de reflexión de polarización horizontal bajo las mismas condiciones de la Figura 1.26. La Figura 1.27 se generó en MATLAB con los datos de la Tabla 1.5 y se empleó el siguiente código:

```
%Coeficiente vs ángulo de reflexión
%Polarización Horizontal

clear
close all
a=0:1:90;        %Ángulo de reflexión
a=(a*pi)/(180); %Ángulo de reflexión en radianes

er=[15 28 80];        %Permitividad relativa
m=[0.15 0.5 1];       %Conductividad S/m

f=2400e6 ;  %Frecuencia 2,4 GHz
c=3e8;      %Velocidad de la Luz en m/s

for i=1:3
      lamda=c/f;       %Longitud de onda (m)
      %Fórmula de coeficiente de reflexión para polarización Vertical
      eo=er(i)-((60*m(i)*lamda)*1i);         %Permitividad compleja
      z=(sqrt(eo-(cos(a)).^2));        %Impedancia del suelo POL H
```

```
        Rv=((sin(a)-z)./(sin(a)+z));     %Coeficiente de reflexión POL H
        Rv2=abs(Rv);                     %Valor absoluto del Coeficiente de
        Reflexión
        %Gráfica del coeficiente de reflexión en función del ángulo de
        reflexión (0-90°)
        plot((a*180)/pi,Rv2)
        hold on
end

grid on
xlabel('Ángulo reflexión \psi');
ylabel('|Rh|');
title('Coeficiente de reflexión  vs Ángulo de reflexión');
ylim([0 1])
legend('Tierra promedio','Tierra húmeda','Superficie agua');
```

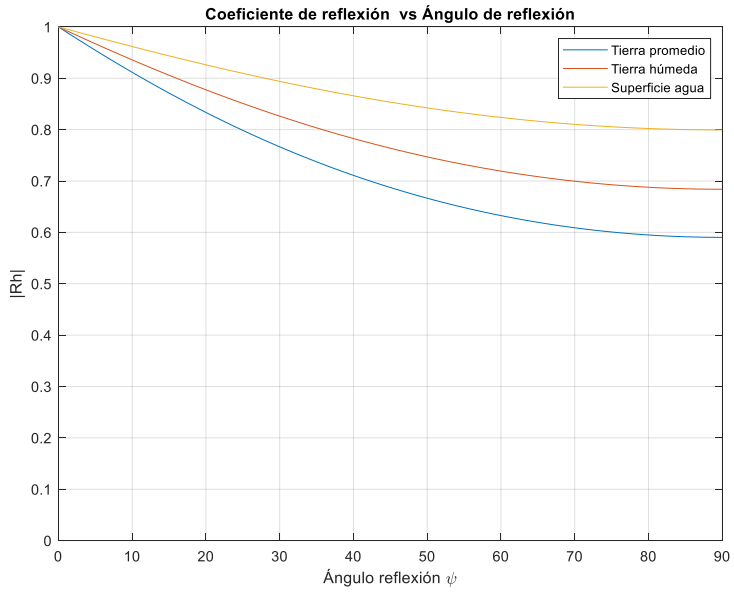


Figura 1.27 Coeficiente de reflexión para polarización horizontal

En la Figura 1.27 observamos que la curva del coeficiente de reflexión correspondiente a superficie de agua tiene los valores más altos de coeficiente de reflexión y el terreno promedio tiene los valores más bajos de coeficientes de reflexión, entre más agua tenga un terreno mayor será el coeficiente de reflexión. El valor máximo del coeficiente de reflexión se da cuando el ángulo de reflexión se aproxima a 0°.

El coeficiente de reflexión nos indica cuánto de la señal es absorbida por el terreno y cuenta señal es reflejada, la Ecuación 1.15 representa el coeficiente de reflexión en su forma exponencial:

$$R = |R|e^{-j\beta} = f(\varepsilon_o, \Psi) \tag{1.15}$$

Donde:

R: Coeficiente de reflexión.

$|R|$: Magnitud coeficiente de reflexión.

β: Ángulo de fase que introduce el terreno en la señal.

Ψ: Ángulo de reflexión

La ecuación 1.16 representa las pérdidas básicas en el presupuesto del radioenlace, está conformada por las pérdidas básicas de transmisión en el espacio libre y las pérdidas por exceso introducidas por el terreno.

$$L_b = L_{bf} + L_{ex} \tag{1.16}$$

La Ecuación 1.17 representa las pérdidas por exceso y vienen dadas por la Ecuación 1.8

$$l_{ex} = \left(\frac{e}{e_o}\right)^2 = \left(\frac{1}{(1+R*e^{-jB})}\right)^2 \tag{1.17}$$

En la ecuación 1.17 se agrega el desfase producido por la diferencia de trayectorias.

$$l_{ex} = \left(\frac{1}{(1 + R * e^{-j(\Delta+B)})}\right)^2$$

Utilizando la relación de Euler se tiene que:

$$l_{ex} = \left(\frac{1}{(1 + Rcos(\Delta + B) - jRsen(\Delta + B))}\right)^2$$

Obtenemos el valor absoluto del denominador

$$l_{ex} = \left(\frac{1}{\left[\left(1 + Rcos(\Delta + B)\right)^2 + \left(-Rsen(\Delta + B)\right)^2\right]^{1/2}}\right)^2$$

$$l_{ex} = \frac{1}{1 + 2Rcos(\Delta + B) + R^2cos^2(\Delta + B) + R^2sen^2(\Delta + B)}$$

$$l_{ex} = \frac{1}{1 + 2Rcos(\Delta + B) + R^2(cos^2(\Delta + B) + sen^2(\Delta + B))}$$

$$l_{ex} = \frac{1}{1 + 2Rcos(\Delta + B) + R^2}$$

Se expresa las pérdidas por exceso en unidades logarítmicas.

$$L_{ex} = 10log\left(\frac{1}{1 + 2Rcos(\Delta + B) + R^2}\right)$$

Finalmente, la Ecuación 1.18 representa las pérdidas por exceso en dB.

$$L_{ex} = -10log(1 + 2|R|cos(\Delta + B) + |R|^2) \tag{1.18}$$

En la Ecuación 1.18 observamos que llega un signo negativo y también depende de un coseno, eso quiere decir que en algún momento los valores generados con la ecuación pueden ser positivos (ganancia) o ser negativos (atenuación).

Evaluaremos las pérdidas en exceso variando la altura de una de las antenas mientras la otra esta fija. Al variar la altura de una antena, se está variando el ángulo de reflexión (Ψ), coeficiente de reflexión (R), ángulo de desfase introducida por el terreno (B) y la diferencia de fases(Δ). Se considera lo siguiente:

- Entornos de tierra promedio, tierra húmeda y agua.
- Una altura inicial de la antena trasmisora (h_{tx}) de 10 m.
- Una altura inicial de la antena receptora (h_{rx}) de 5 m.
- Una distancia de radioenlace de 500 m, una frecuencia de 2.4 GHz.
- Se incrementará la altura de h_{rx} en pasos de 1 centímetro hasta alcanzar una altura de 20 m.

Se empleó el siguiente código en MATLAB para generar la Figura 1.28.

```
%Variación altura antena receptora POL V
clear
close all
d=500;          %Distancia Radioenlace
ht=10;          %Altura antena transmisora
hr=5:0.01:20;   %Altura antena receptora
a=atan((ht+hr)./d); %Ángulo de reflexión

f=2400e6;     %Frecuencia de operación en MHz
c=3e8;        %Velocidad de la Luz en m/s
lamda=c/f;    %Longitud de onda (m)
er=[15 28 80];        %Permitividad relativa
m=[0.15 0.5 1];       %Conductividad S/m
delta=((4.*pi.*ht.*hr.*f)./(c.*d)); %Diferencia de fases

for i=1:3
%Fórmula de coeficiente de reflexión para POL V
eo=er(i)-((60*m(i)*lamda)*1i);        %Permitividad compleja
z=(sqrt(eo-(cos(a)).^2)./(eo)); %Impedancia del suelo POL V
Rv=((sin(a)-z)./(sin(a)+z));    %Coeficiente de reflexión POL V
B=angle(Rv);                    %Ángulo de desfase introducido por el
terreno
Rv2=abs(Rv);                    %Valor absoluto del Coeficiente de
Reflexión
Lex=10.*log10(1+Rv2.^2+2*Rv2.*cos(delta+B));
%Gráfica de las pérdidas por exceso en función de hr
plot(hr,Lex)
hold on
```

```
end
grid on
xlabel('Altura antena Rx (m)');
ylabel('Lex (dB)');
title('Pérdidas por exceso vs altura antena receptora');
legend('Tierra promedio','Tierra húmeda','superficie de agua');
```

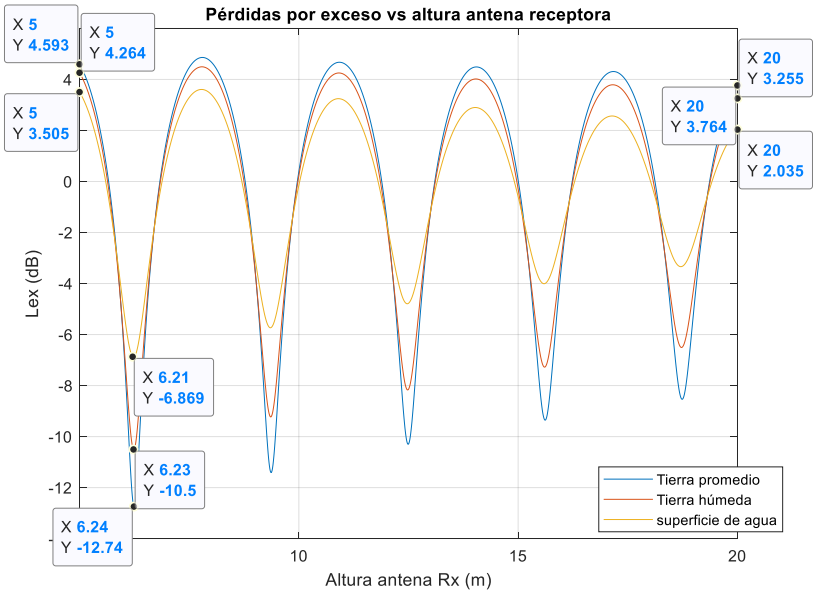


Figura 1.28 Variación altura de antena receptora con polarización vertical

En la Figura 1.28 observamos que la mayor cantidad de pérdidas por exceso (-12,74 dB) la tenemos a una altura de 6,24 m, y la mayor cantidad de ganancia (4,264 dB) la tenemos a una altura de 5 m en un entorno de tierra promedio. También observamos que la menor cantidad de pérdidas (-6,869 dB) la tenemos a una altura de antenas de 6,21 m, y la menor ganancia (3,505 dB) obtenida la tenemos a una altura de 5 m en una superficie de agua. Esto se debe a que el coeficiente de reflexión es menor en una superficie de agua que el coeficiente de reflexión en tierra promedio hasta aproximadamente los 10° (ver Figura 1.26). Las pérdidas por exceso disminuyen a medida que aumenta la altura de la antena receptora. La altura requerida para pasar de un máximo a un mínimo es de alrededor de 1,25 m o 10 λ.

Ahora se analizará la variación de altura de antena receptora para polarización horizontal. Se empleó el siguiente código en MATLAB para generar la Figura 1.27.

```
%Variación altura antena receptora POL H
clear
close all

d=500;            %Distancia Radioenlace
ht=10;            %Altura antena transmisora
hr=5:0.01:20;     %Altura antena receptora
a=atan((ht+hr)./d); %Ángulo de reflexión
```

```
f=2400e6;     %Frecuencia de operación en MHz
c=3e8;        %Velocidad de la Luz en m/s
lamda=c/f;    %Longitud de onda (m)
er=[15 28 80];        %Permitividad relativa
m=[0.15 0.5 1];          %Conductividad S/m
delta=((4.*pi.*ht.*hr.*f)./(c.*d)); %Diferencia de fases

for i=1:3
%Fórmula de coeficiente de reflexión para POL H
eo=er(i)-((60*m(i)*lamda)*1i);        %Permitividad compleja
z=(sqrt(eo-(cos(a)).^2)); %Impedancia del suelo POL H
Rv=((sin(a)-z)./(sin(a)+z));     %Coeficiente de reflexión POL H
B=angle(Rv);                     %Ángulo de desfase introducido por el
terreno
Rv2=abs(Rv);                     %Valor absoluto del Coeficiente de
Reflexión
Lex=10.*log10(1+Rv2.^2+2*Rv2.*cos(delta+B));
%Gráfica de las pérdidas por exceso en función de hr
plot(hr,Lex)
hold on
end
grid on
xlabel('Altura antena Rx (m)');
ylabel('Lex (dB)');
title('Pérdidas por exceso vs altura antena receptora');
legend('Tierra promedio','Tierra húmeda','superficie de agua');
```

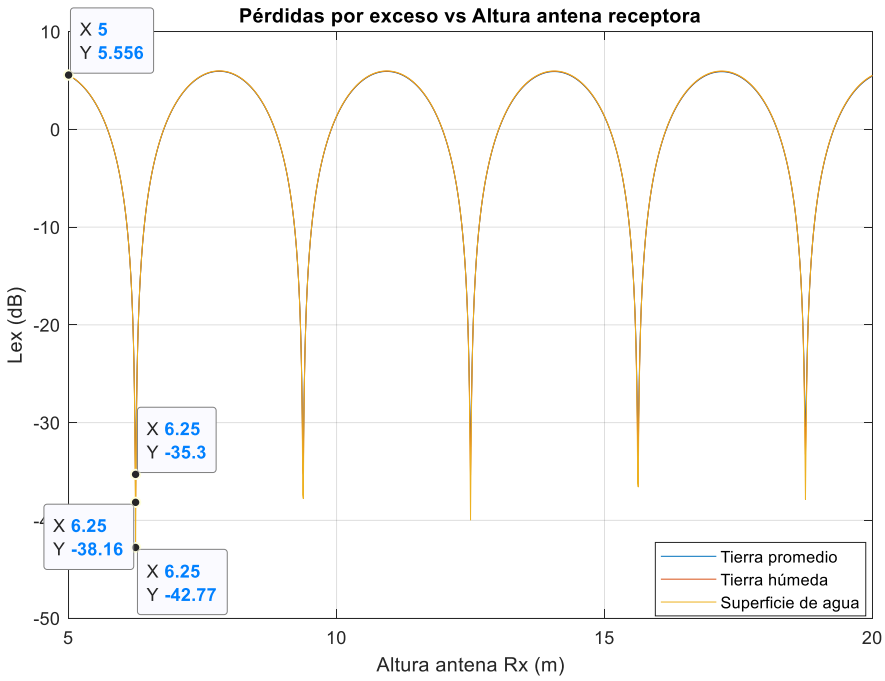


Figura 1.29 Variación altura de antena receptora con polarización horizontal

En la Figura 1.29 se observa que las 3 curvas están solapadas, y que la mayor cantidad de pérdidas (-42,77 dB) la produce la superficie de agua a una altura de antena de 6,25 m, y la mayor ganancia es de 5,56 dB a 5 m de altura.

Ahora se considerará variar la altura de la antena transmisora h_{tx} 1 cm hasta alcanzar los 25 m. Se tiene las siguientes gráficas:

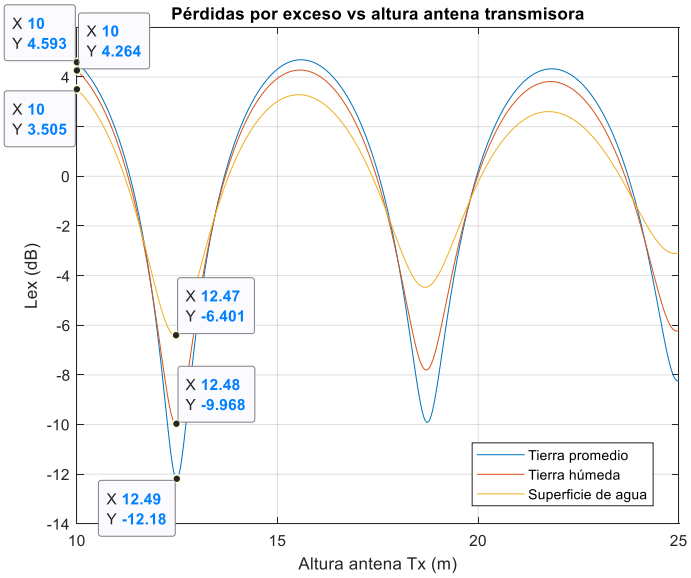


Figura 1.30 Variación altura de antena transmisora con polarización vertical

En la Figura 1.30 observamos que el número de oscilaciones disminuyó con respecto a la Figura 1.28. La altura requerida para pasar de un mínimo a un máximo es de alrededor de 2,5 m o 20 λ.

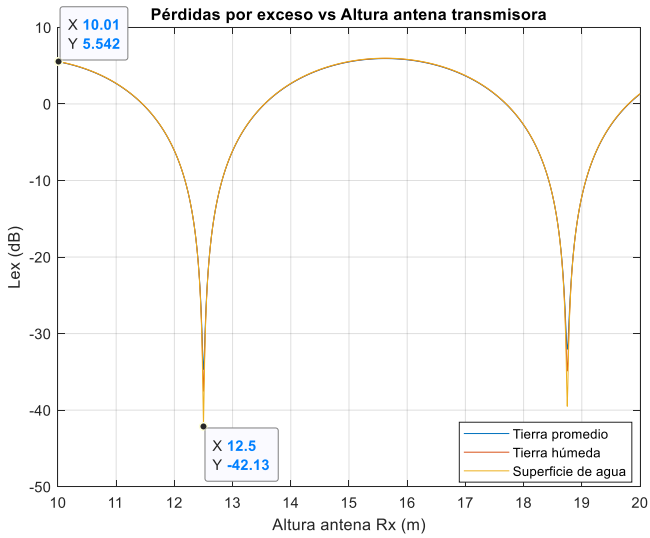


Figura 1.31 Variación altura de antena transmisora con polarización horizontal

En la Figura 1.31 observamos que el número de oscilaciones disminuyo con respecto a la Figura 1.29. La altura requerida para pasar de un mínimo a un máximo es de alrededor de 2,5 m. En conclusión, se observa que no es lo mismo incrementar la altura de la antena

transmisora que la altura receptora, si la altura de la antena que vamos a incrementar es menor que la altura de la otra antena, entonces pérdidas por exceso varían rápidamente en función de la altura. Y por el contrario si la altura de la antena que vamos a incrementar es mayor que la altura de la otra antena, entonces las pérdidas por exceso varían lentamente en función de la altura de la antena.

1.3.3 RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE

Un equipo de radio definido por software es un sistema en donde los componentes de filtros, moduladores, detectores etc. Son implementados mediante software, en otras palabras, el procesamiento de señal se realiza en el software (ejemplo MATLAB, GNU Radio) utilizando los recursos del computador en lugar de utilizar circuitos integrados dedicados en el hardware. El beneficio es que, dado que el software se puede reemplazar fácilmente en el sistema de radio, se puede usar el mismo hardware para crear muchos tipos de radios para muchos estándares de comunicaciones diferentes, es decir que un radio definido por software se puede usar en múltiples aplicaciones [27].

2. METODOLOGÍA

En esta sección se describen el hardware y software utilizados en la implementación de los sistemas de transmisión y recepción, se explica la configuración de los equipos SDR y se desarrollan diagramas para la instalación en un radioenlace terrenal punto a punto half dúplex[2] y full dúplex[3].

También se describe el proceso para evaluar las pérdidas producidas por apuntamiento de la antena (ángulo de elevación y ángulo de azimut), polarización de la antena, altura de las antenas en la primera zona de Fresnel, tipo de superficie (tierra, tierra húmeda y agua).

2.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

2.1.1 HARDWARE UTILIZADO EN LA IMPLEMENTACIÓN

Los equipos utilizados en la implementación del radioenlace son: antenas UBIQUITI modelo RocketDish-2G24, equipos de radio Definido por Software (SDR-Adalm Pluto), Computadoras y mástil.

[2] Half dúplex: Modo de explotación simplex en un extremo del circuito de telecomunicación y de explotación dúplex en el otro [10].
[3] Full dúplex: Modo de explotación que permite transmitir simultáneamente en los dos sentidos de un canal de telecomunicación [10].

2.1.1.1 Antena RocketDish-2G24

La antena RocketDish-2G24 es una antena parabólica utilizada en enlaces punto a punto de alto rendimiento, tiene un diseño robusto y está diseñada con acero galvánico que la hace resistente a la corrosión y la convierte en un hardware ideal para aplicaciones al aire libre [28].

Figura 2.1 Antena RocketDish-2G24

Las características técnicas de la antena son [29]:

- Ganancia: 24 dBi.
- Frecuencia de operación: 2,3 GHz – 2,7 GHz.
- Polarización dual (vertical y horizontal con conector RPSMA-Macho).
- Anchura del haz para polarización vertical es de 6,8° (-3 dB).
- Patrón de radiación polarización vertical.

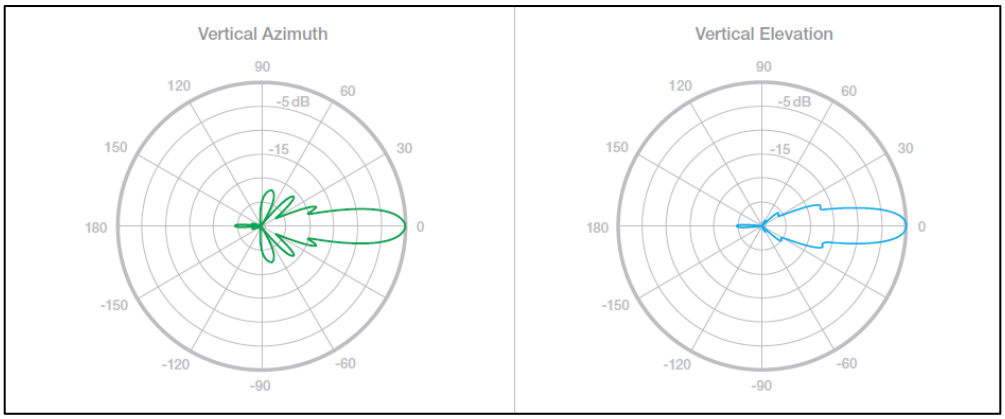


Figura 2.2 Patrón de radicación (azimut y elevación) para polarización vertical.

- Anchura del haz para polarización horizontal es de 6,6° (-3 dB).
- Patrón de radiación polarización horizontal.

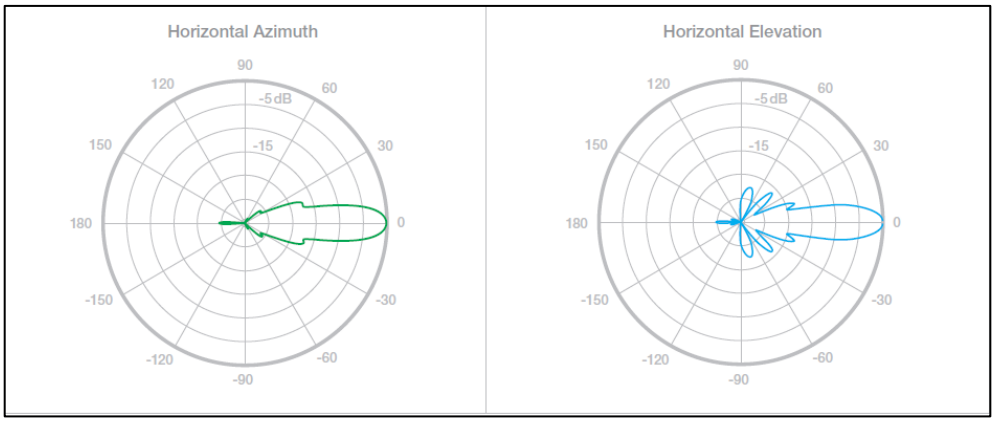


Figura 2.3 Patrón de radicación (azimut y elevación) para polarización horizontal

- Relación frente/atrás de 28 dB.
- Aislamiento polarización cruzada de 35 dB.
- Máximo VSWR: 1.6:1 (Es la relación onda estacionaria y nos indica cuanta potencia es enviada por el equipo a la antena y cuanta potencia es devuelta, en la Tabla 1.3 observamos que al tener un VSWR de 1.6:1 nos indica que el 94,7% de la potencia total llega a la antena y un 5,3% de potencia es reflejada).

2.1.1.1.1 Instalación antena RocketDish-2G24

En la Figura 2.4 se muestra los componentes de la antena RocketDish-2G24, y está formada por: un plato reflector, un alimentador (foco) de antena, un soporte de montaje, dos abrazaderas, y dos estabilizadores. Además, se cuenta con 10 pernos y 4 tornillos que nos ayudará en el ensamblaje total de la antena en un mástil [28].

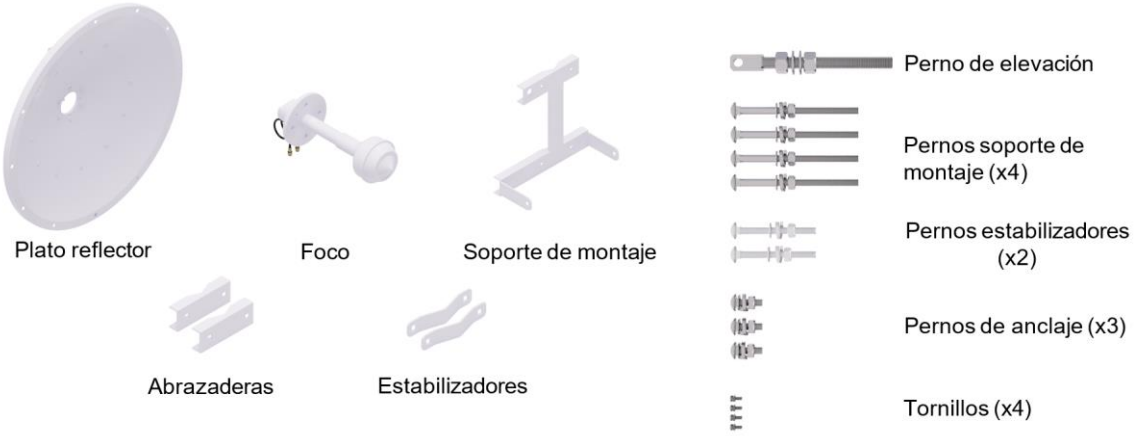


Figura 2.4 Componentes Antena RocketDish-2G24

En la Figura 2.5 se muestra la forma de ensamblar el foco con el plato reflector. El foco solo puede ser instalados en una cierta orientación, para esto primero, alineamos foco con una muesca que tiene el plato reflector, insertamos los cuatro tornillos en las ranuras indicadas de foco y ajustamos para asegurar el foco con al plato reflector [28].

Figura 2.5 Ensamblaje foco con plato reflector

El perno de elevación mostrado en la Figura 2.6 nos ayudará a modificar el ángulo de inclinación de la antena. Como se observa en la de la Figura 2.6 (a) primero, insertamos el perno en la ranura correspondiente del soporte de montaje, luego insertamos las rodelas correspondientes y ajustamos las tuercas para fijar el perno en el soporte como se observa en la Figura 2.6 (b).

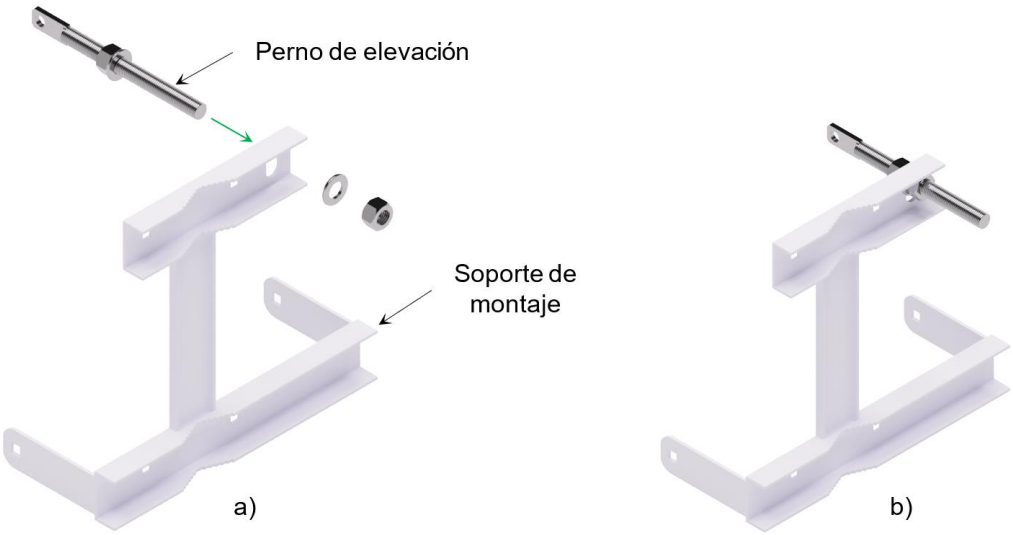


Figura 2.6 a) Instalación perno de elevación y b) Ajuste de perno de elevación

Como se muestra en la Figura 2.7 los pernos de soporte de montaje deben ser introducidos antes de anclar el plato reflector al soporte de montaje, como se muestra en la Figura 2.7 (a) se introducen los 4 pernos en sus orificios correspondientes, los pernos introducidos deberían quedar tal y como muestra en la Figura 2.7 (b).

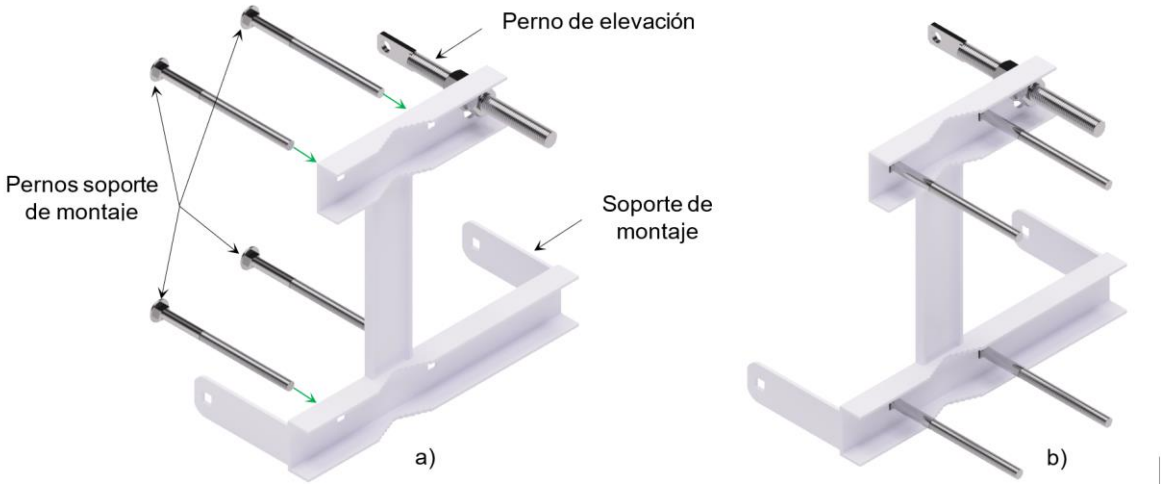


Figura 2.7 a) Fijación pernos soporte de montaje b) Pernos soporte de montaje

Para anclar el plato reflector con el soporte de montaje primero, alineamos los orificios posteriores del plato reflector con los orificios correspondientes del soporte de montaje. Luego, introducimos los tres pernos de anclaje en los orificios correspondientes como se muestra en la Figura 2.8. Finalmente, insertamos las rodelas correspondientes y ajustamos las tuercas para fijar el plato reflector con el soporte de montaje.

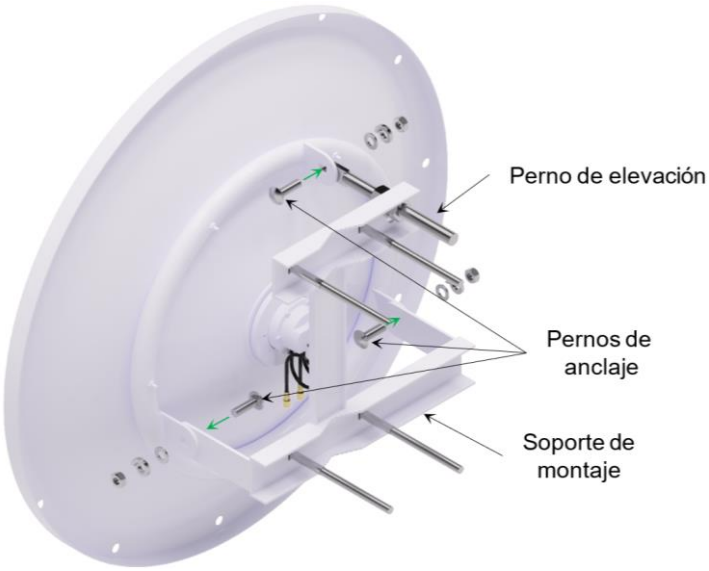


Figura 2.8 Anclaje del plato reflector

Los estabilizadores sirven como un apoyo para el soporte de montaje, los estabilizadores permiten que el soporte de montaje pueda girar alrededor del tubo de hierro del mástil. Para el mástil se puede utilizar un tubo de hierro de 1 ½" hasta un tubo de hierro de 4". Antes de montar el soporte de montaje en el mástil, primero, se colocan los estabilizadores alrededor del tubo de hierro como se observa de la Figura 2.9 (a). Luego, se insertan los pernos correspondientes. Finalmente, insertamos las rodelas correspondientes y ajustamos las tuercas para fijar los estabilizadores con el tubo de hierro del mástil, deberían quedar tal y como se muestra en la Figura 2.9 (b).

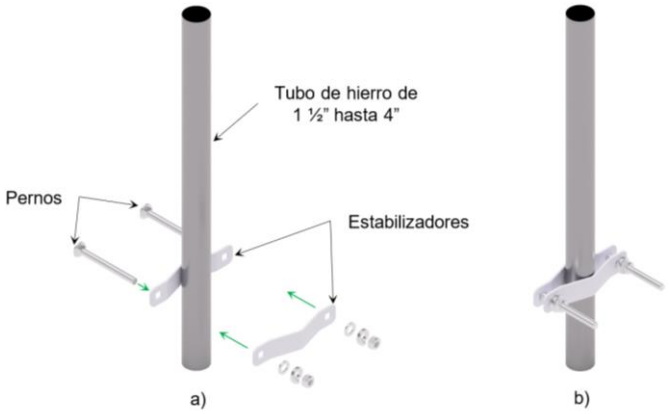


Figura 2.9 Estabilizadores

Para finalizar el ensamblaje de la antena, primero, se sitúa el soporte de montaje sobre los estabilizadores, luego, se utilizan abrazaderas para fijar el soporte de montaje con el tubo de hierro y se aseguran las abrazaderas insertando las rodelas correspondientes y ajustando las tuercas en los pernos correspondientes (ver Figura 2.10).

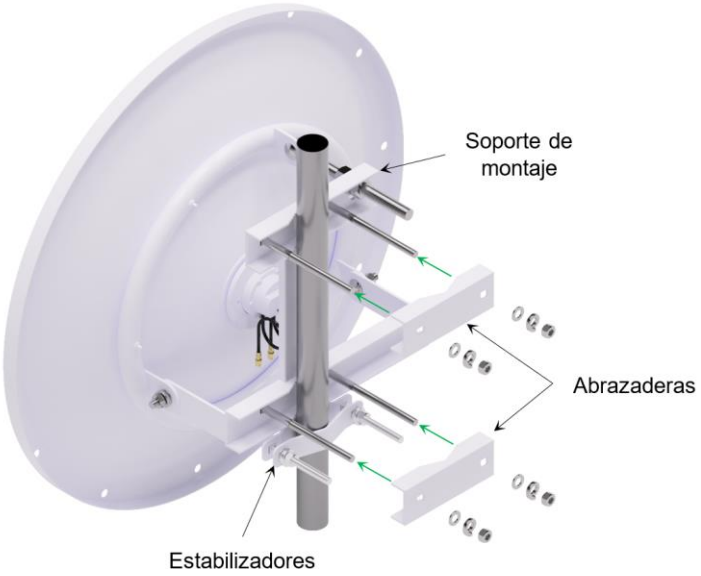


Figura 2.10 Instalación de la antena en el mástil

La Figura 2.11 muestra cómo debería quedar la instalación completa de la antena.

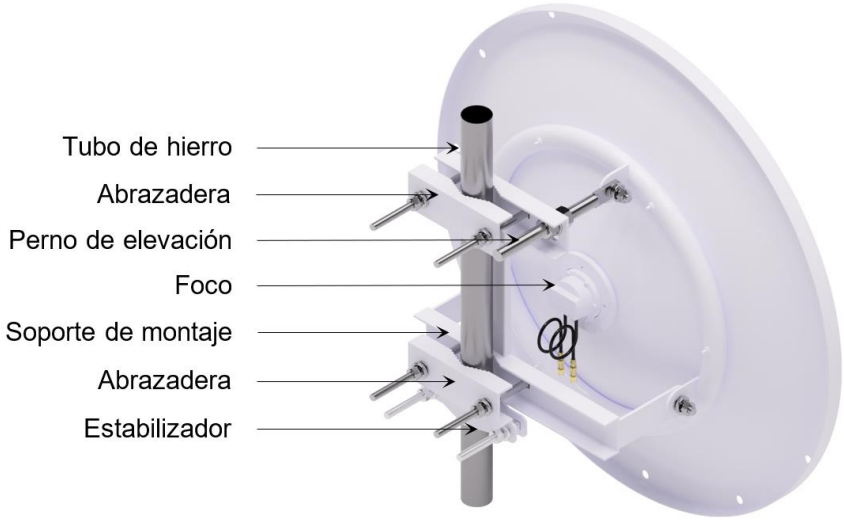


Figura 2.11 Ensamblado total antena RocketDish-2G24 (vista posterior)

2.1.1.2 Equipo de radio definido por software Adalm Pluto

La siguiente descripción es un resumen de la página oficial del producto [30]. El Módulo ADALM-PLUTO es un equipo de aprendizaje fácil de usar desarrollado por la compañía Analog Devices (ver Figura 2.12). El dispositivo puede usarse para introducir los fundamentos de Radio Definida por Software (SDR), Radio Frecuencia (RF), comunicaciones y temas avanzados en ingeniería en Telecomunicaciones en un entorno apropiado. El equipo Adalm Pluto permite a los estudiantes comprender mejor la RF del mundo real a su alrededor. El aprendizaje temprano de manera práctica con el equipo Adalm Pluto asegurará una base sólida a medida que cursan estudios de ciencias, tecnología o ingeniería.

Figura 2.12 Equipo de radio definido por software (SDR) Adalm Pluto

La Figura 2.13 muestra una descripción física/visual del equipo Adalm Pluto:

Figura 2.13 a) Vista frontal SDR Adalm Pluto b) Vista lateral izquierda SDR Adalm Pluto

Donde:

1. Equipo SDR Adalm Pluto
2. Conector SMA-hembra para transmisión
3. Conector SMA-hembra para recepción
4. Entrada micro-USB para datos y alimentación
5. Entrada micro-USB para alimentación extra
6. Antenas GSM
7. Leds de notificaciones
8. Tiene dimensiones de 117 mm x 79 mm x 24 mm

Las características técnicas del equipo SDR Adalm Pluto son las siguientes:

- Procesador ARM Cortex®-A9 @ 667 MH (de doble núcleo, un núcleo desbloqueado de fábrica, para tener una mayor eficiencia del equipo se puede activar el otro núcleo, pero es recomendable usar la entrada de alimentación extra para suministrar mayor corriente al equipo)
- Conversores ADC y DAC de 12 bits
- Rango de frecuencia de trabajo de 325 MHz a 3,8 GHz (opción de rango extendido: 71 MHz – 6 GHz)
- Potencia máxima de trasmisión: 5 mW o 7 dBm, en las pruebas de campo se utilizará la décima parte de esta potencia (-3dBm) para evitar daños en el equipo.
- Antenas GSM (824 MHz a ~894 MHz / 1 710 MHz a ~ 2 170 MHz)

- 20 MHz de ancho de banda (rango extendido: 54 MHz)
- Funcionamiento en half dúplex o full dúplex
- Un transmisor y un receptor (conector SMA-Hembra)
- Doble alimentación mediante micro-USB 2.0
- Maneja librerías Libiio, C, C++, C#, y Python API
- Soporte para MATLAB mediante código, y disponibilidad de bloques para el fácil manejo en Simulink.
- Soporte para GNU Radio

Los conectores del equipo SDR Adalm pluto son SMA (SubMiniature version A) Hembra (ver Figura 2.14), y la antena RocketDish de Ubiquiti adquirida maneja el estándar RPSMA (Reverse Polarity SMA) Macho (ver figura 2.14). Los dos conectores son incompatibles y se necesitará un acoplador. Para conectar el equipo SDR Adalm Pluto con la antena RocketDish se necesita un acoplador SMA-Macho a RPSMA-Hembra.

Figura 2.14 Estándar SMA y RPSMA

2.1.1.2.1 Configuración del Equipo

Extensión de rango de frecuencia de Adalm Pluto

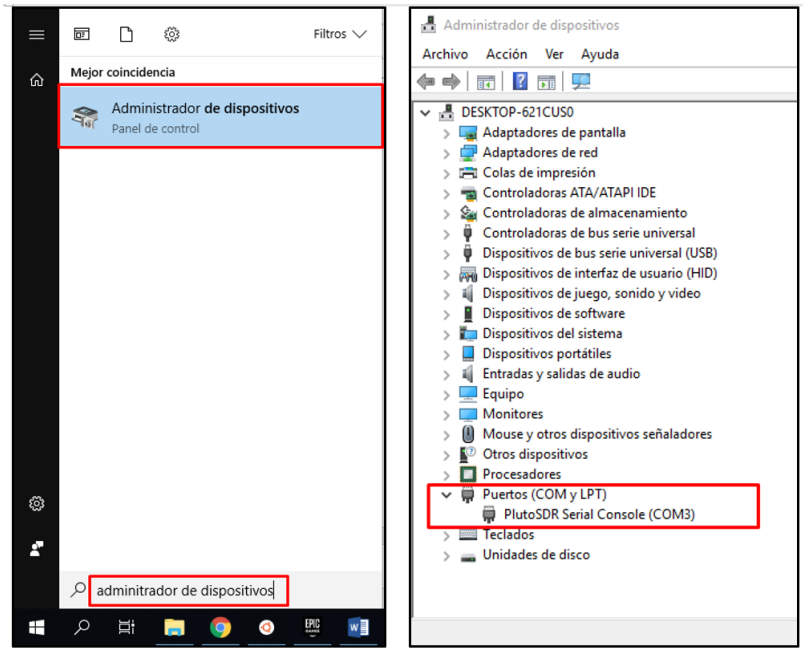
Los primeros dispositivos Adalm Pluto trabajan con el chip AD9364 el cual es similar al chip AD9363 que se usa ahora para su producción [31]. A continuación, en la Tabla 2.1 se compara los datos técnicos de rango de frecuencia y ancho de banda de los chips.

Tabla 2.1 Tabla comparativa de chips RF para SDR Adalm Pluto

RF Transceiver	LO tuning range	Bandwidth
AD9363 (Default ADALM-PLUTO)	325 – 3 800 MHz	20 MHz
AD9364	70 – 6 000 MHz	56 MHz

Para conocer con cual chip trabaja nuestro dispositivo Adalm Pluto realizamos los siguientes pasos:

Primero, en el cuadro de búsqueda de Windows tecleamos “administrador de dispositivos” y presionamos enter, se abrirá la ventana de administrador de dispositivos, en la sección de puertos (COM LT) buscamos el puerto COM que fue asignado a nuestro dispositivo Adalm Pluto.



a) b)

Figura 2.15 a) Búsqueda de administrador de dispositivos b) Pluto SDR Serial Console (COM3)

Una vez que conocemos el puerto que utiliza nuestro dispositivo, realizamos una comunicación serial con el dispositivo SDR Adalm Pluto mediante el programa Putty (ver Figura 2.16).

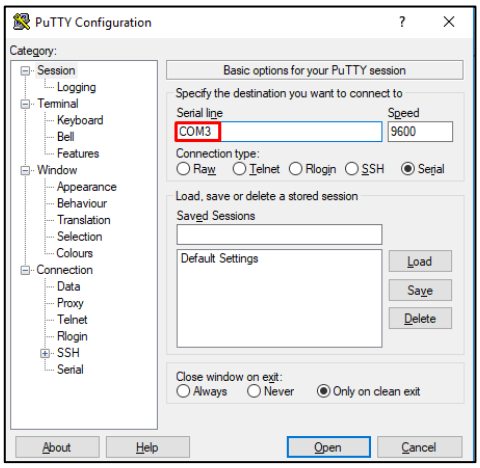


Figura 2.16 Comunicación serial con SDR Adalm Pluto a través de Putty

Al iniciar la comunicación serial se nos abre el terminal donde nos pedirá el nombre de usuario y la contraseña para ingresar al dispositivo (ver Figura 2.17). Para todos los dispositivos SDR Adalm Pluto el nombre de usuario es root y la contraseña es analog.

Figura 2.17 Login en Terminal

Si ingresamos correctamente las credenciales nos despliega la siguiente ventana:

Figura 2.18 Pantalla de Bienvenida del Dispositivo SDR

Con las siguientes líneas de comando se determina si un dispositivo trabaja con el chip AD9663 o con el chip AD9364.

```
fw_printenv attr_name
fw_printenv attr_val
```

Si se tiene el siguiente resultado quiere decir que nuestro dispositivo trabaja con el chip AD9363.

```
fw_printenv attr_name
Error: "attr_name" not defined
fw_printenv attr_val
Error: "attr_val" not defined
```

Y si se obtiene el siguiente resultado, nuestro dispositivo trabaja con el chip AD9364.

```
fw_printenv attr_name
attr_name=compatible
fw_printenv attr_val
```

```
attr_val=ad9364
```

En el caso de que nuestro chip sea el AD9363, ingresamos las siguientes líneas de comando para cambiar a la configuración AD9364.

```
fw_setenv attr_name compatible
fw_setenv attr_val ad9364
reboot
```

El dispositivo se reiniciará y se actualizará a la nueva configuración. Si se requiere se puede activar el segundo núcleo del procesador introduciendo la siguiente línea de comando:

```
cat /proc/cpuinfo shows just one CPU - processor 0
fw_setenv maxcpus
pluto_reboot reset
```

El dispositivo se reiniciará y se actualizará a la nueva configuración, es recomendable que al activar el segundo procesador se utilice el puerto de alimentación extra del dispositivo para que se suministre la corriente necesaria.

Modificación de dirección IP

El computador reconoce al equipo SDR Adalm Pluto como una unidad de almacenamiento extraíble de nombre “PlutoSDR”. La dirección IP del equipo se puede modificar ingresando en el archivo “config” que se encuentra en la unidad de almacenamiento “PlutoSDR” (ver Figura 2.19).

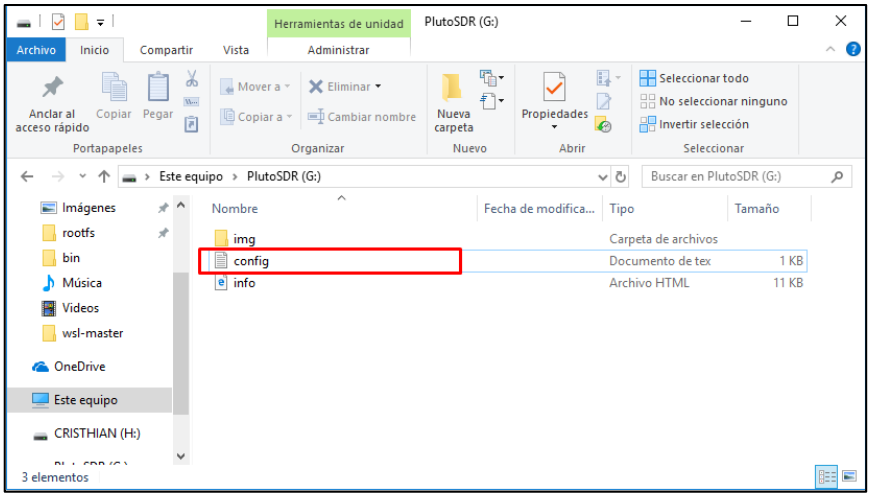


Figura 2.19 Archivo config del equipo SDR Adalm Pluto

En la Figura 2.20 se muestra el contenido del archivo “conf” del dispositivo SDR Adalm Pluto. Para modificar la dirección IP del equipo se modificará el parámetro “ipaddr” y “ipaddr_host” de la sección de NETWORK, si se trabaja en el mismo computador con varios equipos Adalm Pluto se debe modificar también el parámetro “hostname”.

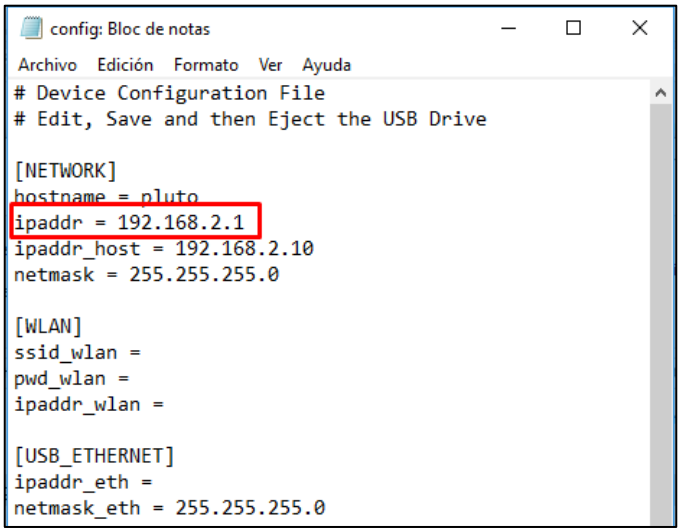


Figura 2.20 ipaddr del equipo SDR Adalm Pluto

Finalmente, terminada la modificación del archivo config se debe realizar dos pasos importantes para que los cambios se guarden en el equipo SDR Adalm Pluto, primero, guardar los cambios realizados en el archivo config, y segundo, expulsar el dispositivo PlutoSDR desde la ventana “Este equipo” de la siguiente manera como se muestra en la Figura 2.21.

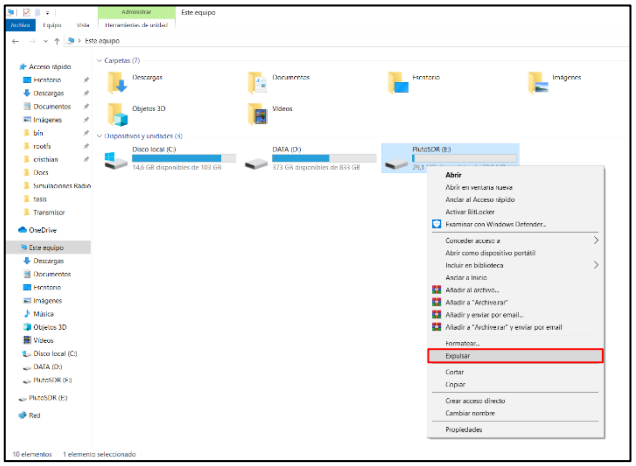


Figura 2.21 Expulsar equipo PlutoSDR para guardar los cambios

El equipo transmisor tendrá la dirección IP 192.168.3.1 y el equipo receptor tendrá la dirección IP 192.168.4.1.

2.1.1.3 Computador, mástil

Las computadoras mediante el software adecuado manejarán el procesamiento de señales y se comunicarán con los equipos de radio definido por software Adalm Pluto. Las computadoras utilizadas son una portátil HP dv6 6c80la y una portátil DELL G3 3579.

La laptop HP dv6 6c80la tiene las siguientes características:

- Procesador Intel Core i7-2770QM a 2,2 GHz (segunda generación)
- Memoria RAM DDR3 de 8 GB (2x4 GB)
- Tarjeta gráfica GDDR5 AMD Radeon 7690MXT de 2 GB
- Batería de ion de litio de 6 celdas (62 Wh)

La laptop DELL G3 3579 tiene las siguientes características:

- Procesador Intel Core i7-8750H a 2,2 GHz (octava generación)
- Memoria RAM DDR4 de 8 GB (1x8 GB)
- Tarjeta gráfica GDDR5 Nvidia GeForce GTX 1050ti de 4 GB
- Batería de ion de litio de 4 celdas (56 Wh)

El mástil sirve como soporte para la conexión de equipos y montaje de la antena, como se muestra en la Figura 2.22 (a)(b) el mástil se compone de dos partes: la primera parte es una base de hierro de 1 m de largo por 1 m de ancho y en el centro de dicha base, se encuentra soldada un tubo de hierro de 20 cm de altura con un diámetro ligeramente superior a 1 ½", la segunda parte, es un tubo de hierro de 3 m de altura con un diámetro de 1 ½". Para ensamblar el mástil, se toma el tubo de hierro de 3 m y se inserta en el tubo de hierro de 20 cm de la base, la Figura 2.22 (c) muestra el mástil ensamblado.

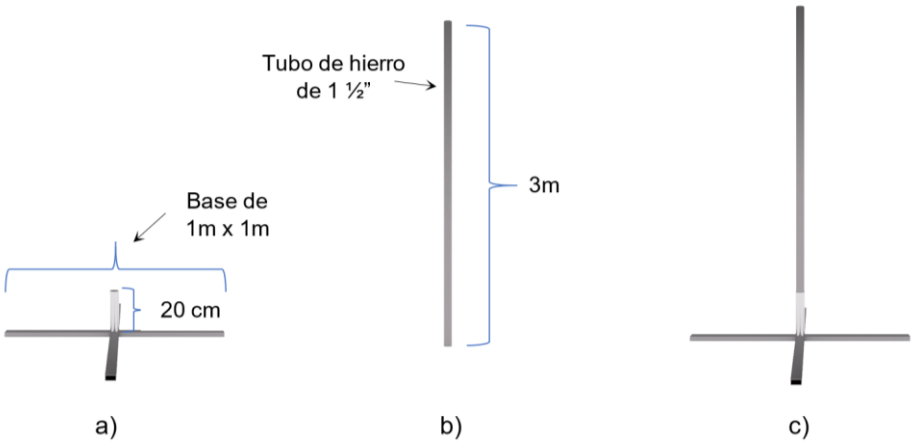


Figura 2.22 a) Base de mástil b) Tubo de hierro c) Mástil

La antena se puede colocar a lo largo del mástil. Para facilitar la conexión del computador con el equipo SDR Adalm Pluto y favorecer la operación del usuario en la toma de datos, se coloca una base de madera en el tubo de hierro con la ayuda de escuadras metálicas y pernos a una altura de 1,5 m. El equipo SDR Adalm Pluto se conecta al computador mediante un cable micro USB de 1,5 m de largo.

2.1.2 SOFTWARE

2.1.2.1 GNU Radio

GNU Radio es un paquete de herramientas de desarrollo de software gratuito y de código abierto que proporciona bloques de procesamiento de señales para implementar diagramas de flujos de señal. Se puede utilizar un hardware de RF de bajo costo para crear radios definidos por software, o se puede utilizar sin hardware en un entorno de simulación [27].

Existen varias formas de instalar GNU Radio en el computador y son las siguientes:

- En Ubuntu Nativo.

Para instalar Ubuntu de forma nativa se requiere una instalación desde cero en un disco duro o instalar en una partición del disco junto con Windows. En cualquiera de los casos esta instalación nos proporciona un GNU Radio que trabaja de la forma más optimizada.

- En Ubuntu mediante máquina virtual.

La emulación de Ubuntu en máquina virtual consume muchos recursos del computador y por ser emulación obtenemos un sistema operativo lento por ende GNU Radio no responderá de forma eficiente.

- En WSL (Windows Subsystem Linux).

Otra opción es instalar GNURadio en la aplicación de WSL que está disponible de forma gratuita en la tienda de Microsoft store. Esta aplicación nos ahorra recursos porque no es un sistema operativo completo sino un terminal, en este terminal solamente necesitamos instalar algunas dependencias para que funcione GNURadio, actualmente la desventaja de esta clase de distribución de Ubuntu es que los comandos de terminal son muy limitados, también no se puede manejar algunos dispositivos internos o externos como: micrófonos, parlantes, cámaras etc.

- GNU Radio para Windows.

Los bloques del dispositivo Adalm Pluto no están disponibles para el GNU Radio de Windows, se espera que en las siguientes versiones GNU Radio para Windows incorporen estos bloques.

Se trabajará con Ubuntu de forma nativa para aprovechar toda la velocidad de procesamiento de GNU Radio y poder utilizar los dispositivos de las computadoras sin problemas.

2.1.2.1.1 Instalación de GNU Radio en Ubuntu

El proceso de instalación se realizará en base a la referencia [32]. Primero, ingresamos al terminal como administrador, nos logeamos usando la siguiente línea de comandos:

```
sudo su
```

Es necesario que el sistema este actualizado el antes de instalar GNURadio, lo hacemos de la siguiente manera:

```
apt-get update
apt-get -y upgrade
```

Instalamos GNU Radio y otras dependencias con el siguiente comando:

```
apt-get -y install gnuradio libxml2 libxml2-dev bison flex cmake git lib
aio-dev libboost-all-dev swig
```

Hasta el momento ya tenemos instalado el programa GNU Radio en Ubuntu, pero GNU Radio no dispone de los bloques para el control del Radio Definido por Software (SDR) Adalm Pluto, estas librerías se encuentran en GitHub y se las instalará manualmente de la siguiente manera:

En el terminal de Ubuntu ingresamos las siguientes líneas de comando para la descarga y preparación de librería libiio:

```
git clone https://github.com/analogdevicesinc/libiio.git
cd libiio
cmake .
make
sudo make install
cd ..
```

En el terminal de Ubuntu ingresamos las siguientes líneas de comando para la descarga y preparación de libad9361-iio:

```
git clone https://github.com/analogdevicesinc/libad9361-iio.git
cd libad9361-iio
cmake .
```

```
make
sudo make install
cd ..
```

En el terminal de Ubuntu ingresamos las siguientes líneas de comando para la descarga y preparación de de gr-iio:

```
git clone https://github.com/analogdevicesinc/gr-iio.git
cd gr-iio
cmake -DCMAKE_INSTALL_PREFIX=/usr .
make
sudo make install
cd ..
sudo ldconfig
```

GNU Radio recomienda agregar una carpeta de nombre gnuradio dentro de la carpeta site-packages o en dist-packages.

```
mkdir /usr/local/lib/python2.7/site-packages/gnuradio
mkdir /usr/local/lib/python2.7/dist-packages/gnuradio
```

Finalmente, iniciamos GNU Radio con el siguiente comando:

```
gnuradio-companion
```

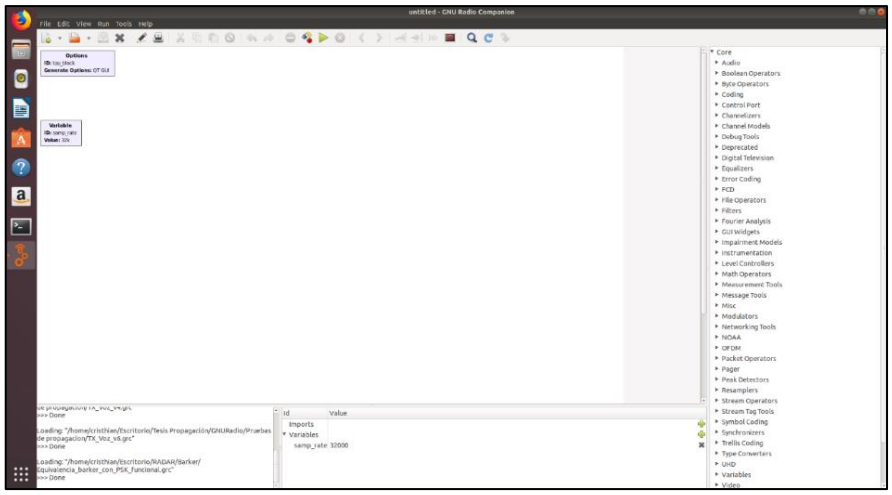


Figura 2.23 GNU Radio Companion

Entorno GNU Radio

En la Figura 2.24 observamos que la venta GNU radio se divide en 4 áreas que son: área de trabajo, área de bloques, área de registro y un área para las de variables. El área de trabajo corresponde al espacio donde diseñaremos los diagramas de flujo de señal, todos

los bloques de procesamiento de señal disponibles en GNU Radio los encontraremos en el área de bloques y para una búsqueda rápida de un bloque en específico se presiona las teclas CTRL+F. En el área de las variables se muestran las variables utilizadas en los diagramas de flujo diseñados y en el área de registro se muestra los mensajes de las actividades realizadas como ejecución de diagramas, mensajes de errores etc.

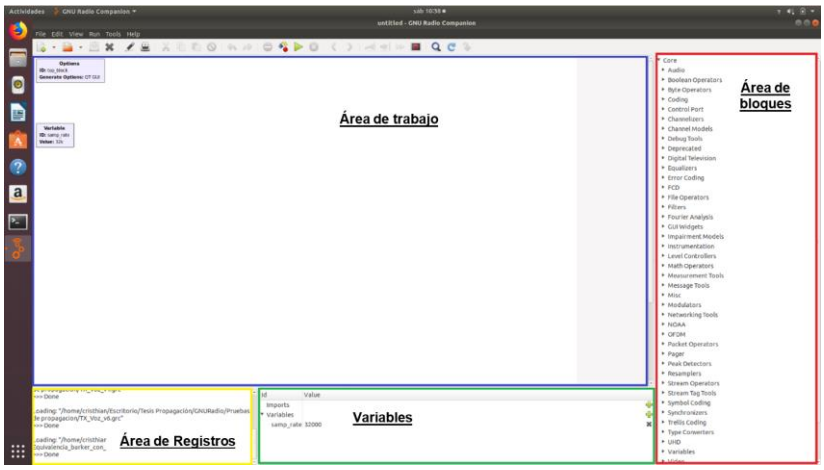


Figura 2.24 Entorno GNU Radio

2.1.2.1.2 Bloques del equipo SDR Adalm-Pluto

La descripción de los siguientes bloques se hará en base a la referencia [32].

Bloque PlutoSDR Source (Recepción)

En la Figura 2.25 se observa a la izquierda el bloque de recepción del dispositivo Adalm Pluto para GNU Radio y a la derecha se observa las propiedades de dicho bloque.

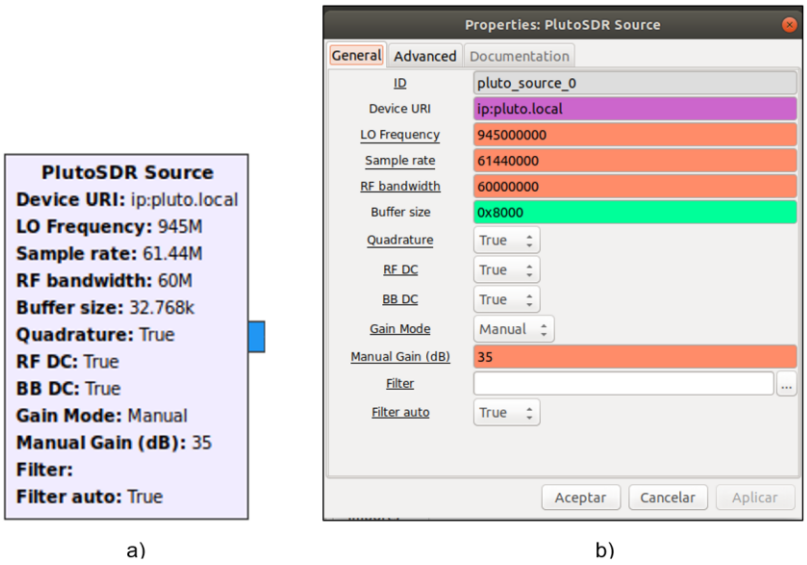


Figura 2.25 a) Bloque PlutoSDR Source b) Propiedades del bloque Pluto SDR Source

Los parámetros del bloque son los siguientes:

Device URI: se puede realizar la comunicación del computador con el dispositivo SDR Adalm Pluto colocando en el campo Device URI: la dirección IP del dispositivo previamente configurado o se puede utilizar la dirección IP por defecto del equipo que es 192.168.2.1.

LO Frequency (MHz): selecciona la frecuencia del oscilador local RX. Rango de 71 MHz a 6 GHz con sintonización de 1Hz.

Sample Rate (MSPS-Mega Samples Per Second): Frecuencia con la que el hardware ingresará muestras, por defecto está configurado a 2,048 MHz.

TX RF Bandwidth (MHz): Selecciona el ancho de banda con el que se trabajará, el rendimiento máximo sin pérdida de paquetes es de 6 MHz, por defecto está configurado a 20 MHz.

RX RF Bandwidth (MHz): La suma de los anchos de banda de recepción y transmisión no puede exceder los 6 MHz, Se deberá usar anchos de banda iguales o inferiores a 3 MHz para una implementación completa en full dúplex (recepción y transmisión simultáneas).

Tracking: Quadrature, RF DC, BB DC

Buffer Size: Tamaño del búfer interno en muestras. Los bloques solo ingresarán / sacarán un tamaño de búfer de muestras a la vez, se puede modificar y utiliza formato hexadecimal.

Gain Mode: selecciona uno de los modos disponibles: manual, slow_attack, híbrido y fast_attack.

- Manual Gain Control (MGC): Por defecto se encuentra en 64 dB y se puede establecer un valor entre 0 - 71 dB para una frecuencia de operación de 2,4 GHz, y hasta 74 dB para una frecuencia de operación de 800 MHz.
- Slow Attack: este modo está diseñado para señales que cambian lentamente, como las que se encuentran en algunas aplicaciones de FDD, WCDMA y FDD LTE. El Automatic Gain Control (AGC) de Slow Attack utiliza un bucle de control de segundo orden con histéresis que cambia la ganancia para mantener la potencia de señal promedio dentro de una ventana programable.
- Hybrid: el modo Hybrid AGC es el mismo que el Slow Attack AGC, con la excepción de que no se usa un contador de actualización de ganancia.
- Fast Attack: el modo de fast attack está diseñado para formas de onda que "estallan" de manera intermitente, como las que se encuentran en las aplicaciones TDD o GSM / EDGE FDD. El AGC responde muy rápidamente a las sobrecargas al

inicio de una ráfaga, de modo que el AGC puede establecerse en un índice de ganancia óptimo en el momento en que llega la parte de datos de la señal.

Filter: permite cargar una configuración de filtro FIR desde un archivo.

Filter automático: Cuando está habilitado, carga un filtro predeterminado.

Bloque de PlutoSDR Sink (Transmisión)

En la Figura 2.26 se observa a la izquierda el bloque de transmisión del dispositivo Adalm Pluto para GNU Radio y a la derecha se observa las propiedades de dicho bloque.

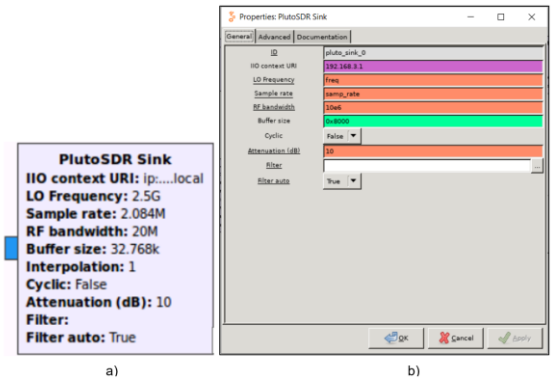


Figura 2.26 a) Bloque PlutoSDR Sink b) Propiedades del bloque PlutoSDR Sink

Los parámetros del bloque son los siguientes:

IIO context URI: se puede realizar la comunicación con el dispositivo SDR Adalm Pluto colocando en el campo IIO context URI: la dirección IP del dispositivo previamente configurado o se puede utilizar la dirección IP por defecto del equipo que es 192.168.2.1.

LO Frequency (MHz): Selecciona la frecuencia del oscilador local TX. Rango de 71 MHz a 6 GHz con sintonización de 1 Hz.

Sample Rate (MSPS-Mega Samples Per Second): Frecuencia con la que el hardware emitirá muestras, por defecto está configurado a 2,048 MHz

RX RF Bandwidth (MHz): La suma de los anchos de banda de recepción y transmisión no puede exceder los 6 MHz, Se deberá usar anchos de banda iguales o inferiores a 3 MHz para una implementación completa en full dúplex (recepción y transmisión simultáneas).

Atenuación (dB): Controla la potencia de transmisión mediante una atenuación, el rango va desde 0 hasta -89,75 dB con pasos de 0,25 dB. La atenuación por defecto está fijada en 10 dB.

Buffer Size: Tamaño del búfer interno en muestras. Los bloques solo ingresarán / sacarán un tamaño de búfer de muestras a la vez, se puede modificar y utiliza formato hexadecimal.

Filter: permite cargar una configuración de filtro FIR desde un archivo.

Filter automático: Cuando está habilitado, carga un filtro predeterminado.

2.1.2.1.3 Esquemas de transmisión/recepción

La Figura 2.27 muestra el diagrama de bloques para transmitir una portadora a 2,4 GHz

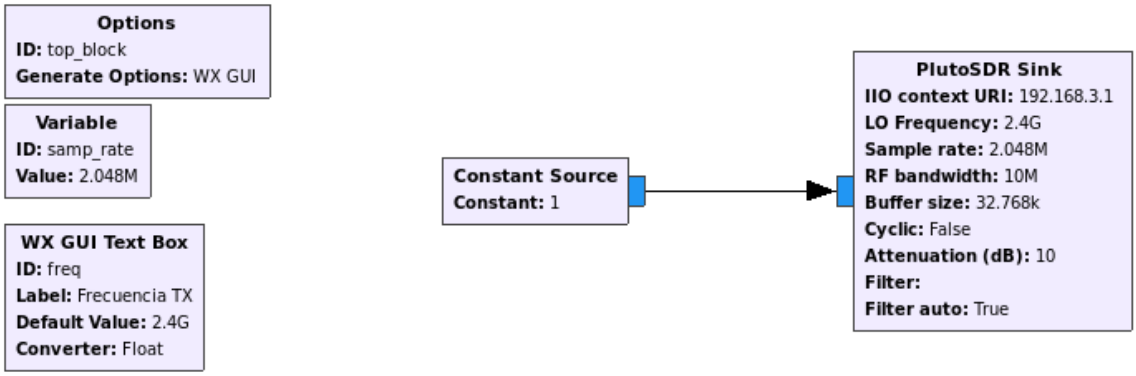


Figura 2.27 Diagrama de Transmisión

La Figura 2.27 está constituido por un bloque de una fuente de valor constante igual a 1 y por un bloque de transmisión “PlutoSDR Sink”, se debe ingresar en el campo “IIO context URI” la dirección IP 192.168.3.1 correspondiente al equipo transmisor, la potencia del equipo transmisor se la puede controlar ingresando la atenuación en el parámetro de “Attenuation” del bloque “PlutoSDR Sink”, se trabajará con la atenuación de 10 dB, la potencia máxima del equipo transmisor es de 7 dBm, y con la atenuación mencionada será de -3 dBm. El bloque de “WX GUI Text Box” nos ayudará a cambiar la frecuencia de transmisión cuando esté en funcionamiento el diagrama.

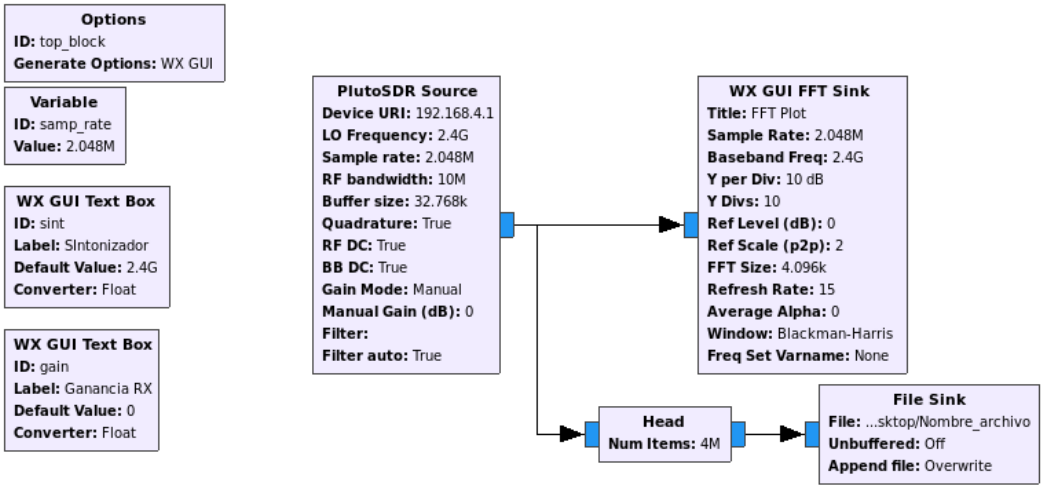


Figura 2.28 Diagrama de Recepción

La Figura 2.28 consta de dos bloques principales: uno correspondiente al equipo de radio receptor “PlutoSDR Source” y otro correspondiente al bloque “WX GUI FFT Sink” que nos permitirá observar la amplitud de la portadora en dB, en el campo “Device URI” del bloque “PlutoSDR Source” se debe ingresar la dirección IP 192.168.4.1 correspondiente al equipo de radio receptor. Se puede variar la ganancia del receptor mediante el parámetro “Manual Gain(dB)” del bloque “PlutoSDR Source”. Durante el funcionamiento del diagrama se podrá variar la ganancia del equipo receptor sin problema alguna hasta un máximo de 71 dB, pero en las mediciones de potencia se dejará un valor de 0 dB para que no afecte a los resultados.

2.1.2.1.4 Aplicación de audio/voz

Para garantizar el funcionamiento del radioenlace, se plantea el esquema del ANEXO B. El esquema corresponde a un diagrama para la transmisión FM de música tanto en half-dúplex como full-dúplex y también para la transmisión FM de voz en full-dúplex en tiempo real. La descripción del diagrama se encuentra en el ANEXO C.

2.1.2.2 Radio Mobile

Radio Mobile es un software gratuito utilizado para la planificación de radioenlaces fijos y móviles. Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado la última versión del programa que es la 11.6.6 y puede descargarse de la referencia [33]. El programa se basa en el modelo Longley-Rice también conocido como modelo de propagación ITM (Irregular Terrain Model), el modelo predice mediante análisis estadísticos la atenuación media de una señal de radio que se propaga en un entorno troposférico sobre características del terreno. Radio Mobile permite simular radioenlaces con frecuencias de operación entre los

20 MHz a 20 GHz, y trabajar a distancia de 1 a 2000 km. Radio Mobile utiliza los siguientes modelos digitales de terreno: SRTM, GTOPO30 y DTED.

2.1.2.2.1 Configuración de redes

Para los diferentes radioenlaces se configurará 3 tipos de redes, una para entorno con tierra promedio, otra para entorno con tierra húmeda y una para superficie de agua. Los parámetros considerados de la red se visualizan en la Tabla 2.2, y son: las características eléctricas de los terrenos, frecuencia de trabajo de la antena. Los demás parámetros serán establecidos por defecto.

Tabla 2.2 Parámetros Considerados

Parámetros	Tierra Promedio	Tierra Húmeda	Superficie Agua
Permitividad relativa	15	28	80
Conductividad (S/m)	0,15	0,5	1
Frecuencia de operación (MHz)	2300 - 2700		

La Figura 2.29 muestra configuración de los parámetros de red de la Tabla 2.2 para un entorno de tierra promedio.

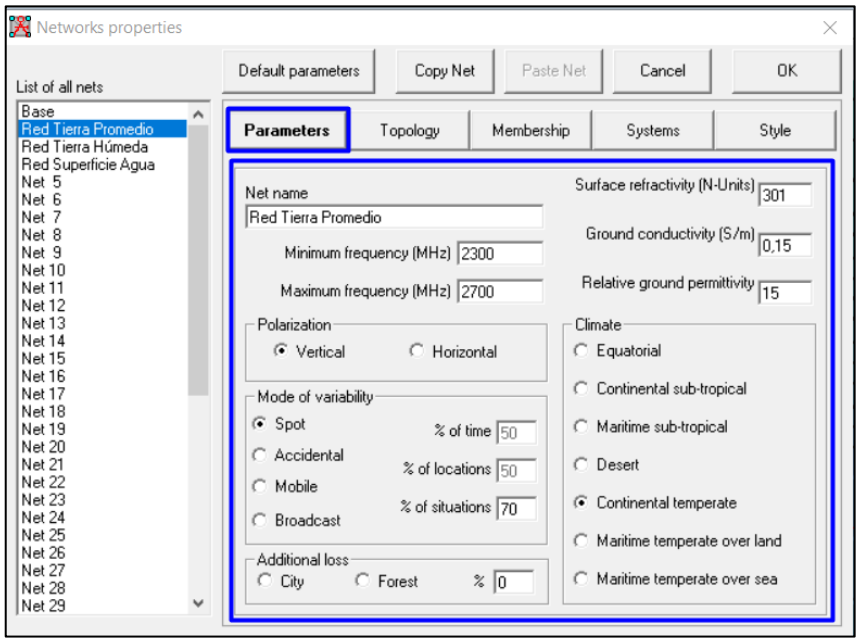


Figura 2.29 Parámetros para tierra promedio

La Figura 2.30 muestra la configuración de los parámetros de red para un entorno de tierra húmeda.

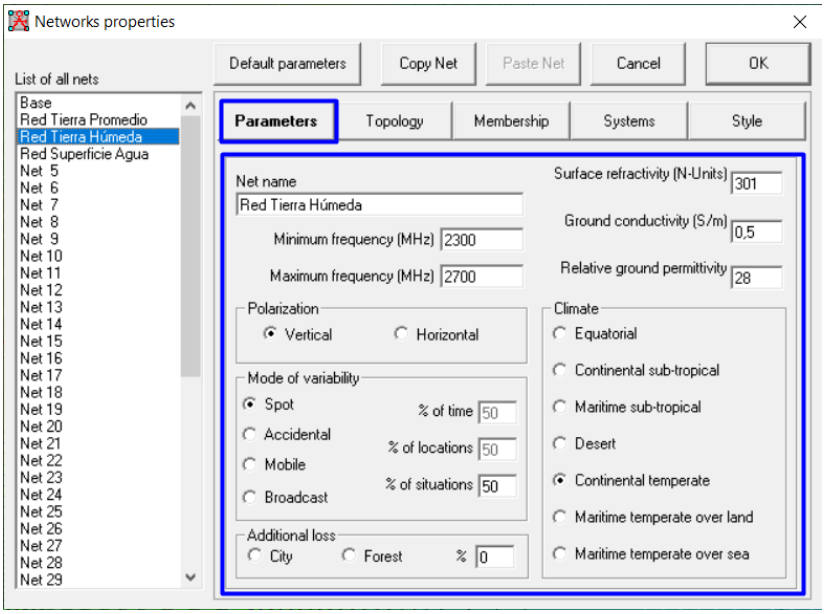


Figura 2.30 Parámetros para tierra húmeda

La Figura 2.31 muestra la configuración de los parámetros de red para un entorno con superficie de agua.

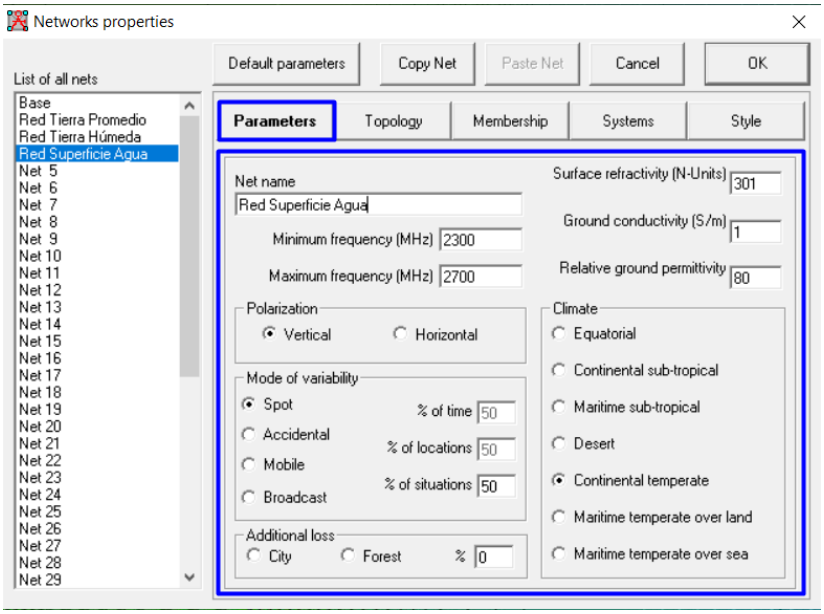


Figura 2.31 Parámetros de la red para superficie de agua

En la opción de sistemas de red visualizada en la Figura 2.32 se ingresan los valores correspondientes a los equipos utilizados en la implementación. Los equipos para el sistema de transmisión y recepción son los mismos, los valores se detallan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Valores de los equipos utilizados

Parámetro	Valor
Ganancia de la antena	24 dBi
Potencia de transmisión	-3 dBm/0,5 mW
Umbral de recepción	-90 dBm
Pérdidas por conectores/cables	2 dB
Tipo de entena	Parabólica
Ganancia antena	24 dBi

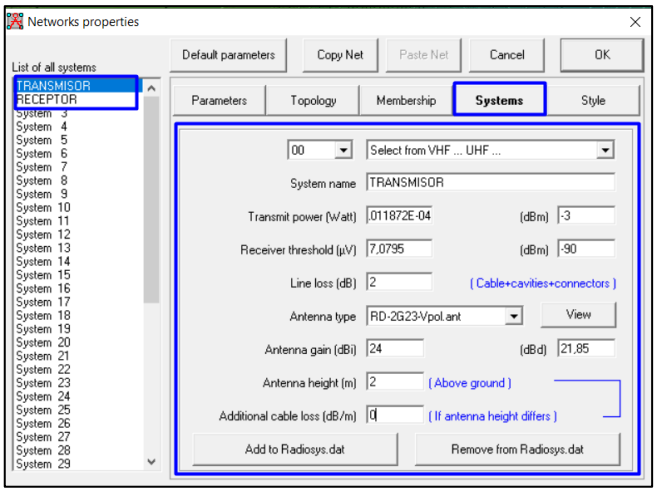


Figura 2.32 Valores para el sistema de la red

En la referencia [34], podemos encontrar los archivos correspondientes a los patrones de radiación de la antena con el nombre de RD-2G23.zip, en la Figura 2.32 observamos que en parámetro tipo de antena esta seleccionado el archivo RD-2G23-Vpol.ant que corresponde al patrón de radiación de la antena RokectDish-2G24 para polarización vertical.

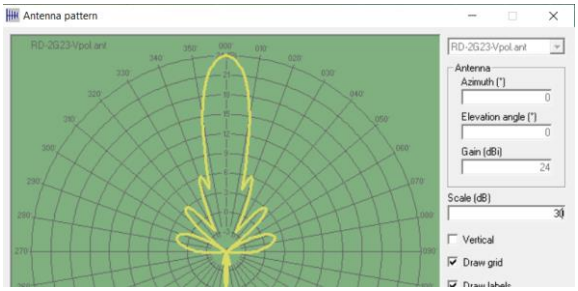


Figura 2.33 Patrón de radiación antena RocketDish2G24

En opción de propiedades de las unidades se ingresan las coordenadas geográficas de los puntos de transmisión y recepción del radioenlace (ver Figura 2.34), una vez ingresada las coordenadas del punto se puede visualizar la elevación en la parte superior derecha de la ventana.

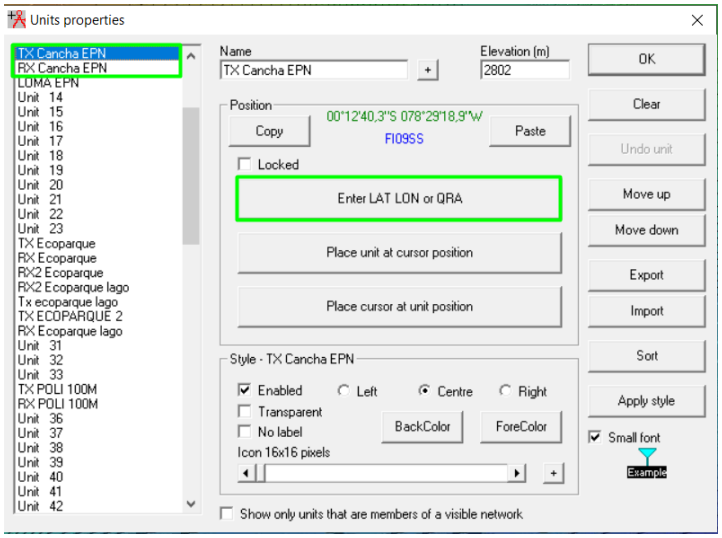


Figura 2.34 Propiedades de las unidades

Las unidades creadas deben asociarse a un rol y a un sistema de trabajo en propiedades de redes. Los miembros de la red están formados por todas las unidades implicadas para en el análisis del radio enlace, como se observa en la Figura 2.35. Las unidades deben estar direccionadas entre sí.

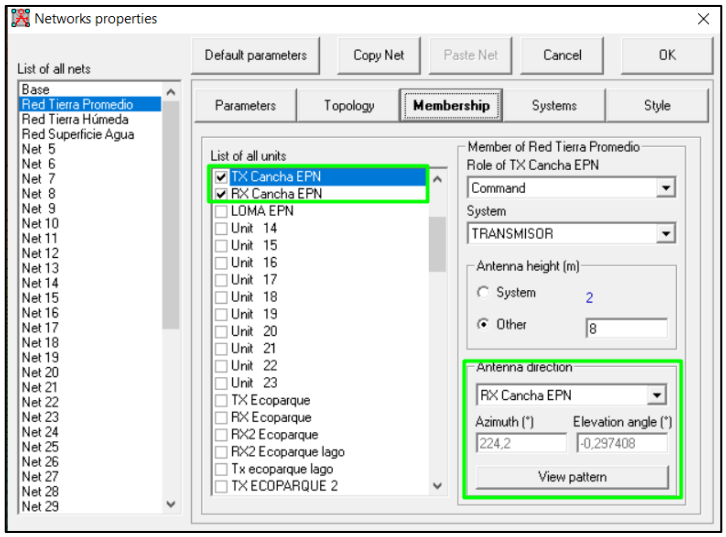


Figura 2.35 Miembros de la red

2.1.3 ENSAMBLADO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN/RECEPCIÓN

La Figura 2.36 muestra los equipos/elementos necesarios para la implementación del sistema de transmisión/recepción:

Figura 2.36 Equipos/elementos para implementación del sistema de transmisión/recepción

El armado del sistema de transmisión y recepción es el mismo, solo cambia la conexión del equipo SDR Adalm Pluto con el foco (ver Figura 2.37).

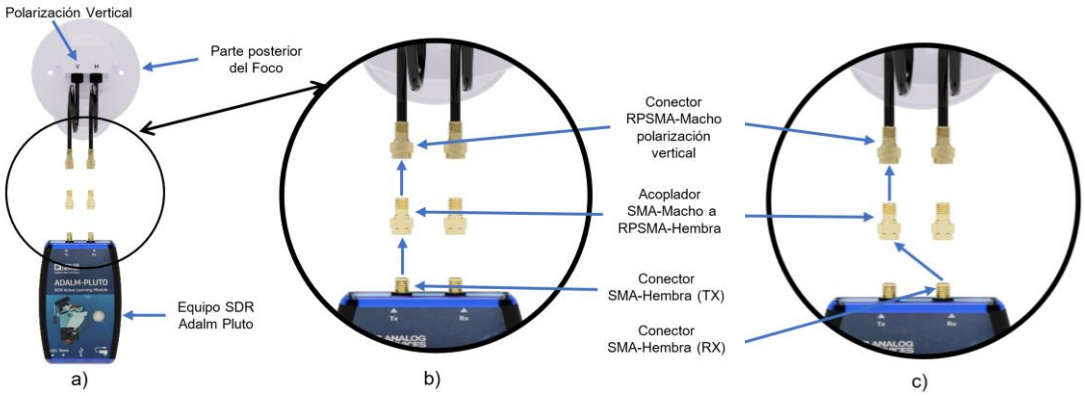


Figura 2.37 a) Vista posterior del foco, b) Ampliación de diagrama de conexión en el sistema de transmisión y c) Ampliación de diagrama de conexión en el sistema de recepción

Sistema de transmisión

Dependiendo de las pruebas que se realizarán, el proceso para la implementación del sistema de transmisión será el siguiente:

- Colocar la antena RocketDish en el mástil a x metros de altura
- Conectar el equipo SDR Adalm Pluto en la polarización vertical como se muestra en la Figura 2.38 (b). El conector TX del equipo transmisor se conecta con su correspondiente acoplador al cable de polarización vertical del foco para tener un sistema half-dúplex, si se conecta el conector RX del equipo transmisor en la polarización horizontal se tiene un sistema full-dúplex.
- Colocar la base de madera a una altura x metros con la ayuda de una escuadra metálica y pernos.
- Colocar la laptop sobre la base de madera.
- Conectar el equipo SDR Adalm Pluto con la laptop utilizando un cable micro USB de 1.5 m de longitud.

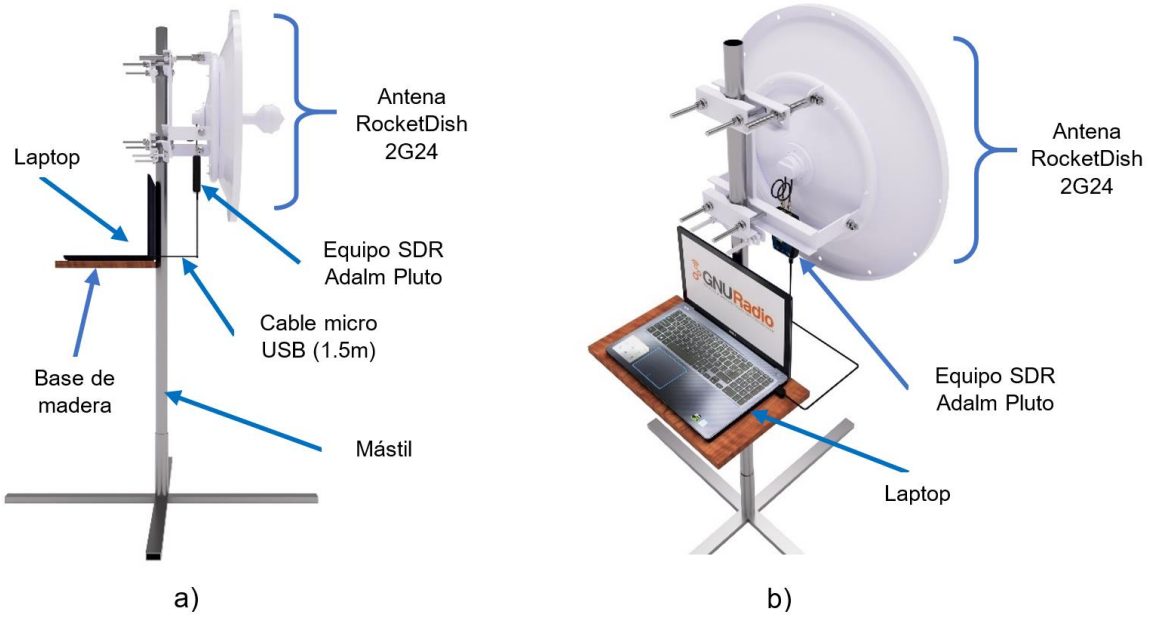


Figura 2.38 a) Vista lateral del sistema implementado y b) Vista isométrica del sistema implementado

Los sistemas que se implementarán corresponderán a un sistema de comunicación half dúplex utilizando polaridad vertical. La Figura 2.38 muestra el modelo del sistema de transmisión y recepción implementado.

Sistema de recepción

Dependiendo de las pruebas que se realizarán, el proceso para la implementación del sistema de recepción será el siguiente:

- Colocar la antena RocketDish en el mástil a x metros de altura

- Conectar el equipo SDR Adalm Pluto en la polarización vertical como se muestra en la Figura 2.38 (c). El conector RX del equipo receptor se conecta con su correspondiente acoplador al cable de polarización vertical del foco para tener un sistema half-dúplex, si se conecta el conector TX del equipo receptor en la polarización horizontal se tiene un sistema full-dúplex.
- Colocar la base de madera a una altura de x metros con la ayuda de una escuadra metálica y pernos.
- Colocar la laptop sobre la base de madera.
- Conectar el equipo SDR Adalm Pluto con la laptop utilizando un cable micro USB de 1,5 m de longitud.

2.2 ESQUEMAS PARA PRUEBAS DE PROPAGACIÓN

2.2.1 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS DE TRANSMISIÓN POR ESPACIO LIBRE

El sistema se implementará en la cancha de la Escuela Politécnica Nacional con una distancia de radioenlace de 50 m, una frecuencia de operación de 2,4 GHz. Para medir las pérdidas por espacio libre, se medirá el pico de potencia a diferentes distancias (1 m, 5 m, 10 m, 20 m, 30 m, y 50 m). Se comparará las diferencias de potencias entre las distancias mencionadas con las diferencias de potencias utilizando la Fórmula 1.6 de pérdidas básicas de espacio libre. La Figura 2.39 muestra el sistema de comunicación con una posición inicial del sistema de recepción y la posición final.

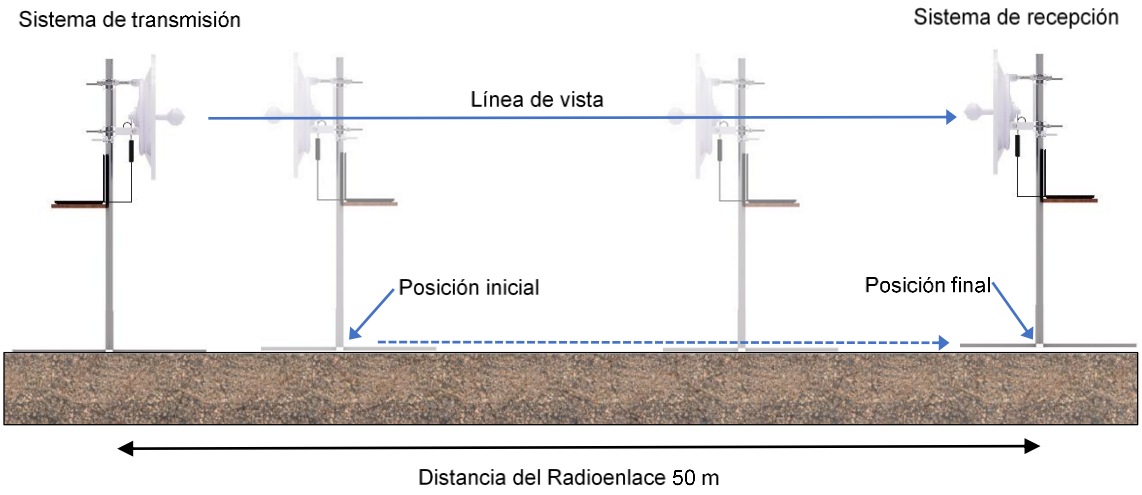


Figura 2.39 Esquema de evaluación de pérdidas por espacio libre

2.2.2 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR ZONA DE FRESNEL

El sistema se implementará en la cancha de la Escuela Politécnica Nacional con una distancia de radioenlace de 100 m, una frecuencia de operación de 2,4 GHz. Para medir las pérdidas debido a obstrucción de la zona de Fresnel, se considerará el ras del piso como un obstáculo y se medirá el incremento de la señal en recepción a medida que se elevan las antenas. La Figura 2.40 muestra el sistema de comunicación con una posición inicial de las antenas a 30 cm sobre el piso, se tiene una línea de vista inicial y una zona de Fresnel inicial obstruida por el suelo (obstáculo), la altura de las antenas se incrementa de 15 cm en 15 cm hasta alcanzar una altura final donde se tenga una zona de Fresnel final libre de obstáculos.

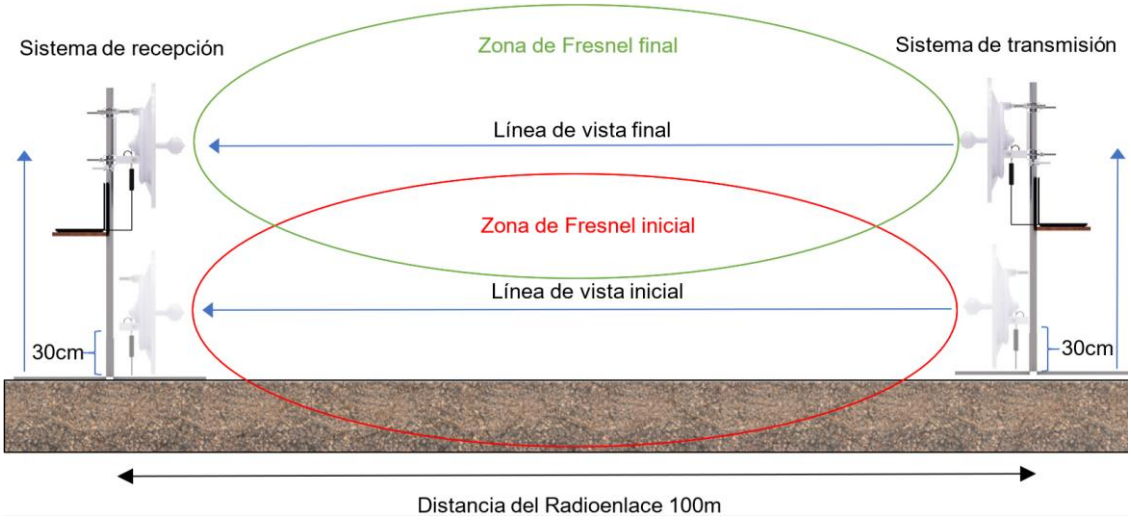


Figura 2.40 Esquema de evaluación de pérdidas debido a obstrucción de la zona de Fresnel

2.2.3 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR APUNTAMIENTO

Los esquemas para la evaluación de pérdidas por apuntamiento son las siguientes: pérdidas por ángulo de azimut y pérdidas por ángulo de elevación. Se utilizará una aplicación de celular para medir los ángulos de elevación y azimut.

2.2.3.1 Evaluación de pérdidas por ángulo de elevación

El sistema se implementará en la cancha de la Escuela Politécnica Nacional con una distancia de radioenlace de 100 m, una frecuencia de operación de 2,4 GHz. Para la evaluación de pérdidas se medirá y registrará durante 10 segundos la potencia de la señal en recepción, durante los 10 segundos se cambiará el ángulo de elevación.

La Figura 2.41 muestra el sistema de comunicación con un ángulo inicial que es 0° y se incrementara el ángulo hasta llegar a la inclinación máxima que nos permita la antena, en la especificación del perno de la antena se puede variar la inclinación entre -10° a 10°, pero en la práctica se puede variar entre -18° a 43°, por lo que la toma de datos se hará hasta los 43° de elevación (se tomará datos continuos).

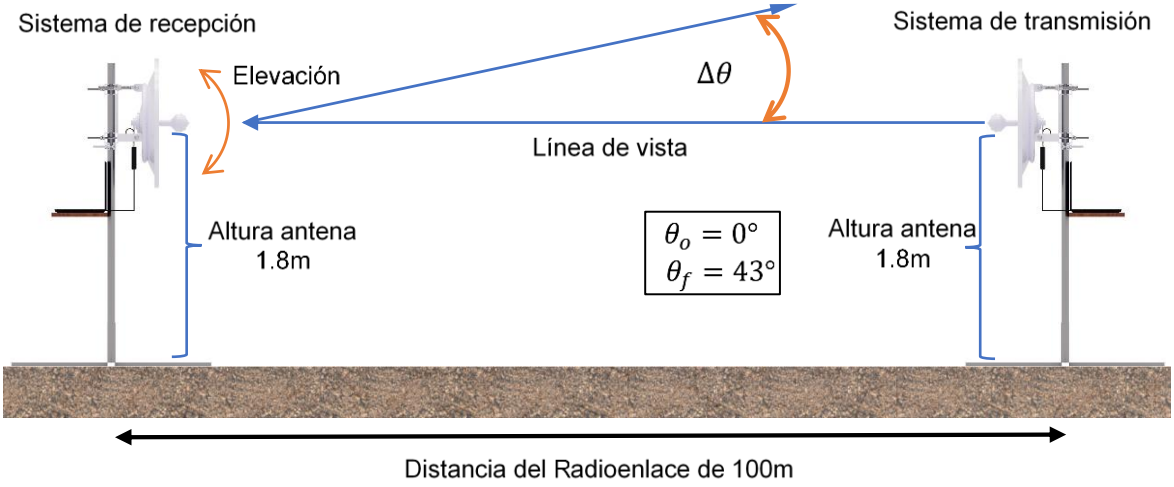


Figura 2.41 Esquema evaluación de pérdidas por ángulo de elevación

2.2.3.2 Evaluación de pérdidas por ángulo de azimut

El enlace se implementará en la cancha de la Escuela Politécnica Nacional con una distancia de radioenlace de 100 m y una frecuencia de operación de 2,4 GHz. Para la evaluación de pérdidas se medirá la potencia de la señal a medida que cambia el ángulo de azimut.

Figura 2.42 Graduador acoplado al mástil

Se utilizó brújulas y un graduador acoplado entre el tubo de hierro y la base de hierro (ver Figura 2.42) para mejorar la precisión en la toma de datos.

La Figura 2.43 muestra un sistema de comunicación con línea de vista y una altura de antenas de 1.8 m para despejar la primera zona de Fresnel. En la toma de datos se medirá y registrará 10 segundos de la potencia de la señal a mediada que cambia el ángulo de azimut, se recolectará datos de forma continua empezando con un ángulo inicial de 0° hasta llegar a los 90°.

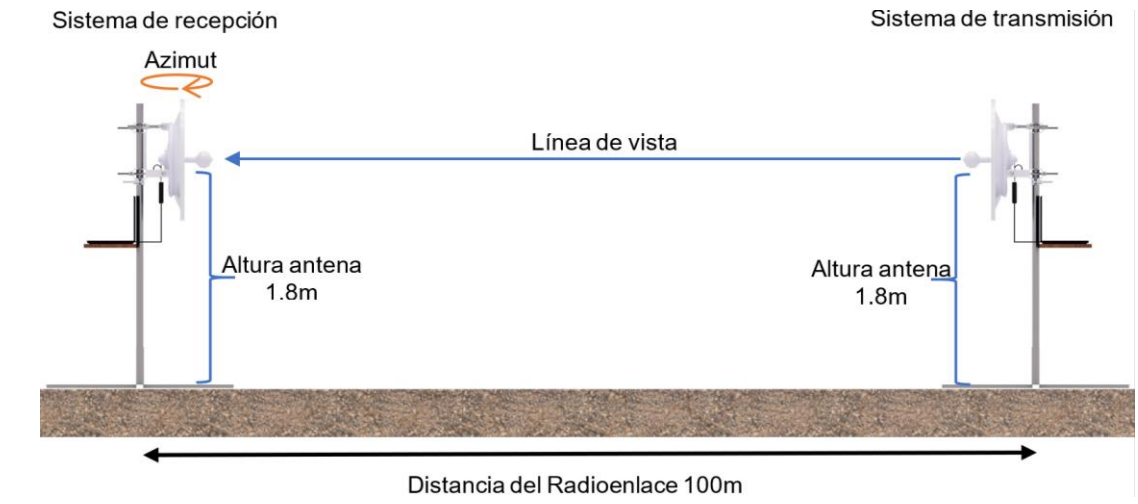


Figura 2.43 Esquema evaluación de pérdidas por ángulo de azimut

2.2.4 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR POLARIZACIÓN

El sistema se implementará en la cancha de la Escuela Politécnica Nacional con una distancia de radioenlace de 100 m y una frecuencia de operación de 2,4 GHz. Para la evaluación de las pérdidas por polarización se medirá la potencia de la señal a medida que se cambia el ángulo de giro del foco. La Figura 2.44 muestra el sistema de comunicación con línea de vista, altura de antenas de 1.8 m y con un ángulo de giro inicial de 0°, la toma de datos será de forma discreta y se hará hasta los 40° con 5° grado de separación (en total se toman 9 de datos).

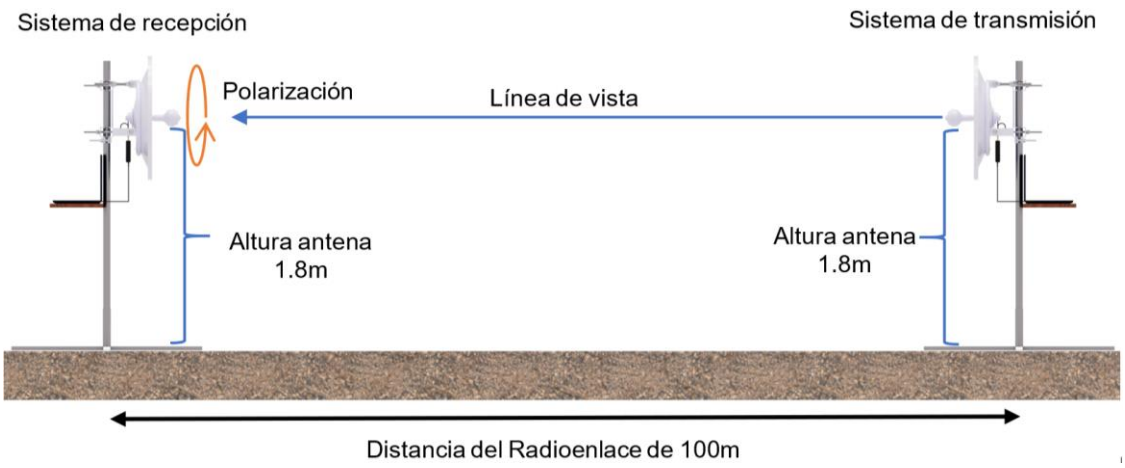


Figura 2.44 Esquema evaluación de pérdidas por polarización

2.2.5 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS POR INFLUENCIA DE TERRENO

2.2.5.1 Tierra promedio

Se instalará un radioenlace de 190 m a lo largo de la cancha de futbol de la Escuela Politécnica Nacional, tendrá línea de vista y altura de antenas de 3 m. Para las pruebas de medición de potencia en recepción se implementará el siguiente esquema de transmisión/recepción:

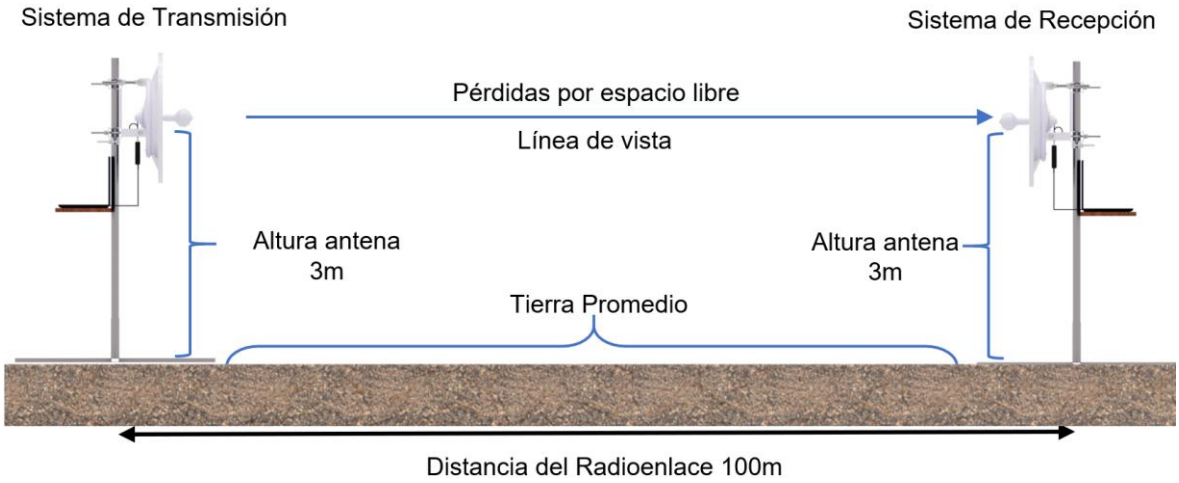


Figura 2.45 Diagrama de conexión del radioenlace

2.2.5.2 Tierra húmeda

Se instalará un radioenlace de 210 m en la zona turística ECOPARQUE cubicado a 7 km de la ciudad de Tulcán, tendrá línea de vista y una altura de antenas de 2,5 m y 1,7 m. Se implementará el siguiente esquema para la medición de potencia en recepción.

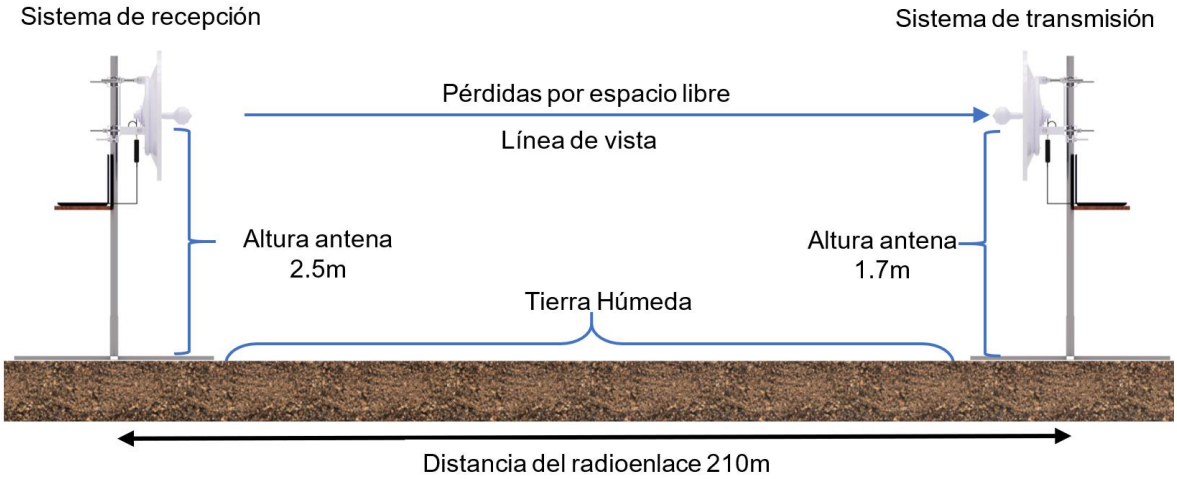


Figura 2.46 Diagrama de conexión del radioenlace

2.2.5.3 Superficie agua

Se instalará un radioenlace de 190 m a lo largo del lago de la zona turística ECOPARQUE ubicado a 7 km de la ciudad de Tulcán, tendrá línea de vista, una altura de antenas de 2,5m y 1,7 m. Se implementará el siguiente esquema para la medición de potencia en recepción.

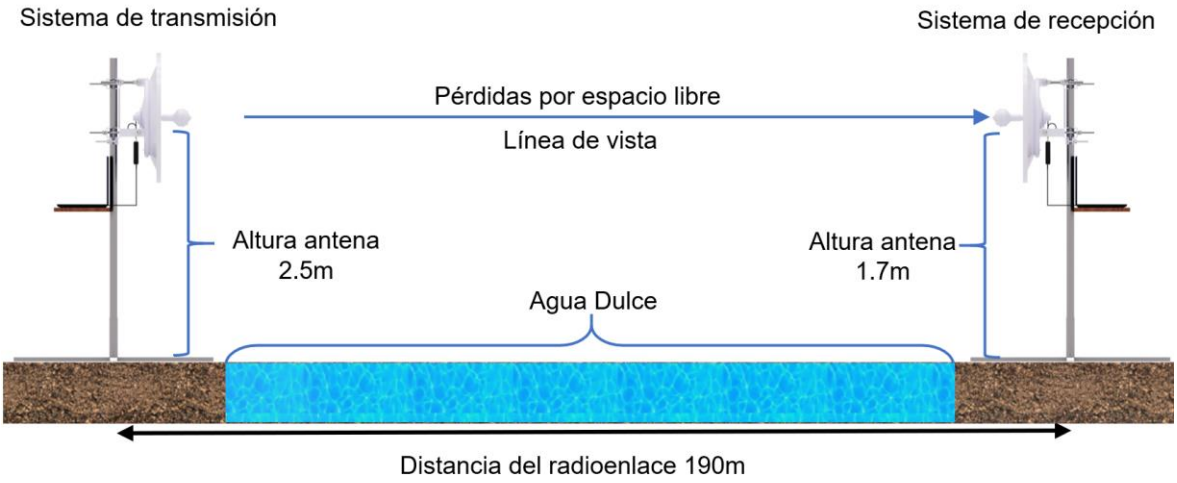


Figura 2.47 Diagrama de conexión del Radioenlace

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos registrados de manera discreta se evaluarán de la siguiente manera:

Como se observa en la Figura 2.32 (a) cada dato registrado será de un segundo y tendrá 2 millones de muestras con un tamaño de 40 MB. Se descartará el primer millón de muestras y los conjuntos válidos se tomarán desde el primer millón de muestras en adelante, se analizarán 10 conjuntos de diez mil muestras cada uno (ver Figura 2.32(b)) que equivale a 100 mil muestras, en cada conjunto se medirá el pico de potencia, y al final se sumarán las potencias de los 10 conjuntos y se realizará un promedio para obtener un pico de potencia por cada archivo.

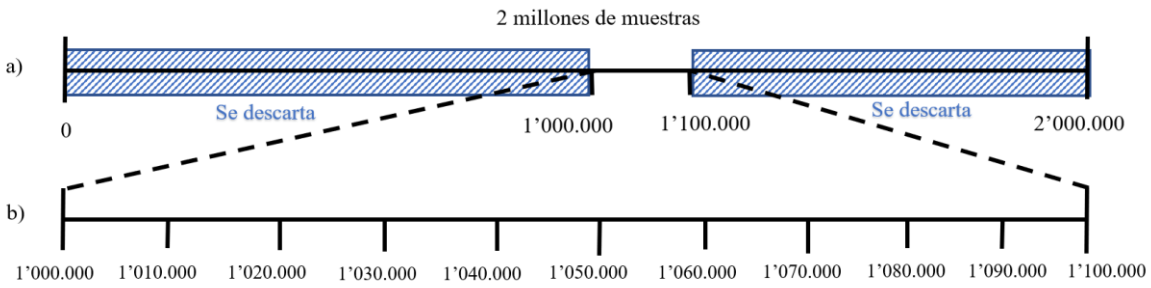


Figura 3.1 Análisis de datos

Los datos registrados de manera continua se evaluarán de la siguiente manera:

El archivo registrado será de máximo 10 segundos de duración y tendrá aproximadamente 20 millones de muestras. Los puntos de potencia registrados se obtendrán analizando cada 10 mil muestras, entonces por cada 20 millones de muestras registrados se podrá obtener 2 mil puntos de potencia de recepción. Se ajustará la escala del eje x según sea el caso a los puntos de potencia válidos para el análisis.

3.1 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS DE TRANSMISIÓN POR ESPACIO LIBRE

Se registraron en total 6 archivos de un segundo de duración que corresponde a la potencia de recepción a las distancias de 4 m, 5 m, 8 m, 10 m, 20 m, 40 m y 100 m.

El siguiente código de Matlab encuentra el promedio del pico de potencia de cada archivo realizando el procedimiento de la Figura 3.1 y se genera la Figura 3.2.

```
%Lectura de datos path loss
%Para esta prueba se trabaja con una frecuencia de operación de 2.4GHz a una
distancia de
%radioenlace de 2 m, 4 m, 5 m, 8 m, 10 m, 20 m, 40 m y 100 m.
clear
close all

num=9e6;          %Número de muestras de los datos (9 millones)
Fs=2.084e6;       %Frecuencia de muestreo
N=10000;          %Número de muestras que se analizarán.
nfft=2;           %Número de puntos FFT
while nfft<N
    nfft=nfft*2; %Cálculo número de puntos necesarios nfft
end
p0=0;             %Variable
w1=[];            %Variable que almacena los promedios de potencias en dB
w2=[];            %Variable que almacena las diferencias de potencias en dB
%d=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 20 21 22 23 25 26 27 28 29 30 31 32 40 41 50 51
52 53 54 75 76 100 101];
%d=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 20 30 40 50 100];
d=[4 5 8 10 20 40 100];   %Distancias que se evaluarán
num_file=length(d);    %Número de archivos a evaluar

for z=1:num_file %Este bucle cambia el archivo que se analiza.
    archivo=['Esp_' num2str(d(z))]; %Nombre del archivo
    A=file_complex(num,archivo); %Lectura de archivo

    %En el archivo (z) se cogen 10 conjuntos de 10mil muestras cada uno
    for q=0:9 %En este bucle se obtiene la potencia de cada conjunto.
        m=10000+10000*q; %tamaño del conjunto (10 mil valores)
        n=10000*q;       %tamaño del conjunto (10 mil valores)
        B=A(4000001+n:4000000+m); %se descarta el primer millón de muestras y se
toman conjutos de 10mil valores
        [a,b]=fx_fft(Fs,nfft,B); %se realiza la fft de la señal
        b=mag2db(b);    %la potencia se transforma en dB.
        p=max(b);       %Se encuentra el pico máximo
        p0=p0+p;        %Se suma con la potencia anterior.
    end
    p0=p0/10;       %se realiza el promedio de potencia
    w1=[w1 p0];     %se guarda el valor de potencia
```

```
    p0=0;            %se reinicia la variable
end
%Se grafica los resultados obtenidos
figure(1)
plot(d,w1);
grid on
title('Potencia (dB) vs Distancia del radioenlace (m)');
xlabel('Distancia del radioenlace (m)');
ylabel('Potencia (dB)');
```

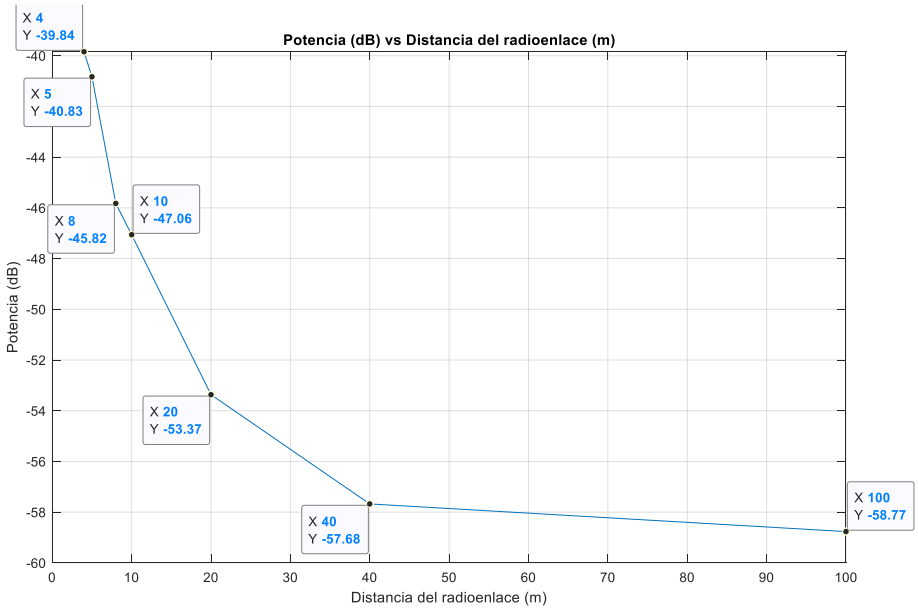


Figura 3.2 Gráfica de Potencia (dB) vs Distancia del radioenlace

En la Figura 3.2 observamos que la potencia de la señal disminuye a medida que se aumenta la distancia del radioenlace, también se observa que las mayores pérdidas se dan en los primeros 40 metros. Para comparar estos resultados con las pérdidas básicas de espacio libre se tomará la diferencia de potencia entre dos puntos. La Tabla 3.1 representa la comparativa de los valores de potencia.

Tabla 3.1 Tabla comparativa de los valores prácticos obtenidos con los valores teóricos de la antena

Datos prácticos								
Distancia (m)	4	8	5	10	10	20	20	40
Potencia (dB)	-39,84	-45,82	-40,83	-47,06	-47,06	-53,37	-53,37	-57,68
Diferencia de potencia (dB)	-5,98		-6,23		-6,31		-4,31	
Datos teóricos								
Distancia (m)	4	8	5	10	10	20	20	40
Pérdida en espacio libre (dB)	-52,045	-58,07	-53,984	-60,004	-60,004	-66,025	-66,025	-72,045
Diferencia de potencia (dB)	-6,0206		-6,0206		-6,0206		-6,0206	

Los datos teóricos de la Tabla 3.1 nos indica que, cuando se duplica la distancia las pérdidas por espacio libre aumentan en -6,0206 dB, en los datos prácticos observamos que en algunos casos se cumple el incremento de -6,0206 dB al duplicar la distancia, y en otros casos no se cumple este incremento de -6,0206 dB como en las distancias de 20 m a 40 m y de 40 m a 100 m, esto podría ser ocasionado por reflexiones en el terreno y también al ser más grande la distancia del radioenlace se necesita mayor precisión en el apuntamiento de las antenas.

3.2 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR ZONA DE FRESNEL

Se registraron 11 archivos de un segundo de duración que corresponde a la potencia en la recepción. El radio de la primera zona de Fresnel es de 1,77 m correspondiente a una distancia de radioenlace de 100 m y una frecuencia de operación de 2,4 GHz. La Unión Internacional de Telecomunicaciones nos dice que basta con despejar el 60% del radio de la primera zona de Fresnel.

El siguiente código de Matlab encuentra el promedio del pico de potencia de cada archivo realizando el procedimiento de la Figura 3.1 y se genera la Figura 3.3

```
%Lectura_datos_zona_Fresnel
%Para esta prueba se trabaja con una frecuencia de operación de 2,4 GHz a
una distancia de radioenlace de 100m
clear
close all

num=2e6;          %Número de muestras de los datos (2 millones)
Fs=2e6;           %Frecuencia de muestreo
N=10000;          %Número de muestras que se analizarán.
nfft=2;           %Número de puntos FFT
while nfft<N
    nfft=nfft*2; %Cálculo número de puntos necesarios nfft
end

p0=0;             %Variable
w1=0;             %Variable que almacena los promedios de potencias en dB
w2=0;             %Variable que almacena los promedios de potencias en dB
i=9;              %Variable que indica el número de conjuntos a evaluar
num_file=10;      %Número de archivos a evaluar

for z=0:num_file %Este bucle cambia el archivo que se analiza.
    archivo=['Fresnel_' num2str(z)];
    A=file_complex(num,archivo);

    %En el archivo (z) se cogen 10 conjuntos de 10 mil muestras cada uno
    for q=0:9 %En este bucle se obtiene la potencia de cada conjunto.
        m=10000+10000*q; %tamaño del conjunto (10 mil valores)
        n=10000*q;       %tamaño del conjunto (10 mil valores)
        B=A(1000001+n:1000000+m); %se descarta el primer millón de
muestras y se toman conjutos de 10 mil valores
        [a,b]=fx_fft(Fs,nfft,B); %se realiza la fft de la señal
        b=mag2db(b);    %la potencia se transforma en dB.
```

```
        p=max(b);        %Se encuentra el pico máximo
        p0=p0+p;         %Se suma con la potencia anterior.
    end
    p0=p0/10;        %se realiza el promedio de potencia
    w1=[w1 p0];      %se guarda el valor de potencia
    w2=[p0 w2];      %se guarda el valor de potencia
    p0=0;            %se reinicia la variable
end

%Se grafica los resultados obtenidos
figure(1)
a=0:num_file;                        %Se grafica los 11 valores
plot(a*15+30,w1(2:num_file+2));      %Se ajusta la escala para mostrar la
distancia en centímetros
grid on
title('Potencia (dB) vs altura');
xlabel('Altura');
ylabel('Potencia (dB)');

function x=file_complex(fs,file_name)
a=fopen(file_name, 'rb');            %Se abre el archivo
v=fread(a,[2,fs],'float');           %Se toman los datos
fclose (a);
x = v(1,:) + v(2,:)*1i;
```

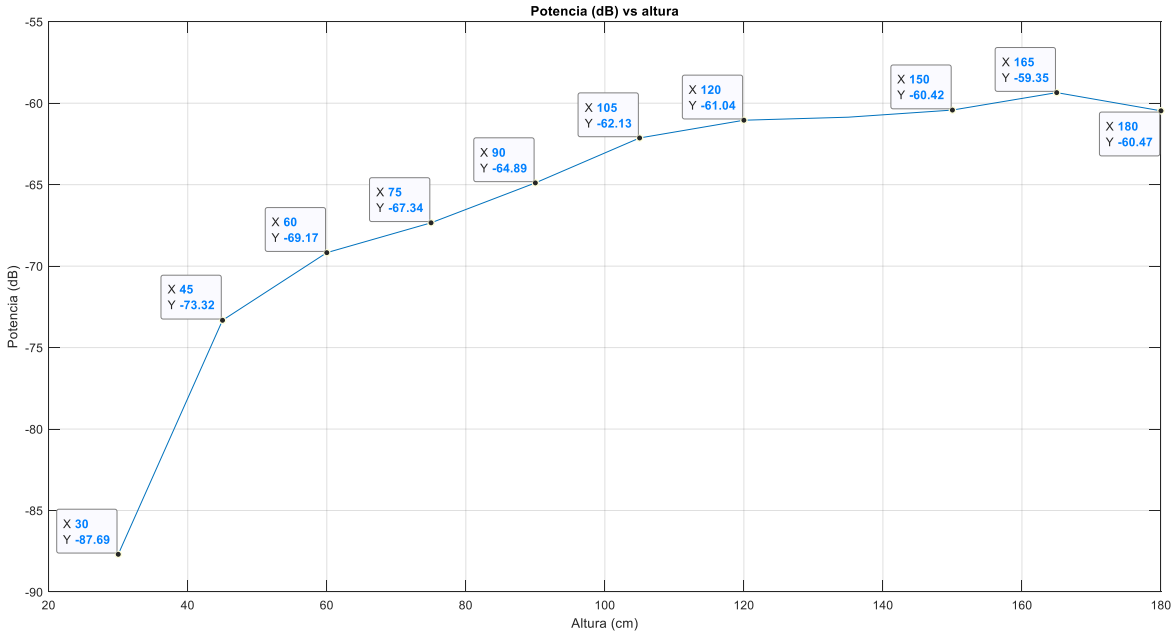


Figura 3.3 Gráfica de Potencia (dB) vs Distancia (cm) para Zona de Fresnel

En la Figura 3.3 observamos que al tener la antena a una altura inicial de 30 cm se tiene una potencia de recepción muy baja de -87,69 dB, este resultado se debe a que mitad de la primera zona de Fresnel se encuentra obstruida con el ras del piso. A medida que se aumenta la altura de la antena se empieza a despejar la zona de Fresnel y potencia de recepción aumenta, al incrementar la altura de las antenas en 15 cm se obtiene un nivel de potencia igual a -73,32 dB que es un incremento de 14,37 dB con respecto a la potencia

inicial obtenida. La potencia máxima es de -59,35 dB y se logra con una altura de antenas igual a 165 cm (la teoría nos dice que se debe despejar 1,77 m). La recomendación de la ITU nos dice que se debe despejar el 60% de la primera zona de Fresnel para garantizar la comunicación del radioenlace, en este caso se debería despejar 106,2 cm de la zona de Fresnel. En la Gráfica observamos que a 105 cm se tiene una potencia igual a -62,13 dB, este valor se diferencia en 2,78 dB del pico máximo obtenido.

La mayor cantidad de pérdidas por obstrucción de la primera zona de Fresnel se tiene cuando la altura de la antena esta al ras de piso, y es causado por que una gran cantidad de energía se pierde debido al obstáculo. Debido a la obstrucción de la mitad de la zona de pérdidas se llegó a obtener 28,34 dB de atenuación. La potencia inicial incrementa rápidamente 14,37dB solo con elevar la antena 15 cm de la posición inicial, y a partir de la altura de 45 cm el incremento de potencia es más lento.

3.3 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR APUNTAMIENTO

3.3.1 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS POR ÁNGULO DE ELEVACIÓN

Se registró 10 segundos de la potencia medida en la recepción a medida que se cambió el ángulo de elevación, se almacenó la información en 1 archivo y se tiene alrededor de 20 millones de muestras en el archivo.

El siguiente código de Matlab encuentra el pico de potencia de cada 10 mil muestras del archivo registrado, se genera la Figura 3.4.

```
% Lectura de datos continuos para ángulo de elevación
%Para esta prueba se trabaja con una frecuencia de operación de 2.4GHz a
una distancia de radioenlace de 100m
clear
close all

num=20e6;        %Número de muestras de los datos (20 millones)
Fs=2e6;          %Frecuencia de muestreo
N=10000;         %Número de muestras
nfft=2;
while N>nfft
    nfft=nfft*2; %Cálculo número de puntos necesarios nfft
end

w1=[];           %Variable que almacena los promedios de potencias en dB
w2=[];           %Variable que almacena los promedios de potencias en dB
archivo='Elev'; %Nombre del archivo
A=file_complex(num,archivo); %Lectura del archivo
siz=length(A);
arc=floor(siz/10000);        %Número de puntos a evaluar

    for q=0:arc-1 %En este bucle se obtiene la potencia de cada conjunto.
        m=10000*q; %tamaño del conjunto (10 mil valores)
        n=10000*q; %tamaño del conjunto (10 mil valores)
```

```
        B=A(1+n:10000+m); %se descarta el primer millón de muestras y se
toman conjuntos de 10mil valores
        [a,b]=fx_fft(Fs,nfft,B); %se realiza la fft de la señal
        b=mag2db(b);     %la potencia se transforma en dB.
        p=max(b);        %Se encuentra el pico máximo
        w1=[w1 p];      %se guarda el valor de potencia
        w2=[p w2];      %se guarda el valor de potencia
     end
%Se grafica los resultados obtenidos en coordenadas rectangulares
figure(1)
a=0:arc-1;
plot(a,w1);
grid on
title('Potencia (dB) vs ángulo');
xlabel('Ángulo');
ylabel('Potencia (dB)');
```

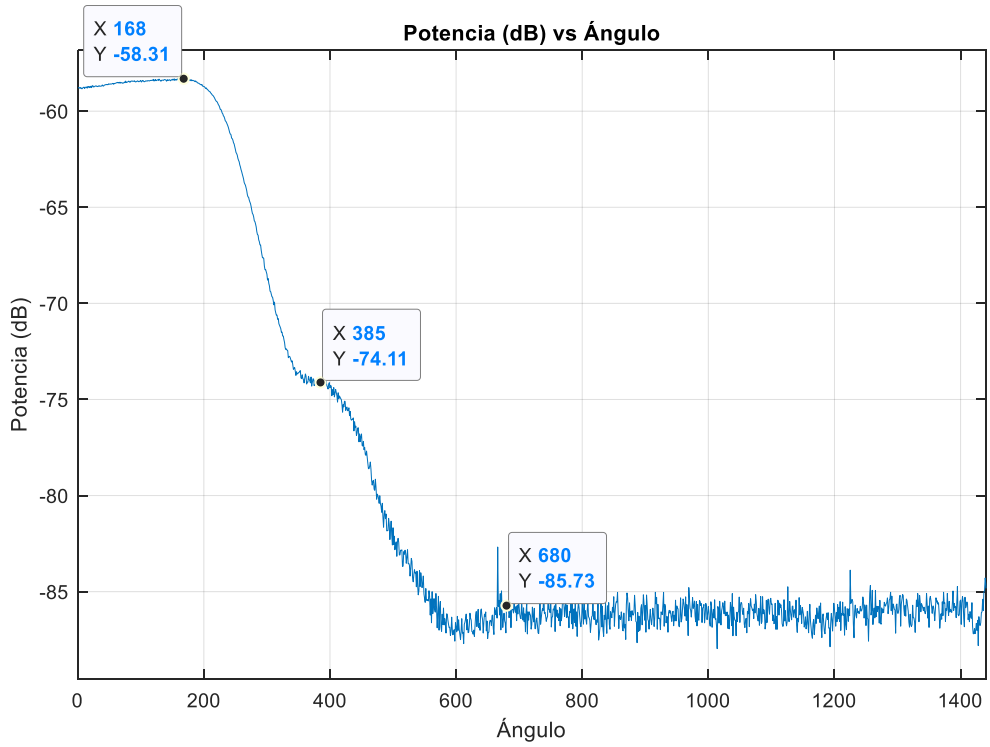


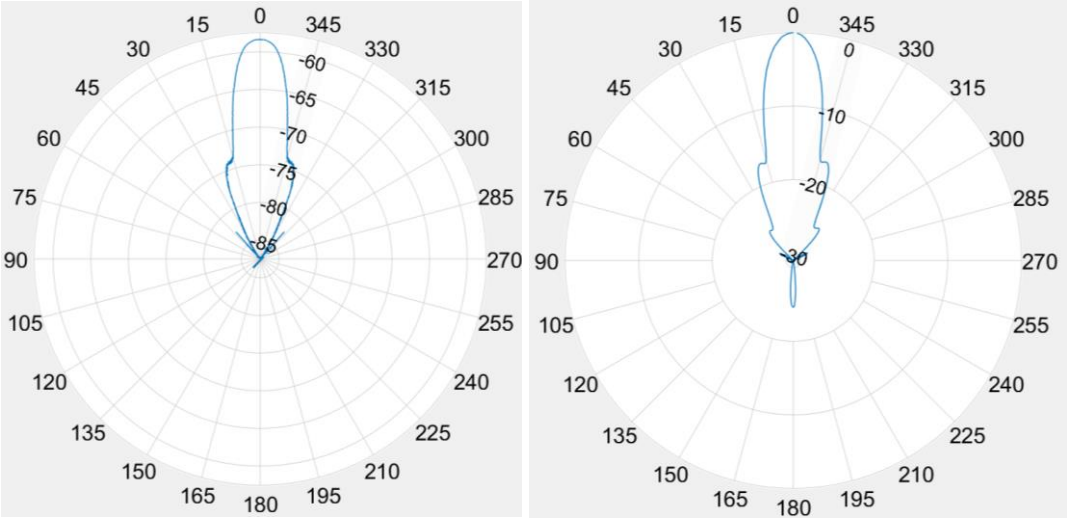
Figura 3.4 Gráfica de resultados de Potencia(dB) vs Ángulo de Elevación

En la Figura 3.4 se observa que se tiene alrededor de 1400 puntos de potencia y la parte de la gráfica que nos interesa está comprendido entre los puntos 168 y 680 que corresponden al momento en el que se empezó a variar el ángulo de elevación.

Se observa que existe algunos picos máximos en los puntos 168 y 385, estos picos máximos corresponderían a los lóbulos de radiación de la antena, entonces para visualizar mejor los datos, se construye el patrón de radiación de la antena copiando los mismos valores de potencia del eje positivo del ángulo de elevación hacia el eje negativo del ángulo de elevación.

En la reconstrucción de la parte izquierda del patrón de radiación se utiliza los valores de potencia comprendida entre los puntos 168 a 680 y se emplea el siguiente código para generar la Figura 3.5.

```
% Lectura de datos continuos para ángulo de elevación
%Para esta prueba se trabaja con una frecuencia de operación de 2.4GHz a
una distancia de radioenlace de 100m
clear
close all

num=20e6;        %Número de muestras de los datos (20 millones)
Fs=2e6;          %Frecuencia de muestreo
N=10000;         %Número de muestras
nfft=2;
while N>nfft
    nfft=nfft*2; %Cálculo número de puntos necesarios nfft
end

w1=[];           %Variable que almacena los promedios de potencias en dB
w2=[];           %Variable que almacena los promedios de potencias en dB
archivo='Elev'; %Nombre del archivo
A=file_complex(num,archivo); %Lectura del archivo
siz=length(A);
arc=floor(siz/10000);        %Número de puntos a evaluar

    for q=0:arc-1 %En este bucle se obtiene la potencia de cada conjunto.
        m=10000*q; %tamaño del conjunto (10 mil valores)
        n=10000*q; %tamaño del conjunto (10 mil valores)
        B=A(1+n:10000+m); %se descarta el primer millón de muestras y se
toman conjuntos de 10mil valores
        [a,b]=fx_fft(Fs,nfft,B); %se realiza la fft de la señal
        b=mag2db(b);     %la potencia se transforma en dB.
        p=max(b);        %Se encuentra el pico máximo
        w1=[w1 p];      %se guarda el valor de potencia
        w2=[p w2];      %se guarda el valor de potencia
     end

%Se grafica los resultados obtenidos en coordenadas rectangulares
figure(1)
a=0:arc-1;
plot(a,w1);
grid on
title('Potencia (dB) vs ángulo');
xlabel('Ángulo');
ylabel('Potencia (dB)');

%Se construye el patrón de radiación
lim1=168;   %Límite superior
lim2=680;   %Límite inferior
w10=w1(lim1:lim2); %Valores del eje positivo
w20=w2(arc-lim2:arc-lim1); %Valores del eje negativo
w=[w20 w10]; %Se obtiene el patrón reconstruido

%Forma Polar
figure(3)
ang=-43:86/(length(w)-1):43; %Ángulos en grados (-43 a 43)
polarpattern(ang,w);
```



a) b)

Figura 3.5 a) Patrón de radiación práctico del plano de elevación y b) Patrón de radiación teórico del plano de elevación

En la Figura 3.5 (a) se observa de manera clara el lóbulo principal y un lóbulo secundario de la antena. Al comparar la Figura 3.5 (a) con el patrón de radiación de la Figura 3.5 (b) de la antena RocketDish 2G24, nos damos cuenta de que la forma es muy parecida, tanto el lóbulo primario y el lóbulo secundarios. La empresa Ubiquiti proporciona los valores del patrón de radiación de sus antenas [34], por lo que se desarrolla la Tabla 3.2 que compara los valores teóricos con los valores prácticos obtenidos.

Tabla 3.2 Tabla comparativa de los valores prácticos obtenidos con los valores teóricos de la antena

Valores teóricos		Valores prácticos			
Ángulo	Potencia (dB) normalizada	Ángulo	Potencia (dB)	Potencia (dB) normalizada	%error
0	0	0	-58,4	0	-
5	-2	5	-59,98	-1,58	21
10	-8,3	10	-66,79	-8,39	1,08
20	-17,1	20	-74,87	-16,47	3,68
30	-25,2	30	-83,62	-25,22	0,08

Observando la Tabla 3.2, concluimos que los ángulos de algunos valores prácticos corresponden a los valores de potencia de la antena por lo que tienen un porcentaje de error bajo, pero también hay un valor de potencia que concuerda, pero el error es algo alto.

3.3.2 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS POR ÁNGULO DE AZIMUT

Se registró 10 segundos de la potencia medida en la recepción a medida que se cambió el ángulo de elevación, se almacenó la información en 1 archivo y se tiene alrededor de 20 millones de muestras en el archivo.

El siguiente código de Matlab encuentra el pico de potencia de cada 10 mil muestras del archivo registrado, se genera la Figura 3.6.

```
% Lectura de datos continuos para ángulo de azimut
%Para esta prueba se trabaja con una frecuencia de operación de 2.4GHz a
una distancia de
%radioenlace de 100m
clear
close all

num=20e6;        %Número de muestras de los datos (20 millones)
Fs=2e6;          %Frecuencia de muestreo
N=10000;         %Número de muestras
nfft=2;

while N>nfft
    nfft=nfft*2; %Cálculo número de puntos necesarios nfft
end

w1=[];           %Variable que almacena los promedios de potencias en dB
w2=[];           %Variable que almacena los promedios de potencias en dB
archivo='Azimuth_continuo2'; %Nombre del archivo
A=file_complex(num,archivo); %Lectura del archivo
siz=length(A);
arc=floor(siz/10000);        %Número de puntos a evaluar

     for q=0:arc-1 %En este bucle se obtiene la potencia de cada
conjunto.
        m=10000*q; %tamaño del conjunto (10 mil valores)
        n=10000*q; %tamaño del conjunto (10 mil valores)
        B=A(1+n:10000+m); %se descarta el primer millón de muestras y se
toman conjuntos de 10mil valores
        [a,b]=fx_fft(Fs,nfft,B); %se realiza la fft de la señal
        b=mag2db(b);    %la potencia se transforma en dB.
        p=max(b);       %Se encuentra el pico máximo
        w1=[w1 p];     %se guarda el valor de potencia
        w2=[p w2];     %se guarda el valor de potencia
     end
%Se grafica los resultados obtenidos en coordenadas rectangulares
figure(1)
a=0:arc-1;
plot(a,w1);
grid on
title('Potencia (dB) vs ángulo');
xlabel('Ángulo');
ylabel('Potencia (dB)');
```

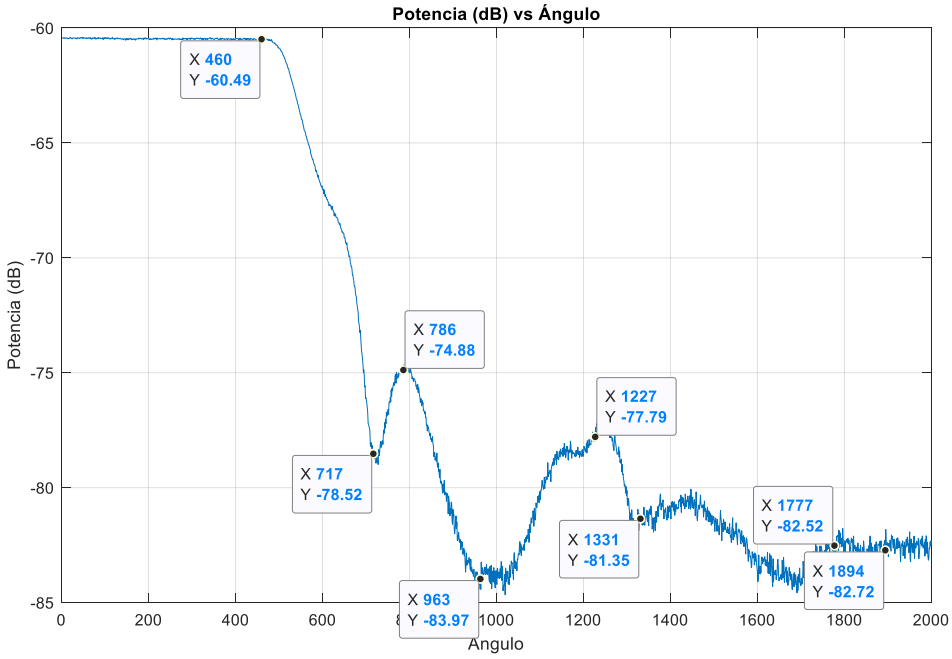


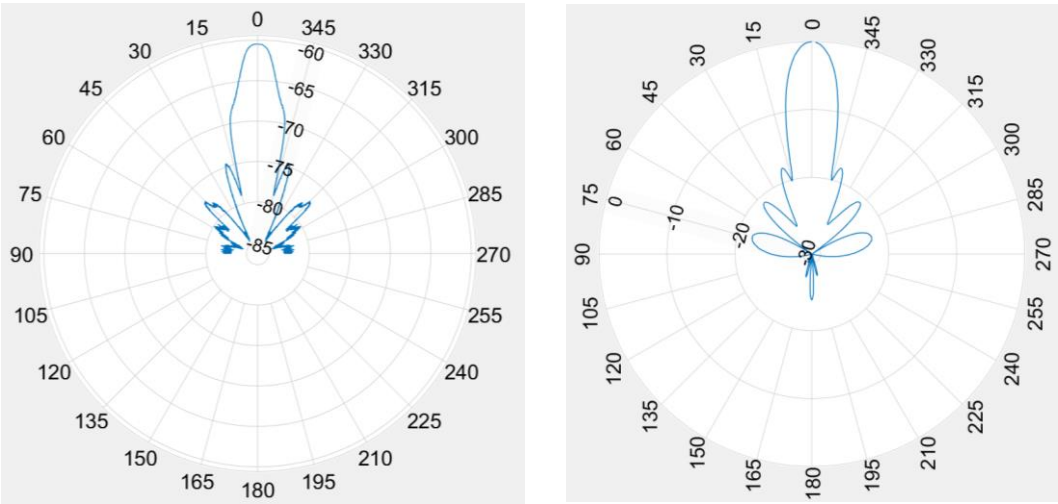
Figura 3.6 Resultados Potencia(dB) vs Ángulo de Azimut

En la Figura 3.6 se observa que se tiene alrededor de 2000 puntos de potencia y la parte de la gráfica que nos interesa está comprendido entre los puntos 460 a 2000 que corresponden al momento en el que se empezó a variar el ángulo de azimut. Se observa que existe algunos picos máximos en 460, 786, 1227, y existen algunos picos mínimos en 717, 963 y 1331, estos picos máximos y mínimos corresponderían a los lóbulos de radiación de la antena, entonces para visualizar mejor los datos, se construye el patrón de radiación de la antena copiando los mismos valores de potencia del eje positivo del ángulo de azimut hacia el eje negativo del ángulo de azimut.

En la reconstrucción de la parte izquierda del patrón de radiación se utiliza los valores de potencia comprendida entre los puntos 460 a 2000 y se emplea el siguiente código para generar la Figura 3.7.

```
% Lectura de datos continuos para ángulo de azimut
%Para esta prueba se trabaja con una frecuencia de operación de 2.4GHz a
una distancia de radioenlace de 100m
clear
close all

num=20e6;        %Número de muestras de los datos (20 millones)
Fs=2e6;          %Frecuencia de muestreo
N=10000;         %Número de muestras
nfft=2;
while N>nfft
    nfft=nfft*2; %Cálculo número de puntos necesarios nfft
end
```

```
w1=[];           %Variable que almacena los promedios de potencias en dB
w2=[];           %Variable que almacena los promedios de potencias en dB
archivo='Azimuth_continuo2'; %Nombre del archivo
A=file_complex(num,archivo); %Lectura del archivo
siz=length(A);
arc=floor(siz/10000);        %Número de puntos a evaluar

for q=0:arc-1 %En este bucle se obtiene la potencia de cada conjunto.
        m=10000*q; %tamaño del conjunto (10 mil valores)
        n=10000*q; %tamaño del conjunto (10 mil valores)
        B=A(1+n:10000+m); %se descarta el primer millón de muestras y se
toman conjuntos de 10mil valores
        [a,b]=fx_fft(Fs,nfft,B); %se realiza la fft de la señal
        b=mag2db(b);    %la potencia se transforma en dB.
        p=max(b);       %Se encuentra el pico máximo
        w1=[w1 p];     %se guarda el valor de potencia
        w2=[p w2];     %se guarda el valor de potencia
     end

%Se construye el patrón de radiación
lim1=460;   %Límite superior
lim2=1999;   %Límite inferior
w10=w1(lim1:lim2); %Valores del eje positivo
w20=w2(arc-lim2:arc-lim1); %Valores del eje negativo
w=[w20 w10]; %Se obtiene el patrón reconstruido

%Forma Polar
figure(3)
ang=-90:180/(length(w)-1):90; %Ángulos en grados (-90 a 90)
polarpattern(ang,w);
```



a) b)

Figura 3.7 a) Patrón de radiación práctico del plano de azimut y b) Patrón de radiación teórico del plano de azimut

En la Figura 3.7 (a) se observa de manera clara el lóbulo principal y los lóbulos secundarios de la antena. Al comparar la Figura 3.7 (a) con el patrón de radiación de la Figura 3.7 (b) de la antena RocketDish 2G24 nos damos cuenta de que la forma es muy parecida, tanto

el lóbulo primario y los lóbulos secundarios, pero visualmente falta un lóbulo secundario en la Figura 3.7 (a). La empresa Ubiquiti proporciona los valores del patrón de radiación de sus antenas [34], por lo que, se desarrolla la Tabla 3.2 que compara los valores teóricos con los valores prácticos obtenidos.

Tabla 3.3 Tabla comparativa de los valores prácticos obtenidos con los valores teóricos de la antena

Lóbulos	Valores teóricos		Valores prácticos			
	Ángulo	Potencia (dB) normalizada	Ángulo	Potencia (dB)	Potencia (dB) normalizada	% error
Principal	0	0	0	-60,49	0	-
	15	-20,20	15	-78,52	-18,03	10,74
Secundario	19	-17,9	19	-74,88	-14,39	19,6
	29	-26,30	29	-83,97	-23,48	10,72
Secundario	43	-20,9	43	-77,79	-17,3	17,22
	57	-24,70	57	-81,35	-20,86	15,54
Secundario	75	-22,20	75	-82,52	-22,03	0,76
	85	-23,9	85	-82,7	-22,2	7,11

La Tabla 3.2 muestra los valores de los lóbulos principales, secundarios, entre otros. Observando los valores teóricos, concluimos que los valores prácticos de potencia normalizada y ángulos prácticos se acercan bastante a los valores teóricos de los ángulos y de las potencias normalizadas. En la Figura 3.7 (a) se puede observar que el patrón de radiación es similar al patrón de radiación teórico observado en la Figura 3.7 (b).

3.4 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR POLARIZACIÓN

Se registraron en total 9 archivos de un segundo de duración que corresponde a la potencia de recepción para ángulos de giro comprendidos entre 0° a 40°.

El siguiente código de Matlab encuentra el promedio del pico de potencia de cada archivo realizando el procedimiento de la Figura 3.1 y genera la Figura 3.8.

```
%Lectura_datos_polarización
%Para esta prueba se trabaja con una frecuencia de operación de 2,4 GHz a
una distancia de radioenlace de 100 m
clear
close all
num=2e6;          %Número de muestras de los datos (2 millones)
Fs=2.084e6;       %Frecuencia de muestreo
N=10000;          %Número de muestras que se analizarán.
nfft=2;           %Número de puntos iniciales FFT
while nfft<N
    nfft=nfft*2; %Cálculo número de puntos finales nfft
end
p0=0;             %Variable
w1=0;             %Variable que almacena los promedios de potencias en dB
```

```
w2=0;            %Variable que almacena los promedios de potencias en dB
i=9;             %Variable que indica el número de conjuntos a evaluar
arc=8;          %Número de archivos a evaluar

for z=0:arc %Este bucle cambia el archivo que se analiza.
    archivo=['Polarizacion_' num2str(z*5)];
    A=file_complex(num,archivo);
    %En el archivo (z) se cogen 10 conjuntos de 10mil muestras cada uno
    for q=0:9 %En este bucle se obtiene la potencia de cada conjunto.
        m=N+N*q; %tamaño del conjunto (10 mil valores)
        n=N*q;       %tamaño del conjunto (10 mil valores)
        B=A(1000001+n:1000000+m); %se descarta el primer millón de
muestras y se toman conjutos de 10mil valores
        [a,b]=fx_fft(Fs,nfft,B); %se realiza la fft de la señal
        b=mag2db(b);    %la potencia se transforma en dB.
        p=max(b);       %Se encuentra el pico máximo
        p0=p0+p;        %Se suma con la potencia anterior.
    end
    p0=p0/10;       %se realiza el promedio de potencia
    w1=[w1 p0];     %se guarda el valor de potencia
    w2=[p0 w2];     %se guarda el valor de potencia
    p0=0;           %se reinicia la variable
end
%Se grafica los resultados obtenidos
a=0:arc;
plot(a*5,w1(2:arc+2));
grid on
title('Potencia (dB) vs Ángulo Polarización ');
xlabel('Ángulo Polarización');
ylabel('Potencia (dB)');
```

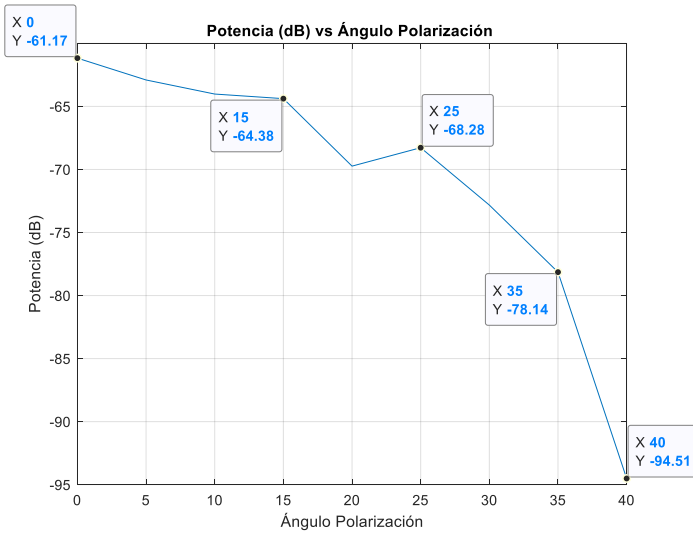


Figura 3.8 Resultados Potencia(dB) vs Ángulo de Polarización

En la Figura 3.8 observamos que el pico máximo es de -61,17 dB cuando el ángulo polarización es 0°, el pico mínimo de potencia es -94,51 dB y se obtiene a los 40°. Se observa también que solo con girar 40° la polarización de la antena ya se tiene una atenuación de 33,34 dB, es decir que, a 40° la polarización ya mismo alcanza el factor XPD que es de 35 dB.

3.5 EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS POR INFLUENCIA DEL TERRENO

3.5.1 TIERRA PROMEDIO

Se realizó la medición de potencia en recepción a lo largo de la cancha de futbol de la Escuela Politécnica Nacional entre los puntos “TX EPN” y “RX EPN” observados en la Figura 3.9

Figura 3.9 Cancha de fútbol de la Escuela Politécnica Nacional

En la Figura 3.9 se observa el marcador de color verde “TX EPN” en la posición (-0,211184 -78,48859), a 190 metros de distancia en el lado izquierdo se observa el marcador verde “RX EPN” en la posición (-0,212433 -78,4898), en estas posiciones se instaló los sistemas de transmisión y recepción respectivamente.

a)

b)

Figura 3.10 a) Sistema transmisión “TX EPN” b) Sistema de recepción “RX EPN”

3.5.1.1 Medición de potencia

Para medir la intensidad de potencia (dB) se utilizó el espectrograma disponible en las librerías de GNU Radio y se obtiene el siguiente resultado:

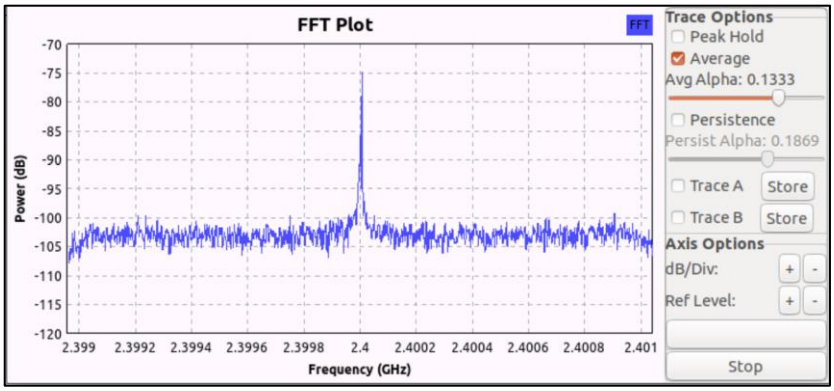


Figura 3.11 Potencia recibida en GNU Radio

En la figura 3.11 se observa que el pico de potencia recibido tiene un valor de alrededor de -75 dB o -45 dBm.

3.5.1.2 Simulación del Radioenlace en Radio Mobile

Al ingresar las posiciones de los puntos de transmisión (TX EPN) y recepción (RX EPN) en el programa de Radio Mobile se observa que la elevación del punto de transmisión es de 2 802 m y la elevación del punto de recepción es de 1 798 m, se tiene una diferencia de altura de 4 m entre el punto de transmisión y recepción. Al ejecutar la simulación con estas alturas se tiene el siguiente resultado:

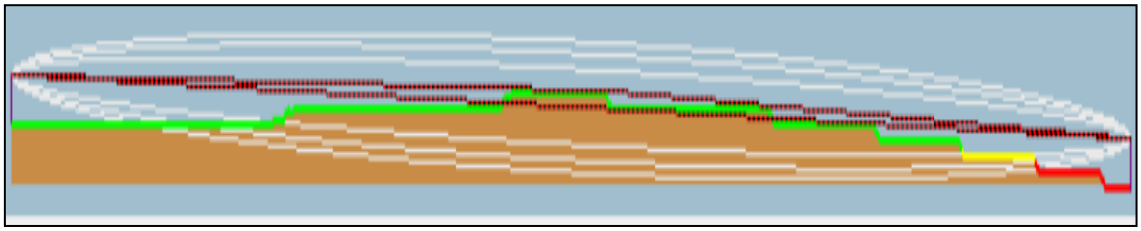


Figura 3.12 Perfil Topográfico Cancha EPN

El perfil topográfico observado en la Figura 3.12 no concuerda con el perfil topográfico real de la cancha de futbol de la Escuela Politécnica Nacional, por esta razón en la simulación se observa que no hay línea de vista por un obstáculo en el trayecto. Se conoce que en el radioenlace no hay dicho obstáculo porque los puntos de transmisión y recepción están ubicados en lomas de 4 a 6 metros de altura y en medio de la trayectoria hay una cancha de fútbol. En la Figura 3.12 se observa también que la elevación del punto de recepción

está muy abajo con respecto al punto de transmisión, por lo que se optará en agregar una altura adicional en el punto de recepción para compensar este error.

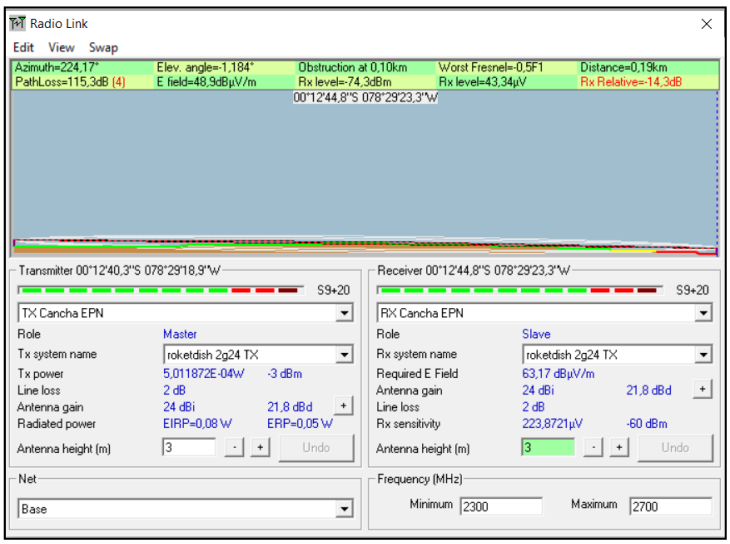


Figura 3.13 Simulación radioenlace 190 m en cancha fútbol EPN

En la Figura 3.13 se observa que la potencia del radioenlace es de -74,3 dBm, es una potencia muy baja debido al obstáculo que hay en el trayecto.

Figura 3.14 Loma de la Tribuna de la Cancha de Fútbol EPN

Para superar esta dificultad se considera agregar una elevación adicional a los puntos de transmisión y recepción con el fin de evitar el obstáculo, para esto, primero se toma en cuenta la elevación de la loma de la tribuna de la cancha de la EPN como la elevación del punto de recepción debido a que se encuentran visualmente a la misma elevación, la elevación de la Loma de la tribuna es de 2 805 m, y se conoce que la elevación del punto de transmisión es de 2 802 m, entonces el punto de recepción es más alto que el de

transmisión y se tiene una diferencia de 3 metros entre estos puntos (mantener esta diferencia de altura nos ayudará a calcular el ángulo de elevación de las antenas). Finalmente, en el programa de Radio Mobile añadimos una altura de 5 metros aparte de los 3 metros del mástil y se tiene en cuenta que el punto de recepción es más alto que el punto de transmisión y también que la diferencia entre estos puntos sea de 3 metros.

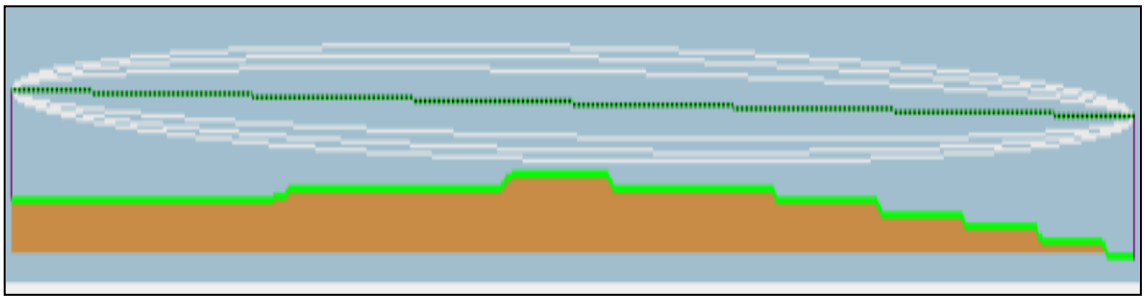


Figura 3.15 Zona de Fresnel Despejada

Aplicando los cambios anteriores tenemos una zona de Fresnel despejada tal y como se observa en la Figura 3.15.

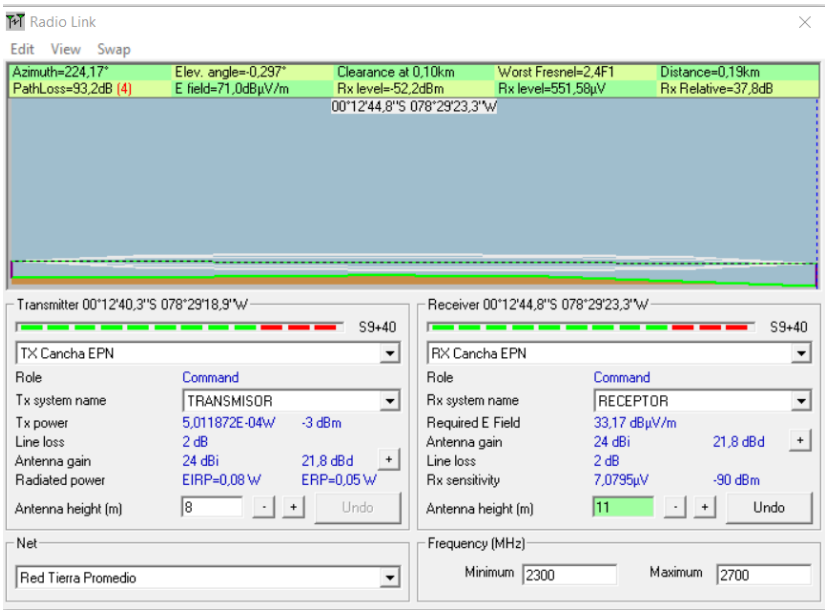


Figura 3.16 Simulación del Radioenlace

En la Figura 3.16 observamos que se recibe una potencia de -52,2 dBm a 190 m utilizando una frecuencia de operación de 2,4 GHz.

3.5.1.3 Cálculo Teórico

En la Tabla 3.4 se detallan los datos utilizados en los siguientes cálculos.

Tabla 3.4 Datos radioenlace tierra promedio

Parámetro	Valor
Frecuencia de operación	2,4 GHz
Permitividad Relativa	15
Conductividad	0,015 S/m
Distancia Radioenlace	190 m
Altura antena transmisora	8 m
Altura antena receptora	11 m

El radio máximo de la primera zona de Fresnel es:

$$r = 17.32\sqrt{\frac{d}{4 * f}} = 17.32\sqrt{\frac{0.19}{4 * 2.4}} = 2{,}43\ m$$

Las pérdidas básicas por espacio libre son:

$$L_{bf} = 32{,}4 + 20\log(f_{Mhz}) + 20\log(d_{Km})$$

$$L_{bf} = 32{,}4 + 20\log(2400) + 20\log(0{,}190) = 32{,}4 + 67{,}6 - 14{,}42 = 85{,}58\ dB$$

$$L_{bf} = 85{,}58dB$$

Las pérdidas por exceso son:

$$L_{ex} = -10log(1 + 2|R|cos(\Delta + B) + |R|^2) = 0{,}2974\ dB$$

$$L_b = 85{,}58\ dB + 0{,}2974\ dB = 85{,}877\ dB$$

En el presupuesto de enlace se tiene las siguientes variables:

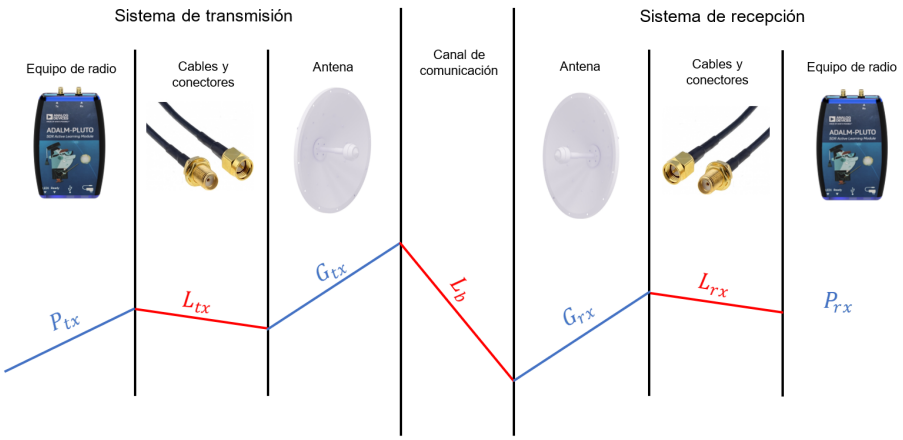


Figura 3.17 Variables del presupuesto del radioenlace

Datos:

Potencia del transmisor:	Ptx=-3 dBm
Pérdidas por conectores en el sistema transmisor:	Ltx=2 dB
Pérdidas por conectores en el sistema de recepción:	Lrx=2 dB
Ganancia antena transmisora:	Gtx=24 dBi
Ganancia antena receptora:	Grx=24 dBi
Pérdidas básicas:	Lp=85,87 dB

$$Prx = Ptx + Gtx(dBi) - Ltx - Lp - Lrx + Grx(dBi)$$

$$Prx = -3\ dBm + 24\ dBi - 2\ dB - 85.87\ dB + -2\ dB + 24\ dBi$$

$$Prx = -44{,}87\ dBm$$

Se espera una potencia en el receptor de -44,87 dBm.

La Tabla 3.5 muestra un resumen de los valores de potencia obtenidos en recepción.

Tabla 3.5 Resumen de valores de potencia en recepción

Potencia en recepción (dBm)			% error	
Práctico	Simulado	Teórico	Simulado	Teórico
-45	-52,2	-44,87	16	0,29

Usando GNU Radio obtenemos un valor de potencia practico de -45 dB, en la simulación del radioenlace tenemos un valor de 52,2 dBm, y mediante la aplicación de la teoría tenemos un valor de -44,87 dBm. Se observa que hay un error del 16 % con respecto a los datos simulados y un error del 0,29 % con respecto a los datos obtenidos teóricamente.

3.5.2 TIERRA HÚMEDA

Se realizó la medición de potencia en recepción entre los puntos “TX ECOPARQUE” y “RX1 ECOPARQUE” observados en la Figura 3.18.

Figura 3.18 ECOPARQUE (Tulcán)

El marcador “TX ECOPARQUE” se encuentra en la posición (0,822312 -77,76627), a 210 metros de distancia se encuentra el marcador “RX ECOPARQUE” en la posición (0,8206297 -77,76716), en estos puntos se instaló los sistemas de transmisión y recepción respectivamente.

a) b)

Figura 3.19 a) Sistema de Transmisión “TX ECOPARQUE” a) Sistema Recepción “RX ECOPARQUE”

3.5.2.1 Medición de Potencia

Para la medición de la potencia (dB) se utilizó el espectrograma disponible en las librerías de GNU Radio y se obtiene el siguiente resultado:

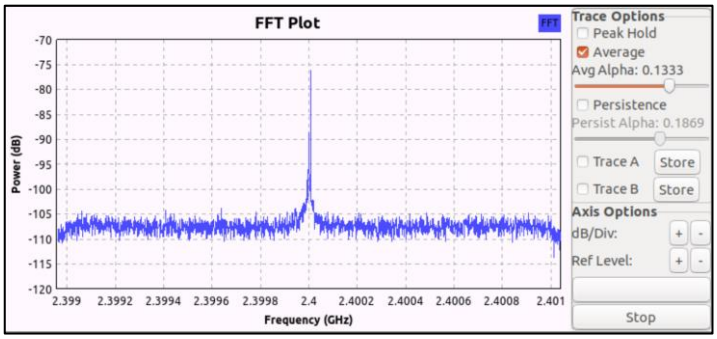


Figura 3.20 Potencia recibida en GNU Radio

En la figura 3.20 se observa que el pico de potencia recibido tiene un valor de alrededor de -76 dB o -46 dBm.

3.5.2.2 Simulación del radioenlace en Radio Mobile

La Figura 3.21 muestra el perfil topográfico del radioenlace, se observa que la primera zona de Fresnel se encuentra despejada.

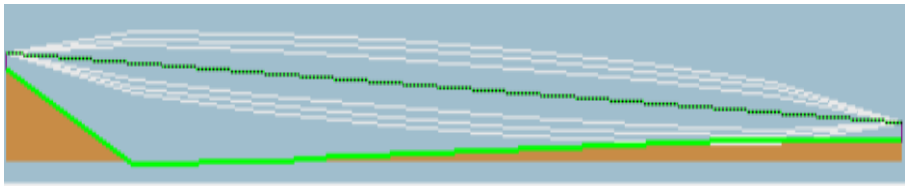


Figura 3.21 Perfil topográfico radioenlace

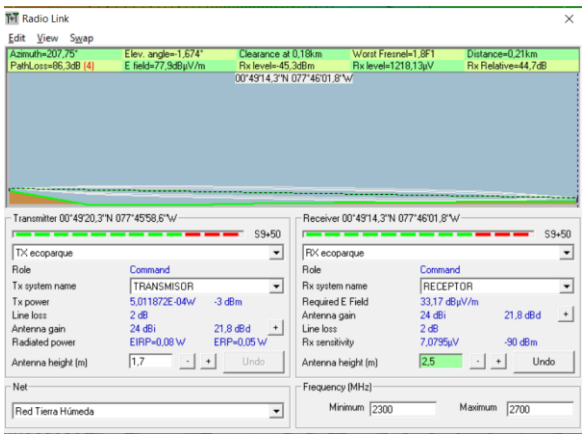


Figura 3.22 Simulación radioenlace 210 m tierra húmeda

En la Figura 3.22 observamos que se recibe una potencia de -45,3dBm.

3.5.2.3 Cálculo teórico

En la Tabla 3.6 se detallan los datos utilizados en los siguientes cálculos.

Tabla 3.6 Datos radioenlace tierra promedio

Parámetro	Valor
Frecuencia de operación	2,4 GHz
Permitividad Relativa	28
Conductividad	0,5 S/m
Distancia Radioenlace	210 m
Altura antena transmisora	8,7 m
Altura antena receptora	2.5 m

El radio máximo de la primera zona de Fresnel es:

$$r = 17{,}32\sqrt{\frac{d}{4 * f}} = 17{,}32\sqrt{\frac{0{,}21}{4 * 2{,}4}} = 2{,}56\ m$$

Las pérdidas básicas por espacio libre son:

$$L_{bf} = 32{,}4 + 20\log(f_{Mhz}) + 20\log(d_{Km})$$

$$L_{bf} = 32{,}4 + 20\log(2400) + 20\log(0{,}210) = 32{,}4 + 67{,}6 - 13{,}55 = 86{,}45\ dB$$

Las pérdidas por exceso son:

$$L_{ex} = -10log(1 + 2|R|cos(\Delta + B) + |R|^2) = -3{,}54\ dB$$

$$L_b = 86{,}45\ dB - 3{,}54\ dB = 82{,}91\ dB$$

En el presupuesto de enlace se tiene las siguientes variables:

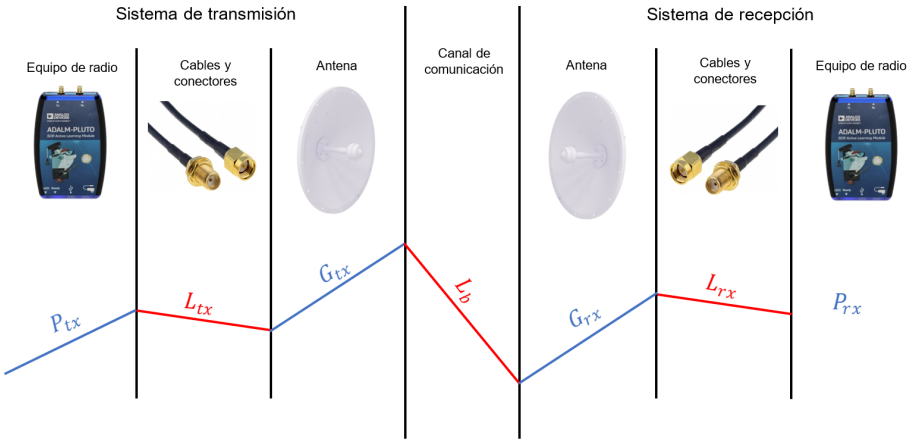


Figura 3.23 Variables del presupuesto del radioenlace

Datos:

Potencia del transmisor:	Ptx= -3 dBm
Pérdidas por conectores en el sistema transmisor:	Ltx= 2 dB
Pérdidas por conectores en el sistema de recepción:	Lrx= 2 dB
Ganancia antena transmisora:	Gtx= 24 dBi
Ganancia antena receptora:	Grx= 24 dBi
Pérdida por espacio libre:	Lb= 82,91 dB

$$Prx = Ptx + Gtx(dBi) - Ltx - Lb - Lrx + Grx(dBi)$$
$$Prx = -3\ dBm + 24\ dBi - 2\ dB - 82{,}91\ dB - 2\ dB + 24\ dBi$$

$$Prx = -41{,}91\ dBm$$

Se espera una potencia en el receptor de -41,91 dBm.

La Tabla 3.7 muestra un resumen de los valores de potencia obtenidos en recepción.

Tabla 3.7 Resumen de valores de potencia en recepción

Potencia en recepción (dBm)			% error	
Práctico	Simulado	Teórico	Simulado	Teórico
-46	-45,3	-41,91	1,52	8,89

Usando GNU Radio se obtiene un valor de potencia de -46 dBm, en la simulación del radioenlace se tiene un valor de 45,3 dBm, y mediante la aplicación de la teoría tenemos un valor de -41,91 dBm. Se observa que hay un error del 1,52 % con respecto a los datos simulados y un error del 8,89 % con respecto a los datos obtenidos teóricamente.

3.5.3 SUPERFICIE AGUA

Se realizó la medición de potencia en recepción entre los puntos “TX LAGO” y “RX LAGO” que se observa en la Figura 3.24 con una distancia de radioenlace de 190 m.

Figura 3.24 ECOPARQUE (Tulcán)

El marcador “TX LAGO” se encuentra en la posición (0,821813 -77,76298), a 190 metros de distancia se encuentra el marcador “RX LAGO” en la posición (0,8203278 -77,76206), en estos puntos se instaló los sistemas de transmisión y recepción respectivamente.

a) b)

Figura 3.25 a) Sistema de Transmisión “TX LAGO” a) Sistema Recepción “RX LAGO”

3.5.3.1 Medición de potencia

Para la medición de la intensidad de potencia (dB) utilizamos el espectrograma disponible en las librerías de GNU Radio y se obtiene el siguiente resultado:

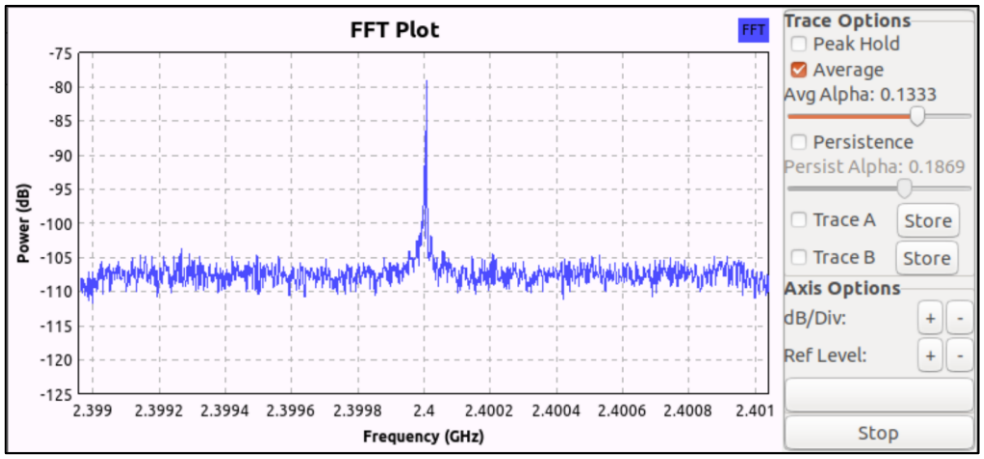


Figura 3.26 Potencia recibida en GNU Radio

En la Figura 3.26 se observa que el pico de potencia recibido tiene un valor de alrededor de -79 dB o -49 dBm.

3.5.3.2 Simulación del Radioenlace en Radio Mobile

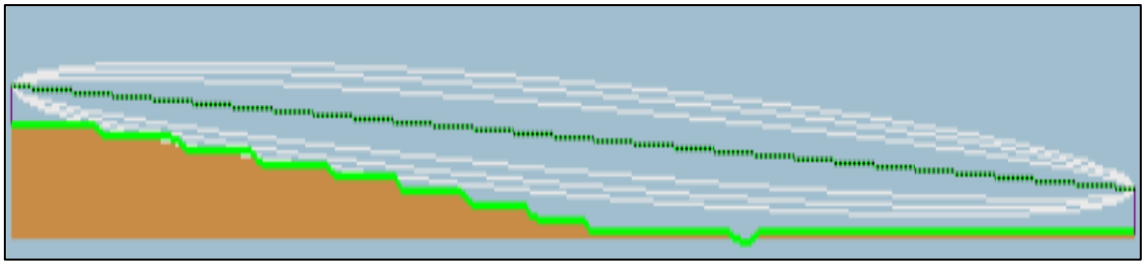


Figura 3.27 Perfil topográfico

En el perfil topográfico de la Figura 3.33 observamos que hay obstáculo en el lado del transmisor, pero en la realidad no hay un obstáculo tan grande, el lago donde se hizo la prueba es un lago artificial y el perfil no concuerda del todo, a pesar del obstáculo la primera zona de Fresnel está despejada.

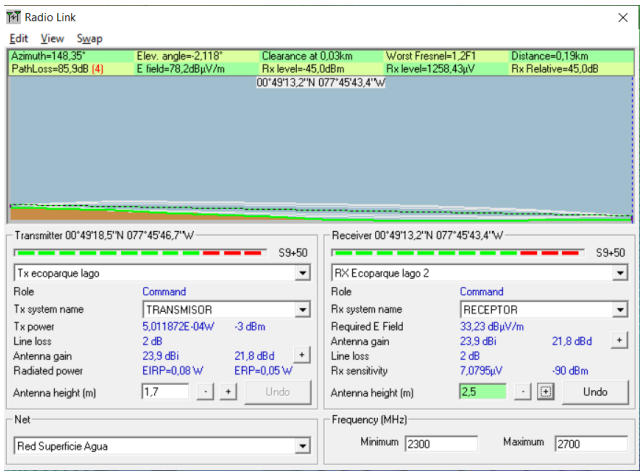


Figura 3.28 Simulación radioenlace 190 m superficie agua

En la Figura 3.28 se observa que la potencia del radioenlace recibida es de -45 dBm.

3.5.3.3 Cálculo teórico

En la Tabla 3.8 se detallan los datos utilizados en los siguientes cálculos.

Tabla 3.8 Datos radioenlace tierra promedio

Parámetro	Valor
Frecuencia de operación	2,4 GHz
Permitividad Relativa	80
Conductividad	1 S/m
Distancia Radioenlace	190 m
Altura antena transmisora	9,7 m
Altura antena receptora	2,5 m

El radio máximo de la primera zona de Fresnel es:

$$r = 17{,}32\sqrt{\frac{d}{4 * f}} = 17{,}32\sqrt{\frac{0.19}{4 * 2{,}4}} = 2{,}43\ m$$

Las pérdidas básicas por espacio libre son:

$$L_{bf} = 32{,}4 + 20\log(f_{Mhz}) + 20\log(d_{Km})$$

$$L_{bf} = 32{,}4 + 20\log(2400) + 20\log(0{,}190) = 32{,}4 + 67{,}6 - 14{,}42 = 85{,}58\ dB$$

$$L_{bf} = 85{,}58\ dB$$

Las pérdidas por exceso son:

$$L_{ex} = -10log(1 + 2|R|cos(\Delta + B) + |R|^2) = -1{,}62\ dB$$

$$L_b = 85{,}58\ dB - 1{,}62\ dB = 83{,}96\ dB$$

En el presupuesto de enlace se tiene las siguientes variables:

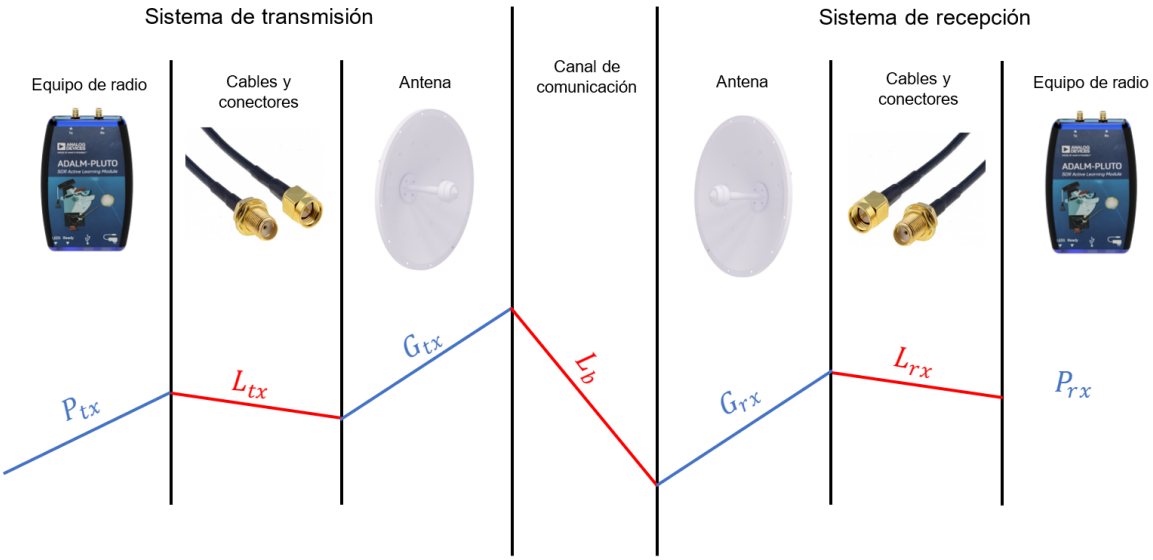


Figura 3.29 Variables del presupuesto del radioenlace

Datos:

Potencia del transmisor:	Ptx= -3 dBm
Pérdidas por conectores en el sistema transmisor:	Ltx= 2 dB
Pérdidas por conectores en el sistema de recepción:	Lrx= 2 dB
Ganancia antena transmisora:	Gtx= 24 dBi
Ganancia antena receptora:	Grx= 24 dBi

Pérdidas básicas: Lp= 83,96 dB

$$Prx = Ptx + Gtx(dBd) - Ltx - Lp - Lrx + Grx(dBd)$$
$$Prx = -3\ dBm + 24\ dBi - 2\ dB - 83{,}96\ dB - 2\ dB + 24\ dBi$$

$$Prx = -42{,}96\ dBm$$

Se espera una potencia en el receptor de -42,96 dBm.

La Tabla 3.8 muestra un resumen de los valores de potencia obtenidos en recepción.

Tabla 3.9 Resumen de valores de potencia en recepción

Potencia en recepción (dBm)			% error	
Práctico	Simulado	Teórico	Simulado	Teórico
-49	-45	-42,96	8,16	12,32

Usando GNU Radio se obtiene un valor de potencia de -49 dBm, en la simulación del radioenlace se tiene un valor de -45 dBm, y mediante la aplicación de la teoría tenemos un valor de -42,96 dBm. Se observa que hay un error del 8,16 % con respecto a los datos simulados y un error del 12,32 % con respecto a los datos obtenidos teóricamente.

Tabla 3.10 Valores obtenidos en las pruebas de propagación en diferentes terrenos

Superficie	Potencia en recepción (dBm)			% error	
	Práctico	Simulado	Teórico	Simulado	Teórico
Tierra promedio	-45	-52,2	-44,87	16	0,29
Tierra húmeda	-46	-45,3	-41,91	1,52	8,89
Superficie agua	-49	-45	-42,96	8,16	12,32

Observamos que los valores prácticos aumentan a medida que aumenta la cantidad de agua en el terreno, por el contrario, los valores simulados sugieren que los valores disminuyan a medida que disminuye la cantidad de agua en el terreno.

3.6 DISTANCIA MÁXIMA ALCANZADA CON EL RADIOENLACE

Se implemento un radioenlace entre los puntos “TX ECOPARQUE” y “RX2 ECOPARQUE” que se observa en la Figura 3.30 con una distancia de radioenlace de 570 m

Figura 3.30 ECOPARQUE (Tulcán)

El marcador “TX ECOPARQUE” se encuentra en la posición (0,822312 -77,76627), a 570 metros de distancia se encuentra el marcador el marcador “RX2 ECOPARQUE” en la posición (0,819357 -77,76203), en estos puntos se instaló los sistemas de transmisión y recepción respectivamente.

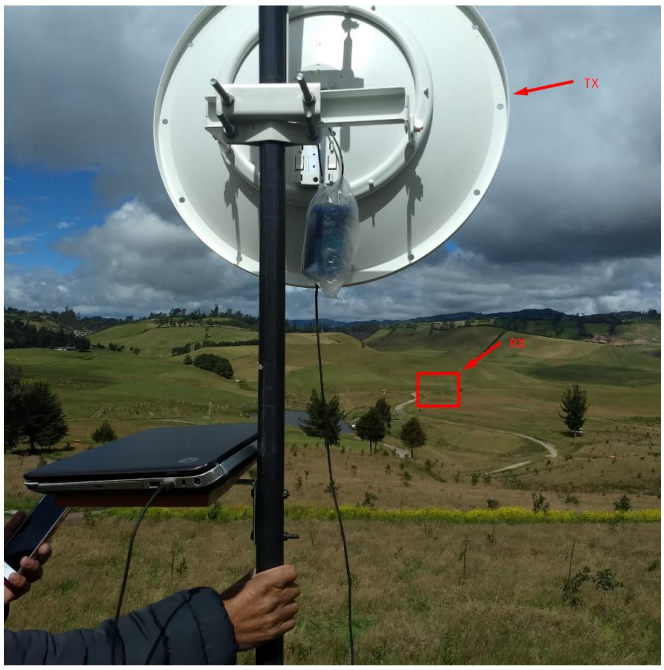


Figura 3.31 Sistema Transmisión y Recepción

3.6.2 NIVEL DE POTENCIA

Para la medición de la intensidad de potencia (dB) utilizamos el espectrograma disponible en las librerías de GNU Radio y se obtiene el siguiente resultado:

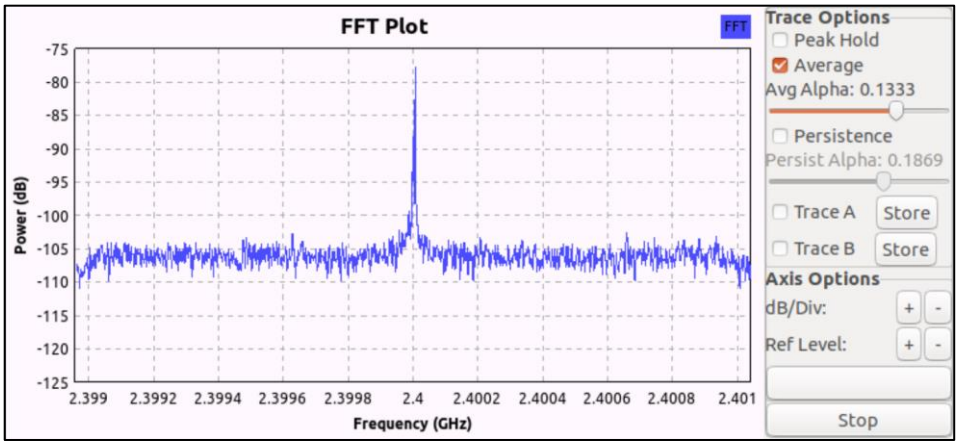


Figura 3.32 Potencia Recibida en GNU Radio

La potencia recibida es de -78 dB o -48 dBm. Se observa que la intensidad de potencia recibido es alta a pesar de tener una distancia de radioenlace de 580 m.

3.6.3 SIMULACIÓN DEL ENLACE EN RADIO MOBILE

La Figura 3.33 muestra el perfil topográfico del radioenlace, se observa que la primera zona de Fresnel se encuentra despejada.

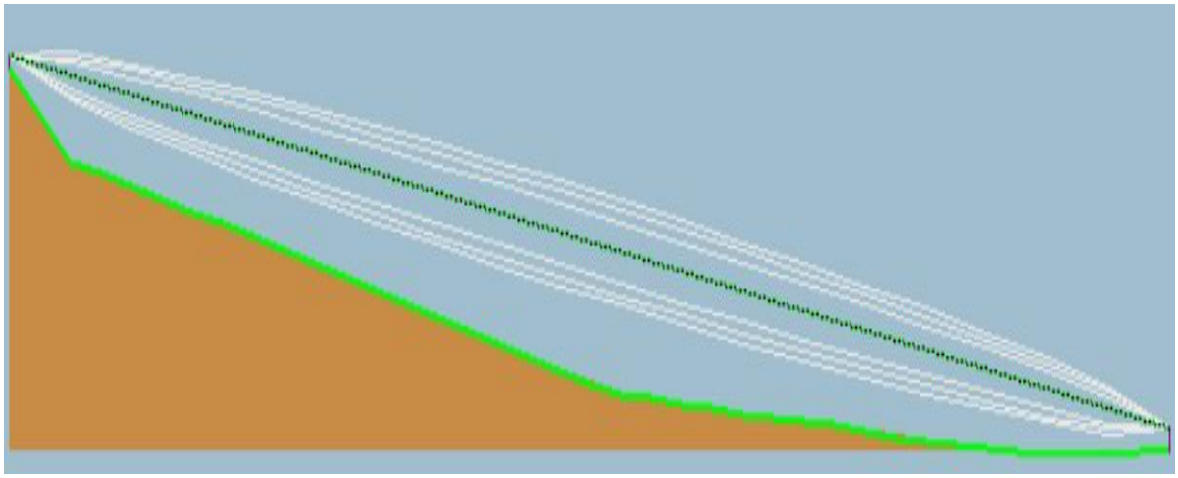


Figura 3.33 Perfil topográfico radioenlace

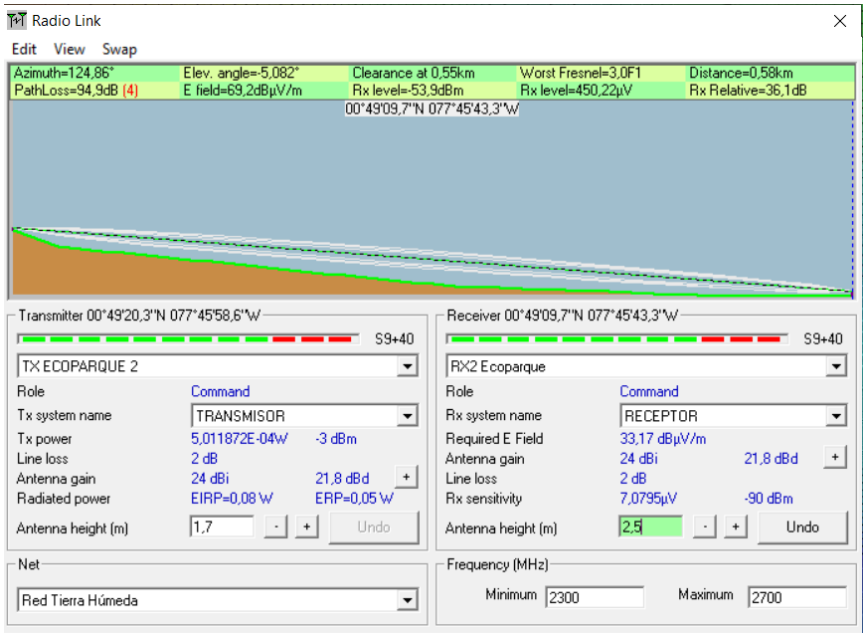


Figura 3.34 Simulación radioenlace 580m en tierra húmeda

Se observa en la Figura 3.34 un nivel de potencia en recepción de -53,9 dBm

3.6.4 CÁLCULO TEÓRICO

En la Tabla 3.11 se detallan los datos utilizados en los siguientes cálculos.

Tabla 3.11 Datos radioenlace tierra promedio

Parámetro	Valor
Frecuencia de operación	2,4 GHz
Permitividad Relativa	28
Conductividad	0,5 S/m
Distancia Radioenlace	580 m
Altura antena transmisora	63,7 m
Altura antena receptora	2,5 m

El radio máximo de la primera zona de Fresnel es:

$$r = 17{,}32\sqrt{\frac{d}{4 * f}} = 17{,}32\sqrt{\frac{0{,}21}{4 * 2{,}4}} = 4{,}25\ m$$

Las pérdidas básicas por espacio libre son:

$$L_{bf} = 32{,}4 + 20\log(f_{Mhz}) + 20\log(d_{Km})$$

$$L_{bf} = 32{,}4 + 20\log(2400) + 20\log(0.210) = 32{,}4 + 67{,}6 - 4{,}73 = 95{,}27\ dB$$

Las pérdidas por exceso son:

$$L_{ex} = -10log(1 + 2|R|cos(\Delta + B) + |R|^2) = 2{,}162dB$$

$$L_b = 95{,}27\ dB + 2{,}162\ dB = 97{,}43\ dB$$

En el presupuesto de enlace se tiene las siguientes variables:

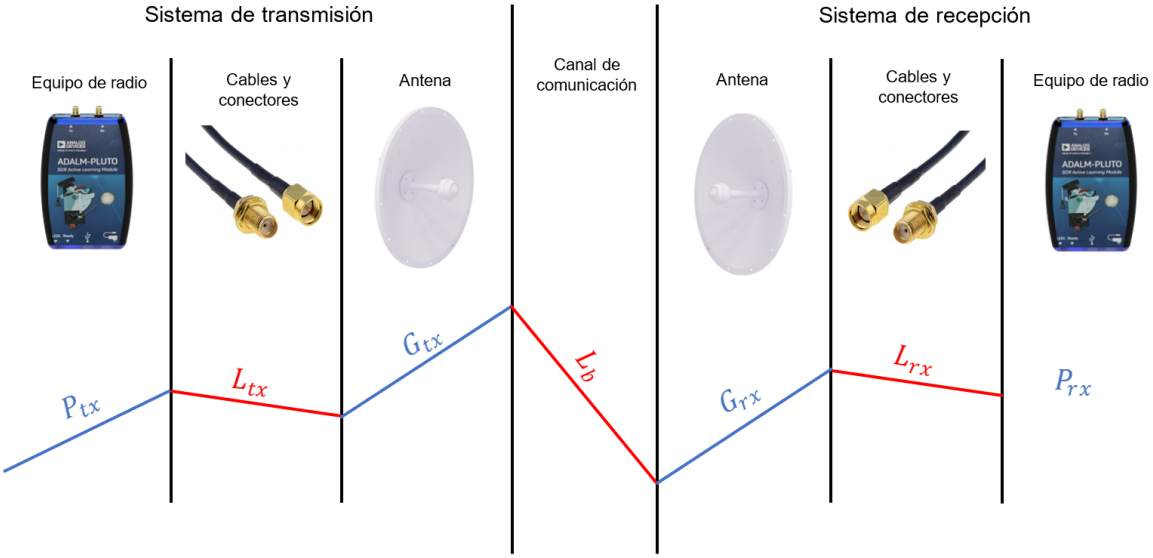


Figura 3.35 Variables del presupuesto del radioenlace

Datos:

Potencia del transmisor:	Ptx = -3 dBm
Pérdidas por conectores en el sistema transmisor:	Ltx = 2 dB
Pérdidas por conectores en el sistema de recepción:	Lrx = 2 dB
Ganancia antena transmisora:	Gtx = 24 dBi
Ganancia antena receptora:	Grx = 24 dBi
Pérdida por espacio libre:	Lb = 97,43 dB

$$Prx = Ptx + Gtx(dBi) - Ltx - Lb - Lrx + Grx(dBi)$$

$$Prx = -3\ dBm + 24\ dBi - 2\ dB - 97{,}43\ dB - 2\ dB + 24\ dBi$$

$$Prx = -56{,}43\ dBm$$

Se espera una potencia en el receptor de -56,43 dBm.

La Tabla 3.12 muestra un resumen de los valores de potencia obtenidos en recepción.

Tabla 3.12 Resumen de valores de potencia en recepción

Potencia en recepción (dBm)			% error	
Práctico	Simulado	Teórico	Simulado	Teórico
-48	-53,9	-56,43	12,29	17,56

Usando GNU Radio se obtiene un valor de potencia de -48 dBm, en la simulación del radioenlace se tiene un valor de -53,9 dBm, y mediante la aplicación de la teoría tenemos un valor de -56,43 dBm. Se observa que hay un error del 12,29 % con respecto a los datos simulados y un error del 17,56 % con respecto a los datos obtenidos teóricamente. La potencia recibida a 580 m en tierra húmeda en comparación con el radioenlace de 210m en tierra húmeda, solo sube 2 dB.

No había red celular durante las pruebas en terreno húmedo, por lo que la aplicación de audio del ANEXO B nos ayudó a comunicarnos. Las pruebas de transmisión de audio y música fueron muy positivas.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- En los sistemas de radioenlace es necesario despejar la primera zona de Fresnel para garantizar la comunicación, la ITU recomienda que hay que despejar el 60 % de la primera zona de Fresnel para que el enlace funcione sin complicaciones. En las pruebas realizadas en la evaluación de la zona de Fresnel observamos que se llega a perder 28,3 dB cuando la mitad de la zona de Fresnel esta obstruida. Además, se constató que solo se necesita despejar el 60 % de la zona de Fresnel para evitar la menor cantidad de pérdidas debido a obstrucción.

- En las pruebas de evaluación de pérdidas por apuntamiento solo se esperaba conocer en cuanto variaba la potencia en recepción a medida que cambiaba en ángulo de elevación y azimut, pero al final se obtuvo el patrón de radiación de la antena.

- Algunos resultados obtenidos en la evaluación de pérdidas por ángulo de elevación tuvieron errores bastante altos en comparación con los datos del patrón de la antena, estos errores tal vez fueron provocados por algún error en la medición del

ángulo de elevación, como también pudieron ser provocados por el perno de elevación ya que solo tiene una graduación para ángulos comprendidos entre 10° a -10° y las pruebas se realizaron hasta los 43°, entonces nos salimos del límite de medición del perno para realizar las pruebas.

- Los resultados obtenidos en la medición del ángulo de azimut fueron bastante buenos, gráficamente se obtuvo el patrón de radiación de la antena, y esto fue gracias a la toma de datos continuos y al diseño de un graduador que fue acoplado al mástil, se mejoró notablemente la medición de este ángulo.

- Conocer cuanta potencia varía según el ángulo de azimut y elevación nos permite saber cuántas pérdidas podemos tener en el sistema de comunicación por un mal apuntamiento de la antena, pero también nos puede ser de ayuda en el caso de que un sistema necesite que sus antenas estén desalineadas por un exceso de potencia recibido que pueda llegar a dañar los equipos.

- La construcción de las antenas no es perfecta, por lo que una antena puede recibir señales electromagnéticas de polarización contraria, pero con una atenuación adicional de 30 a 40 dB (Factor XPD), es decir que si una antena recibe una señal de -50 dBm en polarización vertical, en polarización horizontal la recibiría con -80 dBm o -90 dBm. Nuestra antena de estudio tiene un XPD de 35 dB. En las pruebas de polarización de la antena, solo con girar el foco 40 grados se registró una atenuación de 30 dB, valor muy cercano al XPD de la antena.

- En la medición de potencia en diferentes terrenos, observamos que es algo complicado predecir la potencia de recepción, debido a que se necesitan valores exactos de posición y elevación del terreno, sabemos que el GPS tienen su porcentaje de error y la elevación del terreno tiene una resolución en metros, y según la teoría, un incremento en centímetros en la altura de la antena puede hacer variar rápidamente las pérdidas por exceso del terreno.

- En las simulaciones de potencia en diferentes terrenos, se observa que los valores disminuyen a medida que disminuye la cantidad de agua en el terreno. Esto puede ser explicado porque el coeficiente de reflexión en polarización vertical es mayor en un terreno con poca agua en los primeros 10° del ángulo de reflexión, y los enlaces de radio suelen tener ángulos de reflexión muy inferiores a los 10°.

- En la prueba de alcance máximo tenemos una potencia de señal similar a la obtenida en las pruebas en superficie de agua, a pesar de que se supera en más

dos veces la distancia de la superficie de agua, este valor de potencia alto tal vez se deba a que hay más de un rayo reflejado que llega a la antena, esto puede ser posible porque el terreno es irregular y el ancho de haz de media potencia a una distancia de 580m cubre un área muy grande para que existan muchas reflexiones.

4.2 RECOMENDACIONES

- El radioenlace implementado puede ser usado en muchas aplicaciones, una de ellas es la que se propuso en el ANEXO B que es un sistema full dúplex para transmisión de audio/voz en tiempo real.
- Las pruebas de evaluación de pérdidas por ángulo de elevación se pueden mejorar con algún diseño de graduador adaptado a la antena, que me permita medir con mayor exactitud el ángulo de elevación.
- Si hay mucho viento, es recomendable no subir a la altura máxima la antena porque la fuerza del viento puede llegar a botar el mástil.
- Para mejorar la autonomía del radioenlace se recomienda adquirir una batería de coche y un inversor para poder prolongar la batería de las computadoras.
- Los equipos SDR-Pluto, computadoras necesitan ser protegidos de las condiciones climáticas, por ejemplo, se podría diseñar una caja que las pueda cubrir de la lluvia y del sol.
- Se podría reemplazar las computadoras con raspberry pi para manejar los equipos de radio, las raspberry pi son más fáciles de llevar y consumen menos energía que podría ser suministrada con un panel solar pequeño.
- Con respecto a las pruebas realizadas de la medición de potencia variando el ángulo de elevación y azimut se podría diseñar un prototipo para medir los patrones de radiación de cualquier tipo de antena, se podría desarrollar pequeñas antenas y conocer el patrón de radiación y para disminuir las interferencias del exterior cuando se realice una medición del patrón de radiación de alguna antena se podría utilizar una jaula de Faraday.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] "Vector de Poynting". [En línea]. Available: https://sites.google.com/site/fisicadehondas/vector-de-poynting.

[2] T. Wayne, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Arizona: Pearson Education, 2003.

[3] T. Wayne, "Atenuación y Absorción de ondas," de *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, 4th ed., Arizona, Pearson Educación, 2003, pp. 351-352.

[4] "Radioenlaces por Microondas," Mayo, 2013. [En línea]. Available: https://es.slideshare.net/edisoncoimbra/66-calculos-de-radioenlaces.

[5] "Refracción," 2013. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Refracci%C3%B3n.

[6] M. Rico, D. Contreras y E. San Juan, "Interferencias en sistemas de radiodifusión en zonas de frontera colombiana," vol. 15, nº 30, pp. 50-66, Octubre, 2014.

[7] "La reflexión en las ondas y radioenlaces". 2018. [En línea]. Available: https://www.prored.es/la-reflexion-en-las-ondas-y-radioenlaces/.

[8] T. Wayne, "Propagación de Ondas Electromagnéticas,» de *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, 4th ed., Arizona, Pearson Educación, 2003, p. 356.

[9] T. Wayne, "Propagación de Ondas Electromagnéticas,» de *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, 4th ed., Arizona, Pearson Educación, 2003, pp. 357 - 358.

[10] ARCOTEL, "Plan Nacional de Frecuencias Ecuador 2017," 2017. [En línea]. Available: https://issuu.com/arcotelecuador/docs/pnf-final_1_.

[11] T. Wayne, "Propagación de Ondas Electromagnéticas," de *Sistemas de Comunicación Electrónicas*, 4th ed., Arizona: Pearson Educación, 2003, pp. 359-363.

[12] UIT-R, "Propagación de las ondas radioeléctricas en sistemas terrenalesmóviles terrestres enlas bandas de ondas métricas/decimétricas," 2002. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-44-2002-OAS-PDF-S.pdf.

[13] "Radiotransmisor". [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Radiotransmisor.

[14] J. M. Albornoz, *Radioenlaces Digitales*, España: EAE Editorial Academia Espanola, 2013.

[15] P. Ortiz, "Curso didáctico de comunicación por microondas," Quito: Centro de Publicaciones Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2019.

[16] "Ondas Estacionarias en Líneas de Transmisión". 2017. [En línea]. Available: https://steemit.com/stem-espanol/@lorenzor/ondas-estacionarias-en-lineas-de-transmision.

[17] P. Ortiz, “Factor XPD (dB),” de *Curso didáctico de comunicación por microondas*, Quito, Centro de Publicaciones Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2019, p. 236.

[18] A. Bach, “Mejoramiento e Integración de Sistemas Informáticos de Información de las EPS Sedaloreto S.A. en la ciudad de Iquitos,” Perú, Universidad Ricardo Palma, 2010, p. 40.

[19] “Zonas de Fresnel,”Julio 2018. [En línea]. Available: https://www.prored.es/zonas-de-fresnel-en-un-radioenlace/.

[20] ITU-R, “Datos de propagación y métodos de predicción necesarios parael diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa,” 2017. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-17-201712-I!!PDF-S.pdf.

[21] ITU-R, “Calculation of free-space attenuation,” 2019. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-4-201908-I!!PDF-E.pdf.

[22] J. Murillo, “Radiopropagación,” Febrero, 2009. [En línea]. Available: https://personal.us.es/murillo/docente/radio/documentos/tema7.pdf.

[23] Á. Cardama, “Reflexión en tierra plana,” de *Antenas*, España, Edicions UPC, 2002, p. 44.

[24] “Conductividad eléctrica”. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_el%C3%A9ctrica.

[25] UIT-R, “CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA,” 2000. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-3-199203-S!!PDF-S.pdf.

[26] J. M. Rábanos, “Características del suelo,” de *Transmisión por radio*, España, Centro de estudios Ramón Areces, p. 113.

[27] “What is Software Radio?,” 2019. [En línea]. Available: https://www.gnuradio.org/about/.

[28] “Datasheet RocketDish,” 2016. [En línea]. Available: https://dl.ubnt.com/datasheets/rocketdish/rd_ds_web.pdf.

[29] “Quick Start Guide RocketDish,” 2013. [En línea]. Available: https://dl.ubnt.com/guides/rocketdish/RocketDish_RD-2G24_QSG.pdf.

[30] “ADALM-PLUTO Overview,” Marzo, 2019. [En línea]. Available: https://wiki.analog.com/university/tools/pluto.

[31] “Customizing the Pluto configuration,” Febrero, 2019. [En línea]. Available: https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/users/customizing.

[32] “GNU Radio,” Febrero, 2019. [En línea]. Available: https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/gnuradio.

[33] “Radio Mobile "Quick Start," 2018. [En línea]. Available: http://www.g3tvu.co.uk/Quick_Start.htm.

[34] “airMAX Antenna Data”. [En línea]. Available: https://help.ubnt.com/hc/en-us/articles/204952114-airMAX-Antenna-Data.

[35] “Como medir la ROE,” Agosto, 2010. [En línea]. Available: http://www.sergiozuniga.cl/02/ex_roe/roe.htm.

[36] “Radio Mobile”. [En línea]. Available: http://www.g3tvu.co.uk/Radio_Mobile.htm.

[37] ITU-R, “Datos de propagación y métodos de predicción necesarios parael diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa,” Diciembre, 2017. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-17-201712-I!!PDF-S.pdf.

[38] P. Ortiz, *Curso didáctico de comunicación por microondas*, 1st ed., Quito: Centro de Publicaciones Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2019.

[39] “Antena”. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Antena#Relaci%C3%B3n_Delante/Atr%C3%A1s.

[40] “Propagación de onda en el espacio libre,” Abril, 2014. [En línea]. Available: https://es.slideshare.net/edisoncoimbra/63-propagacion-en-el-espacio-libre.

ANEXOS

ANEXO A. Constantes eléctricas para diferentes terrenos en función de la frecuencia.

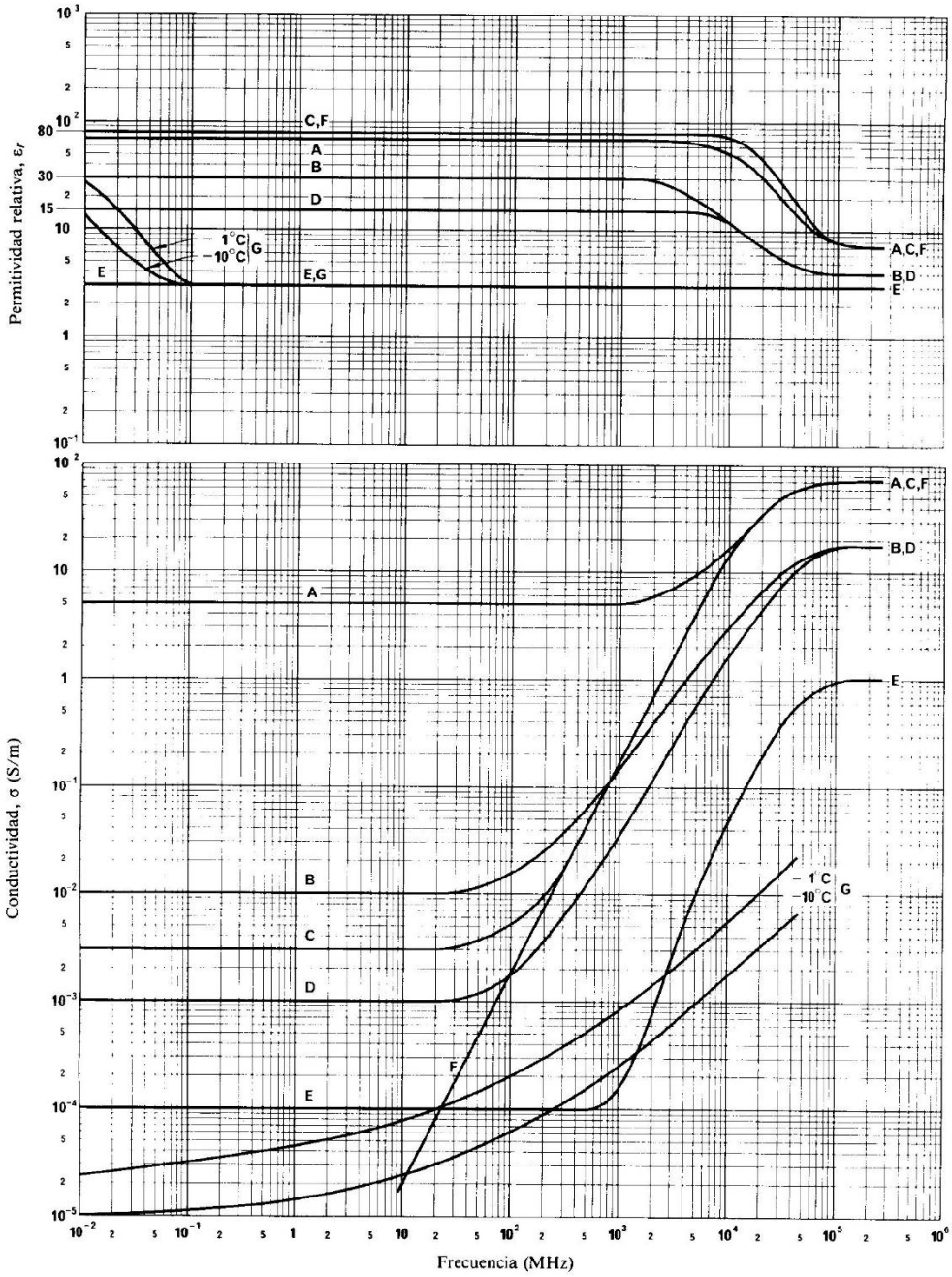
ANEXO B. Diagrama de bloques del sistema transmisión y recepción en full dúplex para audio/voz.

ANEXO C. Descripción de los bloques del diagrama de transmisión y recepción en full dúplex para audio/voz.

ANEXO A

Constantes eléctricas para diferentes terrenos en función de la frecuencia.

Permitividad relativa, ε_r, y conductividad, σ, en función de la frecuencia

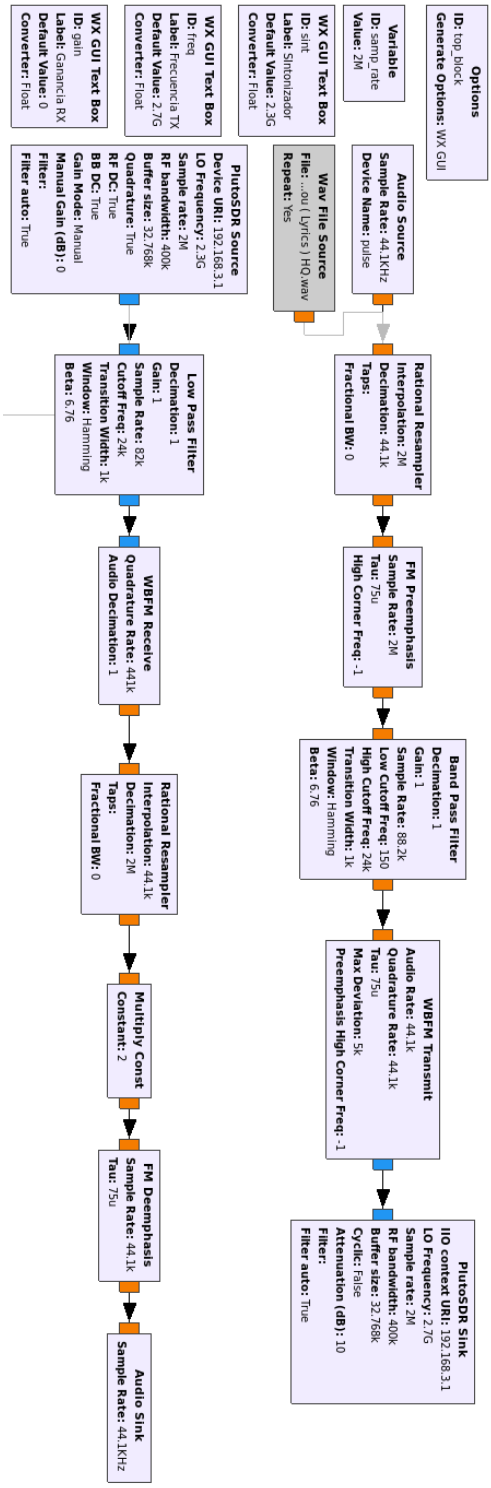


A: Agua salada (salinidad media), 20° C
B: Suelo húmedo
C: Agua dulce, 20° C
D: Suelo moderadamente seco
E: Suelo muy seco
F: Agua pura, 20° C
G: Hielo (agua dulce)

D01-sc

ANEXO B

Diagrama de bloques del sistema Transmisión y Recepción en Full dúplex para audio/voz.



ANEXO C

Descripción de los bloques del diagrama de transmisión y recepción en full dúplex para audio/voz.

El sistema planteado en ANEXO B nos proporciona un envío y recepción de audio de alta calidad.

Sistema de transmisión

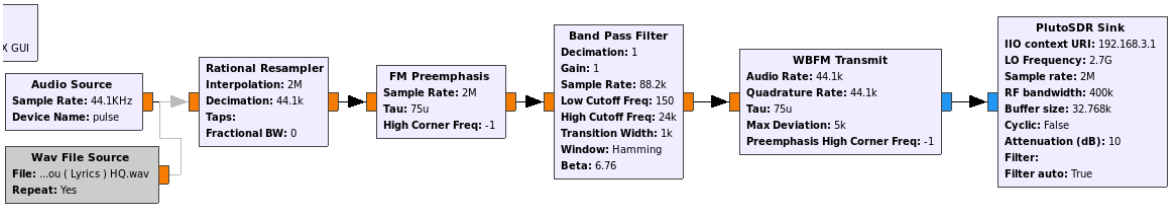
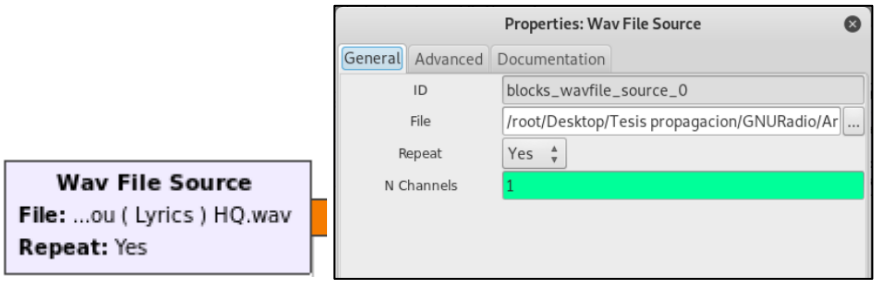


Figura 1 Sistema de Transmisión

A continuación, se detallan los bloques de la Figura 1.

Wav File Source



Este bloque nos proporciona una fuente de audio a partir de un archivo, en la sección de “File” permite cargar el archivo de audio y debe estar en formato wav. La frecuencia de muestreo del formato wav es de 44.1KHz o lo mismo que decir 44.1KSPS (44100 Samples Per Second), es la frecuencia de entrada inicial del sistema de transmisión. Se necesitará usar interpolación y/o decimación para adecuar esta frecuencia a la frecuencia de transmisión del equipo SDR.

Audio Source

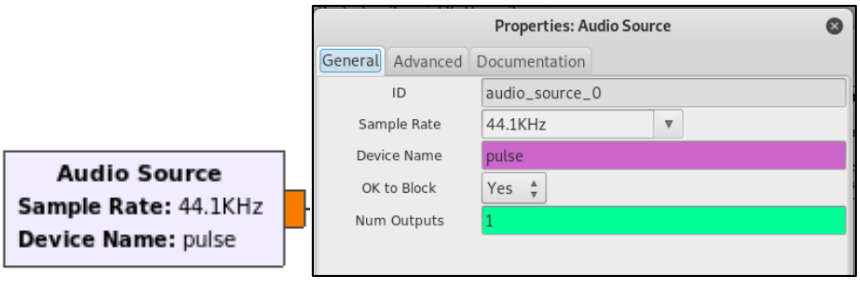


Figura 3 Audio Source

Este bloque nos ayuda a tener una fuente de audio a partir de algún dispositivo de entrada como un micrófono, para poder usar el micrófono interno del computador basta con escribir la palabra “pulse” en la sección de “Device Name”, y en la sección de “Sample Rate” podemos elegir la tasa de muestreo del audio, en este caso usaremos la frecuencia de 44.1KHz (se trabajará con la misma frecuencia de muestreo del formato wav).

Rational Resample

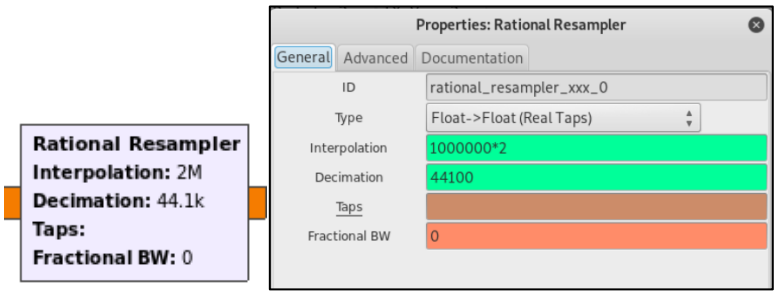


Figura 4 Rational Resample

Este bloque nos ayuda a cambiar la frecuencia de muestreo de la señal entrante, que en este caso es audio, y se cumple la siguiente fórmula al usar el bloque:

$$Fs_{out} = Fs_{in} * \left(\frac{Interpolation}{Decimation}\right).$$

Donde:

Fs_{out}: Corresponde a la frecuencia de salida resultante.

Fs_{in}: Corresponde a la frecuencia de entrada.

Interpolation: Corresponde al factor para incrementar la tasa de muestreo de una señal (se debe usar números enteros).

Decimation: Corresponde al factor para decrementar la tasa de muestreo de una señal (se debe usar números enteros).

Al usar los bloques de interpolación y decimación por separado podemos tener una frecuencia de salida en decimales por lo que la combinación de este bloque llamado “Rational Resampler” es útil para conseguir una frecuencia de salida en números enteros.

Como la frecuencia de transmisión que se va a usar en el equipo transmisor Adalm Pluto es de 2MSPS (2 Mega Samples per Second), se adecua la señal de entrada a esta velocidad de transmisión de 2MSPS, para tener una frecuencia de muestreo de salida de 2MSPS se tiene que: la interpolación debe ser igual a $2x10^6$ y que la decimación debe ser igual a 44100.

$$Fs_{out} = Fs_{in} * \left(\frac{Interpolation}{Decimation}\right) = 44.1KSPS * \frac{2x10^6}{44100} = 2MSPS$$

FM Preemphasis

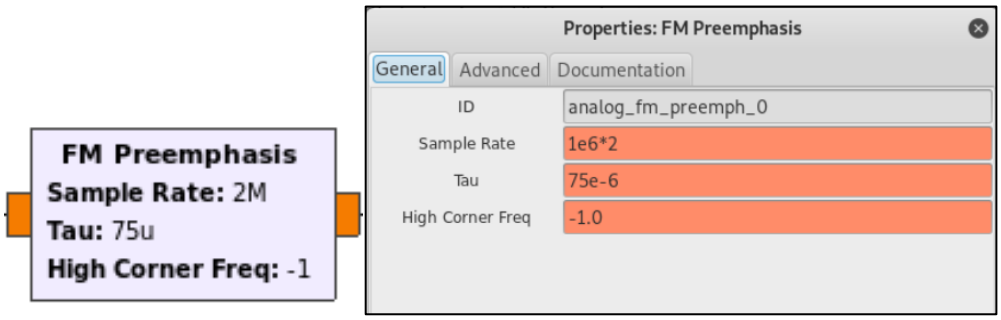


Figura 5 FM Preenphasis

El preénfasis es una técnica de reducción de ruido que se aplica en el audio de los canales L y R. Consiste en aumentar la amplitud de las frecuencias agudas, puesto que estas son más sensibles al ruido. En Europa, la constante de tiempo del pre-énfasis es de 50µs, mientras que en América es de 75µs.

Band Pass Filter

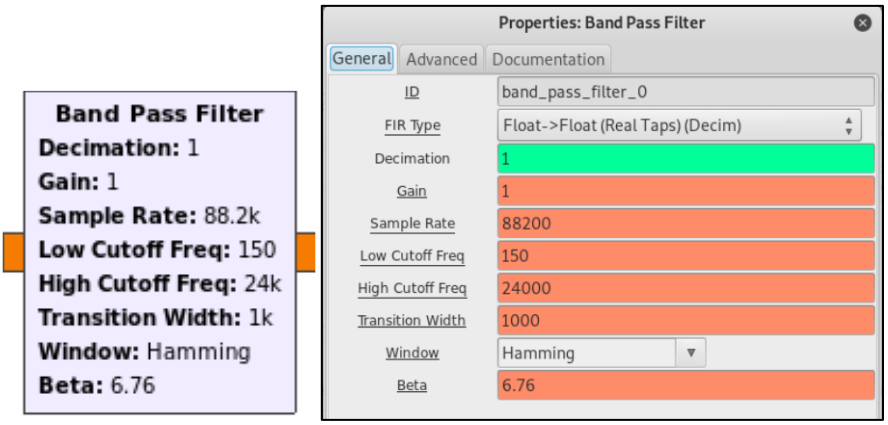


Figura 6 Band Pass Filter

Este bloque nos ayuda a reducir ancho de banda y también el ruido provocado por las frecuencias bajas que se encuentra en la música. En la sección de frecuencia de corte inferior (Lower Cutoff Freq) se establece a 150Hz para reducir los bajos y la frecuencia de corte superior (High Cutoff Freq) será de 24KHz para tener todos los componentes de música disponible.

WBFM (FM de Banda Ancha) Transmit

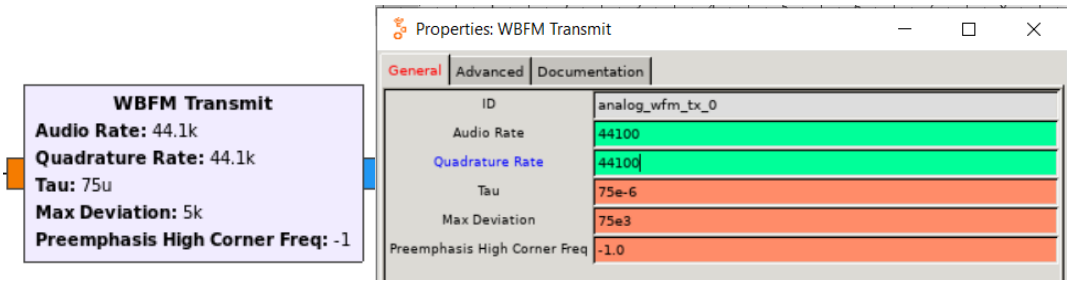


Figura 7 WBFM (FM de Banda Ancha) Transmit

Este bloque prepara la señal de audio para modulación en FM de banda ancha. El parámetro de “Quadrature Rate” es la tasa a la que entran las muestras en el bloque (debe ser múltiplo del audio rate). En la sección de “Audio Rate” es la frecuencia a que el audio va a ser reproducido.

PlutoSDR Sink

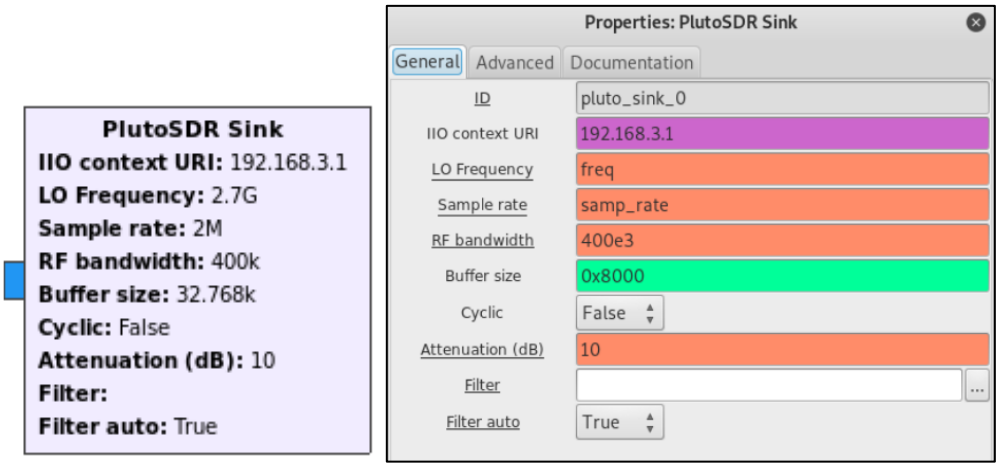


Figura 8 PlutoSDR Sink

El bloque “PlutoSDR Sink” se encarga de enviar la información a una frecuencia dada, se debe ingresar la dirección IP en el espacio “IIO context URI” para que el bloque “PlutoSDR Sink” se conecte con el equipo Adalm Pluto que funcionará como transmisor, la frecuencia de transmisión se puede controlar en el espacio de “LO Frequency” y la potencia del equipo transmisor se la puede controlar ingresando la atenuación en el parámetro de “Attenuation” del bloque “PlutoSDR Sink”.

Sistema de Recepción

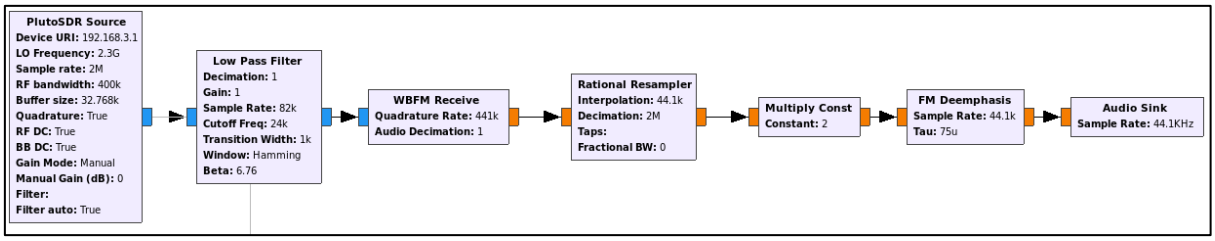


Figura 9 Sistema de Recepción de audio

A continuación, se detallan los bloques de la Figura 9.

PlutoSDR Source

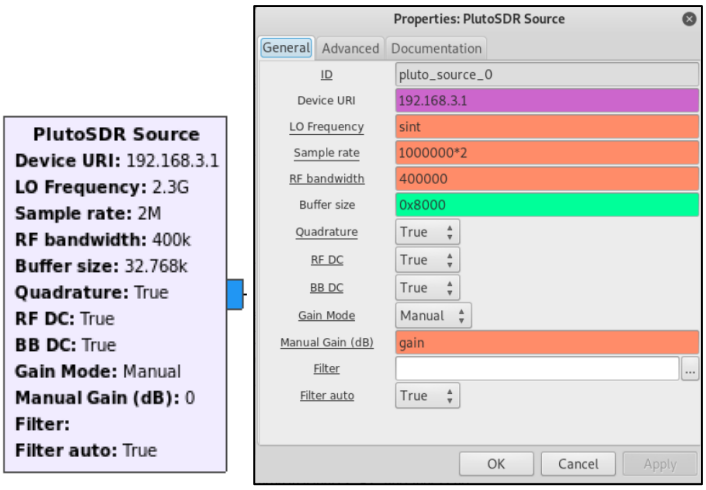


Figura 10 PlutoSDR Source

El bloque “PlutoSDR Source” se encarga de recibir la información a una frecuencia dada, se debe ingresar la dirección IP en el espacio “IIO context URI” para que el bloque “PlutoSDR Sink” se conecte con el equipo Adalm Pluto que funcionará como receptor, la frecuencia de recepcion se puede controlar en el espacio de “LO Frequency”, se puede variar la ganancia del receptor mediante el parámetro “Manual Gain(dB)” del bloque “PlutoSDR Source”. La tasa a la que se recibe la muestras es de 2MSPS (2 Mega Samples Per Second), se tiene que: Fs_in=2MSPS. Recordemos que la tasa de muestreo del audio es de 44.1KHz, por lo que se debe utilizar un bloque de “Rational Resampler” para ajustar los 2MSPS a 44.1KSPS

Low Pass Filter

Figura 11 Low Pass Filter

Este bloque nos ayuda a eliminar frecuencias no deseadas y reducir el ruido. Como se transmite audio la frecuencia de corte será de 24KHz.

WBFM (FM de Banda Ancha) Receive

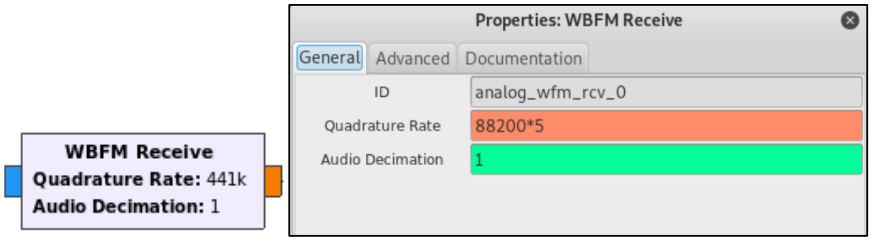


Figura 12 WBFM (FM de Banda Ancha) Receive

Este bloque demodula y recupera la señal de audio. Un valor alto en el espacio de “Quadrature Rate” nos proporciona un audio de mayor calidad.

Rational Resample

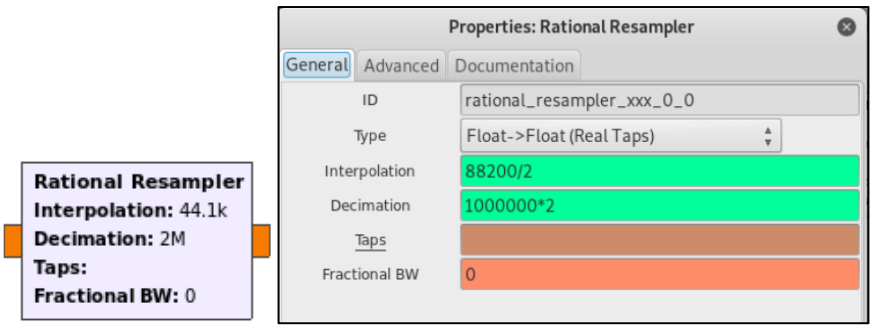


Figura 13 Rational Resample

Este bloque nos ayuda a cambiar la frecuencia de muestreo de la señal de audio, se cumple la siguiente formula al usar este bloque:

$$Fs_{out} = Fs_{in} * \left(\frac{Interpolation}{Decimation}\right)$$

Para obtener una $Fs_{out} = 44.1KSPS$ (tasa de salida de 44.1KSPS) se tiene que: la interpolación debe ser igual a 44100 y la decimación debe ser de $2x10^6$.

$$Fs_{out} = Fs_{in} * \left(\frac{Interpolation}{Decimation}\right) = 2MSPS * \frac{44100}{2x10^6} = 44.1KSPS$$

FM Deemphasis

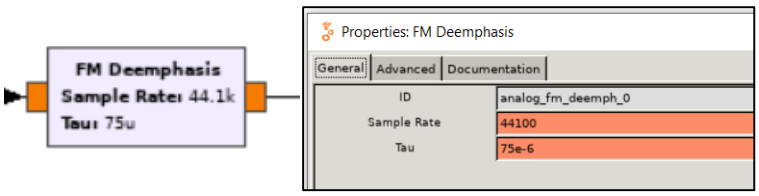


Figura 14 FM Deemphasis

Al usarse preénfasis en la etapa de transmisión es necesario aplicar deemphasis en la etapa de recepción porque se podría tener frecuencias de audio con muy alta amplitud lo que provocaría distorsión en la reproducción del audio.

Audio Sink

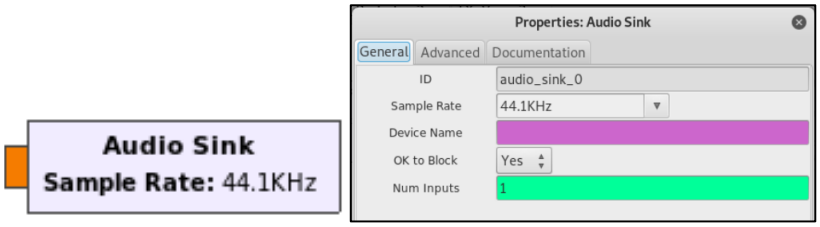


Figura 15 Audio Sink

El bloque de Audio Sink nos ayuda a reproducir el audio receptado. En la sección de “Sample Rate” podemos escoger la tasa de muestreo del audio, y en la sección de “Device Name” podemos elegir el dispositivo de salida de audio, si se deja en blanco esta sección se utilizará los parlantes por defecto del computador.

ORDEN DE EMPASTADO