

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTROTÉCNIA



**DISEÑO DE ESTACIÓN TERRENA PARA RECEPCIÓN Y
TRANSMISIÓN DE DATOS DE SATÉLITE IOT
PEHUENSAT III**

Proyecto Integrador Profesional presentado por:

LARREBURO, DANILO ANDRES

Ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue para acceder
al título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Dirección:

Director: ING. SIMONE, DANIEL

Neuquén, Neuquén

6 de noviembre de 2025

Dedicatorias y Agradecimientos

Son muchas las personas que me han ayudado a recorrer este camino y culminarlo en este proyecto. Por eso quiero agradecer principalmente a mi familia, que me ha apoyado desde siempre, a esa familia que me acompaña desde un principio, que ha ido creciendo y son cada día más los que me acompañan.

También agradecer a todo el equipo Pehuensat, a los profesores que dirigen este proyecto y lo hacen posible, enseñándonos lo necesario para poder mostrar nuestro avance en cada congreso, y a los compañeros con los que he compartido estos momentos.

A todos los profesores que me han enseñado el hermoso oficio de la ingeniería y a los compañeros de la facultad con los que hemos compartido los desafíos que lleva la carrera.

Y finalmente, a todas las experiencias vividas a lo largo de este camino, que me han enseñado la perseverancia para llegar hasta acá.

Resumen

El presente trabajo aborda el diseño de una estación terrena para la recepción y transmisión de datos en la banda pública UHF de 435 MHz del satélite Pehuensat III. Este picosatélite forma parte de los proyectos de diseño y construcción de tecnología espacial impulsados por la Universidad Nacional del Comahue (UNCo), entre ellos, el lanzamiento del satélite Pehuensat I.

Pehuensat III se presenta como sucesor, con nuevas funcionalidades orientadas a la conectividad de dispositivos IoT. Su misión es ofrecer servicio de Gateway y servidor de datos de usuarios remotos. Se operará en una órbita polar baja (LEO), lo que implica un número de pasadas con visibilidad limitada sobre el territorio argentino y, particularmente, sobre esta estación ubicada en Neuquén. Durante estos intervalos, se establecerá un enlace para la transmisión de datos de telemetría, comandos de control y paquetes de usuario.

El principal desafío del proyecto radica en estudiar la factibilidad de la comunicación considerando el limitado tiempo de visibilidad. Para ello, se realiza un análisis de la factibilidad de comunicación mediante un cálculo detallado del enlace satelital, considerando pérdidas por espacio libre, atenuaciones atmosféricas, ruidos en el sistema y ganancias de antenas. Este estudio permite determinar el margen de enlace y el tiempo óptimo de comunicación.

La infraestructura propuesta incluye el diseño y calibración de la antena UHF, así como la selección e instalación de un transceptor compatible con el protocolo AX.25, para su comunicación hasta el servidor local para posterior publicación de los datos. La caracterización de cada componente se basa en las funciones del satélite, asegurando una transmisión y recepción de datos, robusta y eficiente. Además, se espera que esta infraestructura sea de utilidad para futuras implementaciones satelitales de la UNCo.

Palabras clave: Enlace, satélite, antena, protocolo, recepción, transmisión.

Abstract

This paper addresses the design of a ground station for the reception and transmission of data in the 435 MHz UHF public band of the Pehuensat III satellite. This picosatellite is part of the space technology design and construction projects promoted by the Universidad Nacional del Comahue (UNCo), among which the launch of Pehuensat I satellite stands out.

Pehuensat III is presented as its successor, with new functionalities aimed at the connectivity of IoT devices. Its mission is to offer a gateway service and data server for remote users. It will operate in a low polar orbit (LEO), which entails several passes with limited visibility over Argentine territory and, particularly, over the station at Neuquén. During these intervals, a link will be established for the transmission of telemetry data, control commands, and user packets.

The main challenge of the project lies in studying the feasibility of communication considering the limited visibility time. To this end, a communication feasibility analysis is performed through a detailed calculation of the satellite link, considering free space losses, atmospheric attenuation, system noise, and antenna gains. This study determines the link margin and optimal communication time.

The proposed infrastructure includes the design and calibration of the UHF antenna, as well as the selection and installation of a transceiver compatible with the AX.25 protocol, for communication to the local server for subsequent data publication. The characterization of each component is based on the satellite's functions, ensuring robust and efficient data transmission and reception. Furthermore, this infrastructure is expected to be useful for future UNCO satellite implementations.

Índice general

Índice general.....	v
1 Introducción.....	1
1.1 Contexto del proyecto Pehuensat III	1
1.2 Fundamentación de las comunicaciones satelitales.....	2
1.3 Diseño del enlace satelital	2
1.4 Objetivo general	3
1.5 Objetivos específicos	3
2 Marco Teórico.....	4
2.1 Conceptos de la comunicación satelital.....	4
2.1.1 Segmento Espacial.....	4
2.1.2 Segmento Terrestre.....	5
2.1.3 Frecuencias de comunicación entre segmentos	6
2.2 Clasificación de satélites y órbitas	9
2.2.1 Satélites activos y pasivos	9
2.2.2 Clasificación por masa y tamaño	9
2.2.3 Clasificación de órbitas.....	11
2.2.4 Justificación de elecciones del Pehuensat III.....	14
2.3 Codificación de la señal: Modulaciones digitales y protocolos	17
2.3.1 Modulaciones	17
2.3.2 Protocolo AX.25.....	18
2.3.3 Packet Radio y APRS	19
2.4 Propagación de ondas en el Enlace Satelital	21
2.4.1 Pérdida por espacio libre L_{FS}	21
2.4.2 Pérdidas atmosféricas y locales.....	22
2.4.3 Análisis de pérdidas.....	23
2.4.4 Trayectoria de la onda.....	24
2.4.5 Presupuesto del enlace	26
2.4.6 Desempeño del enlace	29
3 Metodología y Desarrollo.....	31
3.1 Requerimientos de la estación	31
3.1.1 Subsistemas principales	31
3.1.2 Distancia y tiempo de comunicación.....	33

3.1.3	Cálculo del presupuesto de enlace.....	36
3.1.4	Requerimientos funcionales de los componentes	40
3.2	Diseño de arquitectura de la Estación Terrena	43
3.2.1	Subsistema de Antena UHF y Montura	43
3.2.2	Subsistema de transmisión y recepción de RF (RF Front-End).....	50
3.2.3	Subsistema de procesamiento digital de la señal (SDR)	52
3.3	Integración y puesta en marcha	55
3.3.1	Configuración del Software SDR en servidor	55
3.3.2	Interfaz servidor – transceptor.....	60
3.3.3	Interconexión transceptor – antena	64
3.3.4	Pruebas y validación de la comunicación.....	65
4	Resultados	67
4.1	Resultados obtenidos	67
4.2	Evaluación técnica de la comunicación	67
4.3	Validación final del sistema	68
5	Conclusiones.....	69
5.1	Conclusiones generales.....	69
5.2	Limitaciones del proyecto y recomendaciones futuras.....	70
6	Bibliografía.....	72

Lista de figuras

Figura 2-1: Segmentos de un sistema de comunicación en satélites	4
Figura 2-2: Figura 2-2: Cubesat con diferentes modulaciones (U).....	10
Figura 2-3: Órbitas satelitales LEO, MEO y GEO.....	11
Figura 2-4: TLE para NOAA-15	24
Figura 2-5: Coordenadas orbitales del satélite	25
Figura 2-6: Eventos de pases satelitales	26
Figura 2-7: área efectiva de recepción.....	27
Figura 3-1: Diagrama de Bloques Funcional de una Estación Terrena de Bajo Costo	33
Figura 3-2: Parámetros utilizados en el cálculo del Slant Range	34
Figura 3-3: Variación LFS con la distancia, para $f=435$ MHz	37
Figura 3-4: Variación libre P_R con la distancia	39
Figura 3-5: Variación del margen M (para AX25) con la distancia.....	39
Figura 3-6: Diagrama de bloques de subsistemas de la estación terrena.....	42
Figura 3-7: Analizador de espectro recibiendo señal de antena (435 MHz)	45
Figura 3-8: Diagrama de bloques de subsistemas de la estación.....	46
Figura 3-9: Modelado de antena Yagi mediante MMANA-GAL	47
Figura 3-10: Diagrama de ROE mediante MMANA-GAL.....	48
Figura 3-11: Diagramas de patrón de radiación con MMANA-GAL	49
Figura 3-12: Radio Yaesu FT-5100.....	51

Figura 3-13: Software Orbitron	53
Figura 3-14: Software Direwolf	53
Figura 3-15: Software EasyTerm	54
Figura 3-16: Direwolf previo a la conexión de puertos.....	55
Figura 3-17: Monitoreo de comunicación en EasyTerm.....	58
Figura 3-18: Orbitron mostrando seguimiento y coordenada de Cubesat.....	60
Figura 3-19: Conexiones iniciales para comunicación por Handy con PTT automático	61
Figura 3-20: Mensajes y parámetros de calidad de señal en Direwolf.....	62
Figura 3-21: Pines Jack del transceptor Yaesu.....	63
Figura 3-22:Pruebas de interfaz para amplificación y filtrado de señal.....	63
Figura 3-23:Pruebas de comunicación y decodificación.....	65

Lista de tablas

Tabla 2-1: Bandas de frecuencias designados por longitud de onda.....	7
Tabla 2-2: Características de los satélites LEO, MEO y GEO.....	14
Tabla 2-3: Síntesis de pérdidas.....	23
Tabla 3-1: Valores de los parámetros del presupuesto de enlace	38
Tabla 3-2: Tipos de antenas.....	44
Tabla 3-3: Parámetros establecidos en la configuración de la estación	57

1 Introducción

En este capítulo inicial del proyecto, se pretende describir el contexto y fundamentación, desde la trayectoria de la facultad de ingeniería en tecnologías satelitales, hasta los objetivos particulares de esta estación terrena como parte del proyecto satelital Pehuensat III

1.1 Contexto del proyecto Pehuensat III

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue (UNCo) ha desarrollado, durante más de 25 años, una destacada trayectoria en proyectos de tecnología espacial, incluyendo el diseño y construcción de equipos espaciales. Se destaca entre los más relevantes, el lanzamiento del satélite Pehuensat I. En continuidad con este camino, el presente trabajo se enmarca en el desarrollo del proyecto satelital Pehuensat III y tiene como objetivo el diseño de una estación terrena ubicada en la facultad de ingeniería, es decir, en la ciudad de Neuquén.

El Pehuensat III tiene como misión ofrecer un servicio de Gateway para aplicaciones de Internet de las Cosas (IOT) y funcionar como servidor de datos para usuarios remotos. La estación terrena desarrollada permitirá la recepción y transmisión de datos, incluyendo tanto la descarga de telemetría como de información generada por los usuarios.

Se comienza este proyecto con la descripción de los conceptos generales vinculados con los sistemas satelitales, haciendo énfasis principalmente en aquellos aspectos relacionados con las características técnicas del Pehuensat III. Este consiste en un picosatélite tipo CubeSat de una unidad (1U), que operará en una órbita terrestre baja (LEO), es decir, con altitudes comprendidas entre 400 y 600 km. Esta disposición le permite un paso visible para la estación terrena de Neuquén, y el espacio aéreo argentino, aproximadamente cuatro veces al día, durante unos pocos minutos de ventana de comunicación por cada pasada. La comunicación se realiza por medio de la banda pública UHF, en la frecuencia de 435 MHz.

La correcta implementación de esta estación es clave para asegurar una comunicación efectiva, confiable y oportuna con el satélite, maximizando el aprovechamiento de cada oportunidad de enlace.

1.2 Fundamentación de las comunicaciones satelitales

Los sistemas satelitales desempeñan un rol fundamental en múltiples ámbitos de la sociedad, ya que permiten la ejecución de funciones clave de comunicación, telemetría, rastreo y seguimiento de objetos y eventos en tiempo real. Estas operaciones generan volúmenes significativos de información que, tras ser procesada, contribuye al desarrollo científico, tecnológico y social, así como al mejoramiento de la calidad de vida de la humanidad.

En este contexto, el presente proyecto permite promover de manera continua, el conocimiento científico-tecnológico y la difusión de la ciencia en diversos ámbitos educativos, fomentando la tecnología espacial diferentes espacios, mediante el desarrollo de infraestructura de comunicaciones satelitales accesible al ámbito educativo. La estación a diseñarse, permitirá no solo el enlace con el Pehuensat III, sino también brindará a estudiantes, investigadores y a la industria productiva de la región ampliar la capacidad de relevar, promoviendo la difusión y apropiación de tecnología espacial en espacios formativos, tanto a nivel universitario como en instituciones técnicas de la región.

Adicionalmente, se espera que esta infraestructura brinde soporte para proyectos de investigación y transferencia tecnológica, posibilitando la adquisición de datos en ubicaciones remotas o de difícil acceso. De este modo, se busca potenciar el desarrollo de profesionales especializados y de herramientas tecnológicas que contribuyan al crecimiento económico y social regional.

1.3 Diseño del enlace satelital

El diseño de la estación terrena óptima y eficiente requiere una comprensión detallada de las características, funciones y misión del satélite. La frecuencia de la comunicación (435 MHz) y la distancia al satélite, determinada por su órbita LEO (aproximadamente 600 Km), determinan factores críticos como las dimensiones, ganancia y potencia necesarias de la antena terrena al momento de garantizar una transmisión y recepción de datos confiables.

Entre los datos a transmitir hacia el satélite se incluyen comandos de telemetría, instrucciones de configuración, ordenes de encendido o apagado y, en caso de ser necesario, actualizaciones sobre su posición espacial, las cuales pueden obtenerse mediante software como Orbitron. Uno de los desafíos del satélite radica en lograr un eficiente consumo de energía, ya que dispone de

la limitada energía que almacenan sus baterías. Para ello, una computadora de energía a bordo se encarga de monitorear indica el estado e historial de las baterías y de los paneles solares.

Por parte de la estación terrena, los datos a recibir comprenden tanto la información de los usuarios remotos como el estado operativo del satélite, incluyendo la telemetría. Esta información se descarga y almacena localmente para luego ser transferidos a un servidor en la nube, donde estarán disponibles a través de una interfaz web para su consulta y análisis.

El establecimiento de un enlace eficaz es, por lo tanto, esencial para garantizar la integridad y disponibilidad de los datos, y para aprovechar al máximo los breves períodos de visibilidad que ofrece cada pasada del satélite.

1.4 Objetivo general

El objetivo fundamental de este proyecto es el de establecer la comunicación entre el Pehuensat III y el servidor local. Esto implica el diseño e implementación de una estación terrena, en la ciudad de Neuquén (Facultad de ingeniería), capaz de recibir y transmitir datos de satélites LEO en la frecuencia UHF (435 MHz) que emplean el protocolo AX25. La capacidad y eficiencia de la comunicación satelital integral del sistema de enlace satelital, se analiza considerando las limitaciones de la visualización del satélite, que se estima que serán de aproximadamente cuatro veces por día, con una duración de alrededor de cinco minutos por pasada.

1.5 Objetivos específicos

Para la integración y funcionamiento del sistema de comunicación, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Calibrar e instalar antena UHF en el edificio de la Facultad de Ingeniería.
- Montar y configurar un transceptor de radioaficionado en UHF.
- Integrar un servidor de recepción con protocolo AX25, vinculado al transceptor.
- Configurar el servidor de recepción de datos para su envío y publicación en la web.
- Validar el sistema mediante la recepción de paquetes AX25 de un satélite público y/o desde el prototipo de comunicaciones del Pehuensat, desarrollado en otro PIP [12]

2 Marco Teórico

El presente capítulo establece el marco teórico para comprender los conceptos satelitales principales y su interrelación para cumplir con los objetivos planteados. Se comienza introduciendo las definiciones básicas del sistema satelital y se continúa con los parámetros necesarios a tener en cuenta para la implementación final de la estación terrena.

2.1 Conceptos de la comunicación satelital

Un sistema de comunicación satelital, independientemente de su escala o aplicación, es una arquitectura compleja que se descompone funcionalmente en dos áreas o segmentos principales e interdependientes: el segmento espacial y el segmento terrestre (figura 2.1). La correcta operación del sistema depende de la interacción armoniosa entre estos componentes [10]

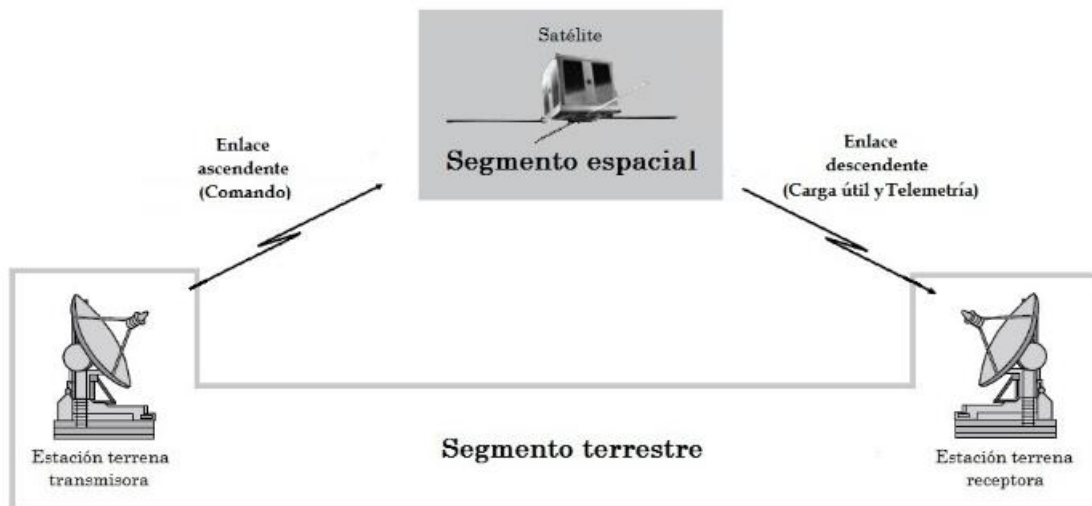


Figura 2-1: Segmentos de un sistema de comunicación en satélites

2.1.1 Segmento Espacial

El segmento espacial consiste en el satélite o la constelación de satélites que se encuentran en órbita alrededor de la Tierra que actúan a modo de puntos o nodos en el espacio, enviando la señal de comunicación de un terminal satelital a un punto de destino final o intermedio en la superficie de la tierra, estableciendo el puente de comunicación entre puntos distantes de la superficie terrestre. En la actualidad, algunos satélites que cuentan con características de procesado a bordo y comunicaciones intersatelitales son más costosos y de gran tamaño debido al incremento en el número de subsistemas [6].

El equipo del segmento espacial que transporta el satélite se puede clasificar en dos áreas funcionales: el bus y la carga útil.

El bus: se refiere a la estructura básica del satélite y a los subsistemas que lo sustentan. Comprende todos los subsistemas de soporte que permiten que la carga útil opere correctamente. Los subsistemas del bus son: la estructura física, el subsistema de potencia, el subsistema de control de actitud y orbital, el subsistema de control térmico, y el subsistema de comando, telemetría y seguimiento. Este último se encarga de monitorizar el estado del satélite (telemetría), permitir su localización (seguimiento) y recibir órdenes desde tierra (telecomando).

La carga útil: Es el equipo que proporciona el o los servicios previstos para cumplir la misión del satélite. La carga útil de un satélite de comunicaciones consiste en el equipo que proporciona el enlace de retransmisión entre los enlaces ascendente y descendente desde tierra. La carga útil de comunicaciones puede dividirse a su vez en los subsistemas del transpondedor y la antena, necesarios para recibir, procesar y retransmitir las señales [10].

Es decir, que las funciones de carga útil corresponden a la información del usuario que será transportada a través del sistema, mientras que las de bus incluyen mecanismos de control y soporte necesarios para el funcionamiento del satélite. En el contexto de este proyecto, el segmento espacial está constituido por el picosatélite **Pehuensat III**. Su carga útil es el transpondedor diseñado para la recolección de datos de sensores IoT, mientras que su subsistema TTC es el responsable de transmitir la telemetría sobre el estado del satélite, señal que la estación terrena objeto de este trabajo está diseñada para recibir.

2.1.2 Segmento Terrestre

El segmento terrestre abarca todas las estaciones o nodos de recepción en la superficie terrestre, utilizadas para la comunicación con los satélites, necesarias para operar y controlar el segmento espacial, así como para gestionar la red de comunicaciones. Sus componentes principales son los centros de control de misión y las estaciones terrenas:

Centro de Control de Misión MCC (Mission Control Center): Es el cerebro de las operaciones, donde se monitorizan los datos de telemetría, analizan la salud y la trayectoria del satélite, y planifican y ejecutan los comandos que se enviarán.

Estaciones Terrenas (Ground Stations): Son la interfaz de radiofrecuencia con el satélite. Las estaciones terrenas del segmento de control están equipadas con grandes antenas, transmisores de alta potencia y receptores de alta sensibilidad para ejecutar las funciones de TTC. Este término de estación terrena se asocia con cualquier terminal de comunicación con satélites sin importar si se encuentra estático o en movimiento, y se considera pieza fundamental en los modelos de comunicación tanto de subida como de bajada, ya sea para recibir o transmitir una señal [6]

El proyecto desarrollado en este trabajo, consiste precisamente en la creación de un componente fundamental del segmento terrestre. Aunque de bajo costo y orientada a un entorno académico, su función es análoga a la de las grandes estaciones comerciales: establecer un enlace de RF con el segmento espacial para recibir los datos de bajada (downlink), la telemetría y carga útil de IoT, y potencialmente, enviar comandos de subida (uplink). La robustez y fiabilidad de este enlace son determinantes para el éxito de la misión.

2.1.3 Frecuencias de comunicación entre segmentos

El enlace de comunicación entre los extremos del segmento terrestre (estación) y del segmento espacial (satélite), se establece mediante la radiación de ondas electromagnética (OEM) que se propagan a través del espacio, dirigidas en haces de mayor a menor concentración. Estas transmisiones se realizan en bandas específicas del espectro radioeléctrico, el cual se regula internacionalmente para garantizar la coexistencia ordenada de distintos servicios de telecomunicaciones, por la Unión Internacional de Telecomunicaciones [9].

La frecuencia de operación es quizás un factor determinante en el diseño y el rendimiento de un enlace de comunicaciones por satélite. La longitud de onda de la señal de la trayectoria en espacio libre es el parámetro principal que determina los efectos de la interacción con la atmósfera y las consiguientes degradaciones de la trayectoria del enlace. Además, el diseñador de sistemas satelitales debe operar dentro de las limitaciones de las regulaciones internacionales y nacionales relacionadas con la elección de la frecuencia de operación de la trayectoria en espacio libre [10]

Se han utilizado comúnmente dos métodos diferentes de designación para definir las bandas de radiofrecuencia. Las designaciones de bandas con letras, derivadas de las aplicaciones de radar

en la década de 1940, dividen el espectro de 1 a 300 GHz en ocho bandas con rangos de frecuencia nominales. La banda K se divide a su vez en banda KU (K-inferior) y banda KA (K-superior). Los límites de las bandas no siempre se respetan, y a menudo se observa cierta superposición. La ambigüedad en la designación de las bandas con letras sugiere que deben usarse con precaución, especialmente cuando la frecuencia específica es un factor importante.

Una segunda designación divide el espectro de 3 Hz a 300 GHz en bandas basadas en pasos de décadas de longitud de onda nominal (tabla 2.1). Esta designación es menos ambigua que la designación por letras; la mayoría de los enlaces de comunicaciones por satélite operan solo en tres o cuatro bandas, de VHF (Very High Frequency, muy alta frecuencia) a EHF (extremadamente alta frecuencia).

<u>Frequency</u>	<u>Wavelength</u>		
3 Hz	10^8 m	→	VLF Very Low Frequency
30 kHz	10^4 m	→	LF Low Frequency
300 kHz	10^3 m	→	MF Medium Frequency
3 MHz	10^2 m	→	HF High Frequency
30 MHz	10 m	→	VHF Very High Frequency
300 MHz	1 m	→	UHF Ultrahigh Frequency
3 GHz	10 cm	→	SHF Super High Frequency
30 GHz	1 cm	→	EHF Extremely High Frequency
300 GHz	1 mm	→	

Tabla 2-1: Bandas de frecuencias designados por longitud de onda

En general, las designaciones de bandas de frecuencia son útiles cuando interesan las características generales de los sistemas de comunicaciones por satélite. Sin embargo, cuando la frecuencia portadora operativa específica o la banda de frecuencia específica son importantes, la mejor solución es especificar la frecuencia directamente, en lugar de utilizar designaciones de bandas de frecuencia [10].

Las bandas de frecuencia utilizadas en el servicio de radiocomunicación se extienden desde frecuencias inferiores a 1KHz hasta los 300 GHz. En particular, para el uso de radioaficionados, se ha destinado la banda UHF en torno a los 435 MHz, la cual forma parte del segmento asignado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU (International Telecommunication Union) para servicios espaciales de radioaficionados [7] y por ello es la frecuencia utilizada en el Pehuensat III.

La selección de la banda de frecuencia para un sistema de comunicación por satélite es una de las decisiones de diseño más fundamentales, ya que tiene implicaciones directas en el rendimiento del enlace, el costo y la complejidad tanto del segmento espacial como del segmento terreno.

Cada banda de frecuencia posee características únicas en cuanto a la propagación de las ondas y sus pérdidas (atenuaciones), el tamaño físico de los componentes (especialmente las antenas) y la capacidad de ancho de banda. Junto con las características del satélite, como su misión, tamaño y distancia a la estación, son factores determinantes al momento de calcular el presupuesto de enlace.

2.2 Clasificación de satélites y órbitas

Los satélites artificiales pueden clasificarse según diversos criterios, entre los cuales se destacan: su función, grado de autonomía, tipo de órbita, tamaño y masa. En el marco del presente proyecto, el Pehuensat III se describe como satélite pasivo y se hace énfasis en la clasificación orbital, ya que esta determina la distancia del enlace, el tiempo de visibilidad desde estaciones terrenas, y características técnicas de la comunicación. [17]

2.2.1 Satélites activos y pasivos

Los satélites, desde el punto de vista funcional, se dividen en satélites pasivos y activos:

Satélites pasivos: simplemente reflejan una señal de regreso a la tierra, sin procesarla ni amplificarla, es decir, sin que haya dispositivos de ganancia a bordo, para amplificar o repetir la señal. Una ventaja de los satélites pasivos es que no requiere de equipo electrónico sofisticado a bordo, aunque no necesariamente están sin potencia. Si bien no requieren electrónica compleja a bordo, pueden incluir transmisores guía no modulados para propósitos de rastreo y alineación de antenas. Una guía es una portadora no modulada transmitiendo continuamente, a la cual una estación terrestre se puede unir y usar, para alinear sus antenas o para determinar la ubicación exacta del satélite.

Satélites activos: Son los que, de manera electrónica, reciben, amplifican y retransmiten señales hacia la Tierra. Son los más utilizados en aplicaciones de comunicaciones debido a su capacidad para mejorar la calidad y el alcance de los enlaces repite una señal a la Tierra [17]

2.2.2 Clasificación por masa y tamaño

Los satélites pueden clasificarse en función de su masa y tamaño, lo que influye en sus capacidades y aplicaciones. Una clasificación detallada de los satélites por su masa, según la NASA [14], es la siguiente:

- Satélites de Grande Porte: Con una masa mayor a 1000 kg.
- Satélites de Mediano Porte: Se encuentran en el rango de 180 a 1000 kg
- Satélites de Pequeño Porte: Esta categoría general abarca desde 0,1 kg hasta 180 kg.

Dentro de los satélites de pequeño porte, se subdividen en:

- Minisatélites: Con una masa entre 100 y 180 Kg

- Microsatélite: Con una masa entre 10 y 100 Kg
- Nanosatélite: Con una masa entre 1 y 10 Kg
- Picosatélite: Con una masa menor a un 1Kg

Los CubeSat son un tipo específico de satélites de pequeño porte, clasificados como pico/nanosatélites. Su tamaño se estandariza en "unidades" (U): Un CubeSat de 1U tiene una forma cúbica con dimensiones de 10 cm de lado y una masa de hasta 1 kg. Los CubeSats más grandes conservan este patrón, aumentando el número de unidades, como los tamaños 3U, 6U, 12U y 27U (figura 2.2). El estándar CubeSat, desarrollado por el California Polytech. Institute, especifica sus dimensiones, peso y centro de masa, así como las restricciones iniciales de operación y comunicación para minimizar complicaciones con el vehículo de lanzamiento. Los CubeSats que son más grandes conservan este patrón, simplemente, aumentando el número de unidades. El programa CubeSat tiene objetivo que las misiones espaciales se concluyan en dos años o menos, lo que permite a los estudiantes participar en el ciclo de vida completo de la misión con el fin de cumplir el proceso completo junto a la misión espacial, especialmente en: Planificación de la misión y de los requisitos, proyecto, análisis y pruebas., fabricación, montaje y control de calidad, integración y pruebas del sistema, operación del satélite vía estación terrena.

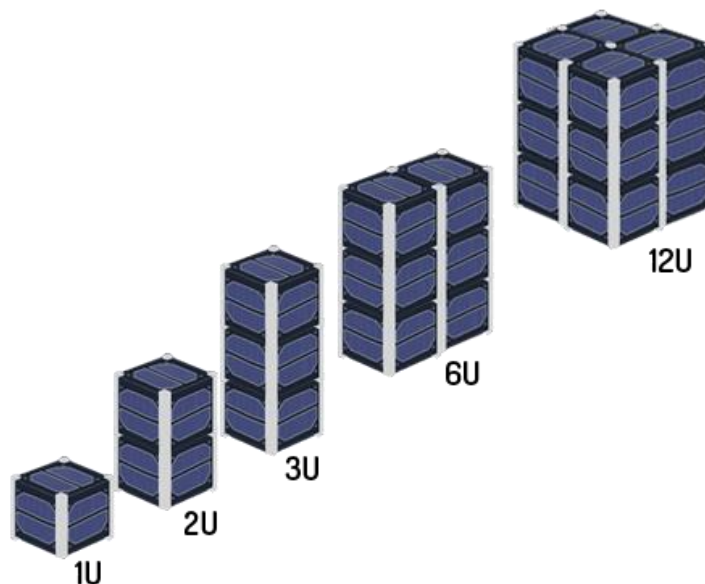


Figura 2-2: Cubesat con diferentes modulaciones (U)

2.2.3 Clasificación de órbitas

La órbita de un satélite es su trayectoria alrededor de un cuerpo celeste, en este caso, la Tierra. Con todas las posibles combinaciones de parámetros orbitales disponibles para el diseño de satélites, se puede utilizar una lista casi infinita de órbitas posibles. La experiencia ha reducido la lista de órbitas de uso común para satélites de comunicaciones, sensores y científicos, según la distancia a la tierra en: Órbita geoestacionaria (GEO), Órbita terrestre media MEO y Órbita terrestre baja LEO [10]

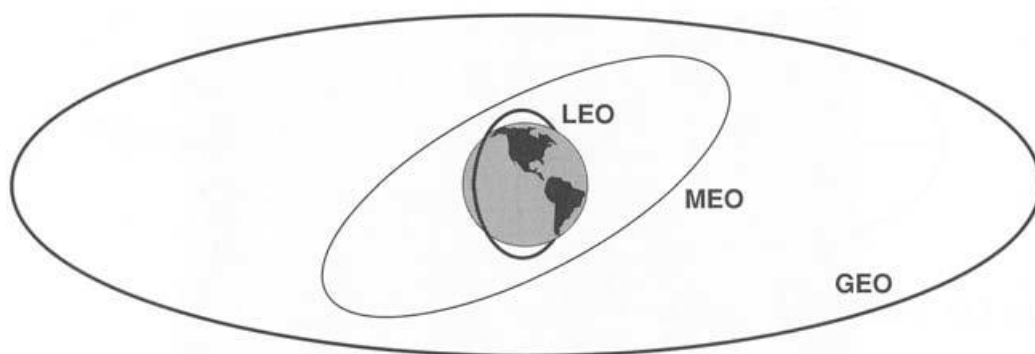


Figura 2-3: Órbitas satelitales LEO, MEO y GEO

Adicionalmente, según su sincronía con la rotación terrestre, las órbitas pueden ser: Síncronas, cuando el satélite mantiene una posición relativa fija respecto a la superficie terrestre; o no síncronas, cuando el satélite se desplaza constantemente sobre distintas regiones del planeta. Estas últimas requieren estaciones terrestres equipadas con sistemas de seguimiento activo, ya que cada pasada es visible solo durante breves intervalos (usualmente entre 5 y 10 minutos).

Las principales características de cada órbita son:

Órbita geoestacionaria (GEO): Ubicado a una altitud precisa de 35,786 km sobre el ecuador terrestre. El período de revolución de un satélite geoestacionario es idéntico al período de rotación de la Tierra, aproximadamente 24 hs. Esto significa que rota a la misma velocidad angular que la Tierra, haciendo que parezca estar en una posición fija en el cielo desde la perspectiva de un observador en tierra. Son ampliamente utilizadas para servicios de comunicación por satélite, especialmente para la difusión de televisión, ya que proporcionan una cobertura permanente de la zona de interés y minimizan los costos al no requerir seguimiento continuo por parte de las antenas terrestres [5].

- **Ventajas:** Su principal ventaja es que elimina la necesidad de sistemas de seguimiento complejos en las estaciones terrenas; una antena puede apuntarse una vez y permanecer fija. Proporciona una cobertura continua sobre una vasta área (aproximadamente un tercio de la superficie terrestre).
- **Desventajas:** La gran altitud implica un retardo de propagación significativo (alrededor de 250 milisegundos en un viaje de ida y vuelta), lo que la hace inadecuada para aplicaciones en tiempo real. Además, las pérdidas por espacio libre (FSPL) son enormes, lo que exige transmisores de alta potencia en el satélite y antenas de gran tamaño en tierra. El costo de lanzamiento a esta altitud es también prohibitivo para misiones de bajo presupuesto.
- **Aplicaciones Típicas:** Radiodifusión de televisión, retransmisión de comunicaciones troncales y satélites meteorológicos.

Dentro de las órbitas no geoestacionarias se incluye cualquier órbita con un período de revolución más corto que 24 horas, por lo que los satélites en estas órbitas parecen moverse con respecto un punto fijo de la tierra. la gestión de señales en estas constelaciones puede ser más compleja debido a la necesidad de transferir señales entre satélites a medida que se mueven [15]. se dividen comúnmente en:

Órbita terrestre media (MEO): Se sitúan entre los 2.000 y 35.000 km. Tienen una duración de 1 a 2 horas por pasada para un terminal terrestre. Se utiliza para aplicaciones meteorológicas, de teledetección y de localización de posición. Con constelaciones de entre 10 y 15 satélites, se garantiza una cobertura global continua, lo que permite comunicaciones globales en tiempo real [13].

- **Ventajas:** Ofrecen un compromiso entre la baja latencia de LEO y la amplia cobertura de GEO. Se necesita una constelación de satélites (usualmente de 8 a 20) para proporcionar una cobertura global continua.
- **Desventajas:** Requieren estaciones terrenas con antenas de seguimiento y complejos mecanismos de "handover" para pasar la comunicación de un satélite que se oculta en el horizonte a otro que aparece.
- **Aplicaciones Típicas:** Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) como GPS (EE. UU.), GLONASS (Rusia) y Galileo (Europa).

Órbita terrestre baja (LEO): Satélites ubicados entre los 200 y 2.000 km de altitud. Presentan cortos períodos orbitales (alrededor de 90 minutos), comunicaciones de baja latencia y menor requerimiento energético. El retardo es bajo, de unos milisegundos, sin embargo, el satélite se mueve por el cielo y la estación terrestre debe rastrearlo activamente para mantener las comunicaciones. Son ideales para misiones científicas y observación terrestre. Debido a las ventajas relacionadas a costos, el Pehuensat III pertenecerá a esta categoría [10]. Es la órbita de elección para la gran mayoría de las misiones de observación de la Tierra, científicas y, crucialmente, para los Cubesat como Pehuensat III.

- **Ventajas:** La baja altitud resulta en bajas pérdidas por espacio libre, lo que permite el uso de transmisores de baja potencia en el satélite y antenas más pequeñas en tierra. El retardo de la señal es mínimo (del orden de milisegundos), lo que es ideal para aplicaciones de datos. El costo de lanzamiento es significativamente menor en comparación con MEO o GEO.
- **Desventajas:** Estas ventajas vienen acompañadas de desafíos operativos significativos que impactan directamente en el diseño de la estación terrena:
 - Visibilidad Limitada: Un satélite LEO solo es visible desde una estación terrena durante "pases" cortos y predecibles, que típicamente duran entre 10 y 15 minutos.
 - Necesidad de Seguimiento Activo: Debido al rápido movimiento aparente del satélite a través del cielo, la estación terrena debe estar equipada con un sistema de rotor de dos ejes (Azimut-Elevación) para mantener la antena apuntada con precisión durante todo el pase.
 - Efecto Doppler Pronunciado: La alta velocidad relativa causa un corrimiento de frecuencia Doppler muy significativo, que debe ser compensado activamente por el receptor de la estación terrena para no perder el enlace.

En la tabla 2.1 se resumen las características de los tipos de satélites mencionados

Parámetro	LEO	MEO	GEO
Altura típica	200 – 2,000 km	2,000 – 35,786 km	≈ 35,786 km
Tiempo orbital	90 – 120 minutos	2 – 12 horas	24 horas
Cobertura	Limitada (regional)	Regional – casi global	Global (1/3 Tierra)
Latencia	Muy baja (10–50 ms)	Media (50–150 ms)	Alta (≈ 250–600 ms)
Seguimiento	Requiere seguimiento activo	Parcial según altura	No requiere (fijo respecto a Tierra)
Ventajas	Baja latencia Ideal para IoT y observación terrestre	Buen compromiso entre cobertura y latencia. Útil en navegación y comunicaciones regionales	Cobertura continua. Ideal para TV, meteorología y enlaces fijos
Desventajas	Requiere constelaciones. Más enlaces cruzados y estaciones terrenas	Latencia aún perceptible. Más costoso que LEO	Alta latencia. Alto costo de lanzamiento. No cubre polos

Tabla 2-2: Características de los satélites LEO, MEO y GEO

2.2.4 Justificación de elecciones del Pehuensat III

La mayoría de los satélites mencionados en este trabajo, se encuentran en la categoría de satélites orbitales no sincrónicos. Estos giran alrededor de la Tierra en un patrón elíptico o circular de baja altitud. Si el satélite está girando en la misma dirección que la rotación de la Tierra y a una velocidad angular superior a la de la Tierra, la órbita se llama órbita programada. Si el satélite está girando en la dirección opuesta a la rotación de la Tierra o en la misma dirección, pero a una velocidad angular menor a la de la Tierra, la órbita se llama órbita retrógrada. En consecuencia, los satélites no sincrónicos están alejándose continuamente o cayendo a la Tierra y no permanecen estacionarios con relación a ningún punto en particular de la Tierra. Por lo tanto, los satélites no sincrónicos pueden utilizarse solo cuando están disponibles, lo cual puede ser un corto período de tiempo, como por ejemplo 10 minutos por cada revolución al planeta. Otra desventaja de los satélites orbitales es la necesidad de un equipo complicado y costoso para el rastreo en las estaciones terrestres. Cada estación terrestre debe localizar el satélite conforme esté disponible en cada órbita y después unir su antena al satélite y localizarlo cuando pase por arriba. Una gran ventaja de los satélites orbitales es que los motores de propulsión no se requieren a bordo de los satélites para mantenerlos en sus órbitas

respectivas, lo que los hace más sencillos y baratos de construir; además, debido a la altura de su órbita, el lanzamiento de este tipo de satélites resulta de bajo costo.

El Pehuensat III es un **picosatélite tipo CubeSat 1U**, de aproximadamente 1 kg y 10 cm de lado. Este formato, ampliamente adoptado en el ámbito académico, permite reducir costos y simplificar su integración, facilita el lanzamiento compartido con otros satélites, y permite experimentar con nuevas tecnologías en un entorno real de operación, entre otras ventajas anteriormente mencionadas, siendo ideal para proyectos académicos y científicos de bajo presupuesto.

El uso de picosatélites permite una democratización del acceso al espacio. Su bajo costo total (tanto de construcción como de lanzamiento), los convierte en una solución atractiva para universidades y centros de investigación. Además, es común que algunos picosatélites sin sistema de control de actitud se integren a misiones compartidas con satélites mayores que sí poseen estabilización, beneficiándose de su orientación.

Otra razón por la cual se construyen estos pequeños satélites es que disminuyen los costos globales del proyecto, ya que tanto el gasto en materiales como el gasto del lanzamiento es considerablemente menor, más si consideramos que el destino es una órbita de tipo LEO. Esta gran ventaja económica permite que este tipo de satélites sea ideal para que entidades, como por ejemplo universidades, diseñen sus propios proyectos y los puedan poner a prueba en el espacio [17].

La elección de la órbita es una decisión de diseño de misión de primer orden, ya que determina la cobertura del satélite, el retardo de la señal, la potencia de transmisión requerida y, de manera fundamental para esta tesis, los requerimientos de seguimiento de la estación terrena.

La elección de que Pehuensat III opera en una órbita LEO responde a múltiples ventajas: menor retardo de comunicación, mayor velocidad de desplazamiento angular generando múltiples pasadas diarias sobre un mismo punto, menor costo de lanzamiento y menor exigencia energética para la transmisión de datos, reducción significativa del costo de inserción orbital, aspectos fundamentales en misiones con limitaciones de potencia y autonomía.

Por lo tanto, el diseño de la estación terrena de este proyecto está fundamentalmente impulsado por los desafíos inherentes a esta clase de órbita. La selección de un rotor de seguimiento, una

antena directiva y un receptor capaz de corregir el Doppler son requisitos indispensables impuestos por la física de la órbita LEO.

2.3 Codificación de la señal: Modulaciones digitales y protocolos

Los satélites, envían y reciben información mediante ondas electromagnéticas, las cuales constituyen el medio físico del enlace de comunicación. Estas señales se generan a partir de diferentes tipos de modulación, tanto analógicas como digitales, que permiten adaptar la señal de banda base para su transmisión eficiente a través del canal satelital. En esta sección se examinan las técnicas que permiten transportar estas señales, adaptando sus características a las limitaciones del canal de comunicaciones satelitales. Estas limitaciones son, básicamente, la potencia y el ancho de banda. El objetivo es lograr un equilibrio óptimo, proporcionando la máxima capacidad con el mínimo coste del sistema. [13]

2.3.1 Modulaciones

Las señales satelitales se generan a partir de diferentes técnicas de modulación, cuyo objetivo es adaptar la información (voz, datos o video) a una portadora de radiofrecuencia para su transmisión. En el ámbito de las modulaciones analógicas, la AM (Amplitud Modulada), varia la amplitud de la portadora en función de la señal de información, y en la FM (Frecuencia Modulada), lo que se modifica es su frecuencia de la portadora.

La FM se utilizó ampliamente en las comunicaciones satelitales para telefonía y transmisiones de video en sistemas analógicos de primera generación, muchos de los cuales aún se utilizan. Esta modulación ofrece una mejor relación señal-ruido que la AM porque, es relativamente inmune a las degradaciones de amplitud en el canal de transmisión, y además, la reducción de ruido mejorada es inherente a las características de ruido de fase de la FM. La conversión de voltaje a frecuencia de la FM resulta en una expansión del ancho de banda del canal de RF (radio frecuencia), lo cual puede compensarse con un mejor rendimiento de la relación señal-ruido en la banda base.

En sistemas que emplean en la operación la modulación en frecuencia (FM), por ejemplo, la codificación de datos se introduce en la señal mediante variación de tonos de audiofrecuencia, que se utilizan para modular la portadora. Este método, conocido como manipulación por desplazamiento de audiofrecuencia AFSK (Audio Frequency Shift Keying) utiliza dos tonos distintos, uno con mayor frecuencia (más agudo) que representa un bit lógico "1", frente a otro de menor frecuencia (más grave) que representa el bit "0" lógico.

Por otra parte, en las modulaciones digitales, que son las predominantes en las telecomunicaciones modernas, se incluyen la Modulación por desplazamiento de frecuencia FSK (Frequency Shift Keying), utilizada en sistemas de telemetría y enlaces de baja velocidad; la modulación por desplazamiento de fase PSK (Phase Shift Keying), común en comunicaciones satelitales por su eficiencia espectral y resistencia al ruido; y la modulación de amplitud en cuadratura QAM (Quadrature Amplitude Modulation), que combina variaciones de amplitud y fase para transmitir múltiples bits por símbolo, siendo habitual en enlaces de alta capacidad y transmisión de datos de banda ancha.

2.3.2 Protocolo AX.25

En las comunicaciones digitales, especialmente en contextos de enlaces satelitales, el uso de protocolos de comunicación es fundamental para garantizar una transmisión ordenada, confiable y eficiente. Estos protocolos establecen las reglas, estructuras y mecanismos necesarios para el intercambio de datos entre emisores y receptores. Su importancia se acentúa en entornos con condiciones de canal desafiantes, como los enlaces de radiofrecuencia, donde la integridad de la señal puede verse afectada por ruido, interferencias y pérdidas de propagación.

En el contexto de los pequeños satélites, como el Pehuensat III, uno de los protocolos más utilizados es el AX.25. Fue desarrollado en 1970 y se basó en el conocido protocolo para redes inalámbricas X.25. Debido a la diferencia del medio físico de transmisión (de inalámbrica a inalámbrica) y a los diferentes esquemas de direccionamiento, el protocolo X.25 fue modificado para ajustarse a las necesidades de Packet Radio. AX.25 incluye la posibilidad de un campo repetidor que permite a otras estaciones repetir automáticamente los paquetes para extender el alcance. Una ventaja de X.25 es que cada paquete enviado contiene la identificación de la estación emisora del mismo, con lo que cada transmisión puede ser identificada. Además de AX.25, existen otros estándares de protocolo para Packet Radio como el conocido TCP/IP

El AX.25 encapsula los datos en tramas estructuradas que incluyen campos específicos: dirección, control, identificador de protocolo (PID), información útil y una suma de verificación (FCS) para la detección y corrección de errores. Este protocolo soporta tanto comunicaciones conectadas, con acuse de recibo, como no conectadas, mediante tramas de tipo UI (Unnumbered Information), ampliamente utilizadas en aplicaciones satelitales y sistemas de telemetría [19]. Su simplicidad, eficiencia y compatibilidad con diversos sistemas de hardware y software lo

convierten en una opción ideal para dispositivos embebidos de bajo consumo, como los CubeSats [16]. Entre las aplicaciones más relevantes que emplean el protocolo AX.25 destacan dos sistemas principales: Packet Radio y el Sistema Automático de Reporte de Paquetes (APRS, por sus siglas en inglés).

Actualmente, dos de los sistemas más empleados en comunicaciones satelitales de radioaficionados son Packet Radio y APRS (Automatic Packet Reporting System). Ambos se basan en el uso de AX.25 para el encapsulamiento de datos.

2.3.3 Packet Radio y APRS

El Packet Radio (envío de paquetes por radio) constituye una técnica de transmisión de datos digitales que utiliza el protocolo AX.25 para encapsular y enviar información entre estaciones de radio. Desarrollada a comienzos de la década de 1980, este sistema posibilitó la creación de redes de comunicación de datos descentralizadas entre radioaficionados, estaciones base y repetidores digitales (*digipeaters*).

El principio de funcionamiento de Packet Radio se basa en el envío de información mediante **paquetes discretos**, es decir, fragmentos de datos transmitidos en ráfagas cortas. Cada paquete contiene tanto la información útil como los datos de control y verificación de errores, lo que garantiza una comunicación confiable incluso en entornos con ruido o limitaciones de ancho de banda. Asimismo, los paquetes se almacenan temporalmente en colas de transmisión hasta que el canal esté disponible, optimizando la utilización del espectro radioeléctrico y permitiendo el acceso múltiple por parte de diversos usuarios.

Para su implementación práctica, cada estación emplea un Controlador de Nodo Terminal (TNC, Terminal Node Controller), que actúa como interfaz entre la computadora y el transceptor de radio. Este dispositivo se encarga de modular y demodular las señales, gestionar el protocolo AX.25 y coordinar la transmisión y recepción de datos, permitiendo de este modo el intercambio de información entre computadoras mediante ondas de radio [2].

Dentro del ecosistema de Packet Radio, se destaca el Sistema Automático de Reporte de Paquetes (APRS, Automatic Packet Reporting System), una aplicación avanzada que permite el intercambio en tiempo real de información de interés local o global. El APRS posibilita la

transmisión de datos tales como posiciones GPS, mensajes cortos, telemetría, reportes meteorológicos y alertas operativas, entre otros [3].

El sistema APRS opera habitualmente en una frecuencia única compartida, donde las estaciones locales retransmiten los paquetes mediante digipeaters, garantizando una amplia cobertura regional. Adicionalmente, los datos pueden ser integrados al Sistema de Internet APRS (APRS-IS) a través de estaciones receptoras conectadas a Internet (IGates), que redistribuyen la información de manera global. Esto permite la visualización en tiempo real de estaciones, trayectorias, objetos, telemetría y condiciones ambientales a través de plataformas web o software cartográfico especializado.

Debido a su eficiencia, robustez y bajo requerimiento de recursos, el APRS se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en proyectos educativos, misiones experimentales y satélites de tipo CubeSat, ya que posibilita el monitoreo en tiempo real, la transmisión de telemetría básica y la comunicación bidireccional entre estaciones terrestres y espaciales [3].

2.4 Propagación de ondas en el Enlace Satelital

En esta sección se comienza por analizar las fuentes de atenuación y degradación de la señal para poder cuantificar como afectan al enlace satelital. A partir de la cuantificación de los mecanismos que generan estas pérdidas, y la posición del satélite, se describe la ecuación del presupuesto de enlace, calculo necesario para determinar la factibilidad y rendimiento del enlace a partir de parámetros de calidad de la señal.

2.4.1 Pérdida por espacio libre L_{FS}

La componente dominante en la pérdida de fuerza de la señal es la perdida por espacio libre L_{FS} (Lost Free Space). Se define como la pérdida a la que experimenta una onda electromagnética cuando esta se irradia en línea recta por el espacio libre. La señal no sufre de algún otro fenómeno como la reflexión o absorción, en realidad, no se pierde energía alguna, simplemente que esta energía se dispersa alejándose de la fuente principal. Representa la atenuación que sufre una señal al expandirse esféricamente desde la fuente. Aunque no se produce una pérdida real de energía, esta se dispersa al expandirse esféricamente desde la fuente, lo que reduce la densidad de potencia en el receptor.

La dispersión de la onda produce una reducción en la intensidad de la señal recibida, esta pérdida está directamente relacionada con la frecuencia de operación (f) y la distancia (d) entre los terminales del enlace (transmisor y receptor).

La fórmula que permite calcular la pérdida L_{FS} , expresada en decibelios, es:

$$L_{FS} = 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(4\pi/c) \quad (2.1)$$

$$L_{FS} = 20 \log_{10}(d[\text{m}]) + 20 \log_{10}(f[\text{Hz}]) - 147.55 \quad (2.2)$$

Donde:

- d : distancia entre antenas (en metros)
- f : frecuencia (en Hz)
- c : velocidad de la luz ($\approx 3 \times 10^8$ m/s)

Si se opera con la f expresada en MHz y d en Km, la formula resulta:

$$L_{FS} = 20\log_{10}(d[\text{Km}]) + 20\log_{10}(f[\text{MHz}]) + 92,45 \quad (2.3)$$

2.4.2 Pérdidas atmosféricas y locales

Además de la pérdida por espacio libre, las señales experimentan atenuaciones adicionales debido a la interacción con las capas de la atmósfera terrestre, especialmente la ionosfera y la troposfera. A diferentes frecuencias se produce mayor o menor penetración en las distintas capas debido a mecanismos de propagación como absorción (amplitud), dispersión, refracción, difracción, etc. Parámetros que se pueden medir y observar su diferenciación durante la propagación.

Las ondas de radio que viajan entre satélites y estaciones terrestres deben atravesar la ionosfera. La ionosfera es la región superior de la atmósfera terrestre, ionizada principalmente por la radiación solar. Los electrones libres en la ionosfera no se distribuyen uniformemente, sino que se forman en capas. Además, las nubes de electrones (conocidas como perturbaciones ionosféricas viajeras) pueden atravesar la ionosfera y dar lugar a fluctuaciones en la señal que solo pueden determinarse estadísticamente. Los efectos incluyen centelleo, absorción, variación en la dirección de llegada, retardo de propagación, dispersión, cambio de frecuencia y rotación de polarización (rotación de Faraday).

Todos estos efectos disminuyen al aumentar la frecuencia, la mayoría en proporción inversa al cuadrado de la frecuencia, y solo la rotación de polarización y los efectos de centelleo son de mayor importancia para las comunicaciones por satélite. Los centelleos ionosféricos son variaciones en la amplitud, fase, polarización o ángulo de llegada de las ondas de radio. Son causados por irregularidades en la ionosfera que cambian con el tiempo. El principal efecto de los centelleos es el desvanecimiento de la señal. Estos desvanecimientos pueden ser bastante graves y durar hasta varios minutos. Al igual que con los desvanecimientos causados por centelleos atmosféricos, puede ser necesario incluir un margen de desvanecimiento en los cálculos del balance de potencia del enlace para tener en cuenta el centelleo ionosférico [4].

Por otro lado, los efectos locales incluyen obstáculos físicos próximos a la estación terrena, como edificaciones, árboles o montañas, y también fuentes de interferencia provenientes de emisores terrestres cercanos. Si bien estos factores tienen mayor relevancia en sistemas móviles

terrestres, en el contexto satelital su impacto suele ser mínimo, salvo en zonas urbanas densamente edificadas. Para las comunicaciones satelitales en general este efecto puede ser ignorado si se garantiza una línea de vista despejada hacia el satélite.

2.4.3 Análisis de pérdidas

Existen pérdidas adicionales que, aunque no siempre implican reducción directa de potencia, pueden afectar la calidad del enlace. Entre ellas se destacan el desvanecimiento (fading) por variaciones rápidas e impredecibles en la intensidad de la señal, pérdidas por desajuste de polarización, y ruido térmico, tanto en el espacio como en los componentes electrónicos del receptor.

Estos factores causantes de la degradación de la señal transmitida pueden ser, algunos constantes, otros dependientes de información estadística y otros varían de acuerdo a condiciones atmosféricas. En la tabla 2.2 se pretende dar una síntesis clara de los mayores impedimentos que esta clase de comunicación puede sufrir [18]

Categoría Principal	Subcategoría		Tipo de pérdida
PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN	Pérdidas en espacio libre		Dispersión
	Pérdidas atmosféricas	Efectos ionosféricos	Rotación de Faraday
			Centelleo ionosférico
			Atenuación total atmosférica
		Efectos troposféricos	Atenuación por lluvia
	Absorción por gases		
	Despolarización		
	Ruido del cielo		
PÉRDIDAS LOCALES	Perdidas locales	Pérdidas en equipos de recepción	Desalineación de antena
			Pérdidas en el alimentador, conectores
	Pérdidas de interferencias del entorno		

Tabla 2-3: Síntesis de pérdidas

Durante este proyecto se analizan de forma detallada estas pérdidas en orden de determinar y justificar todos los valores adquiridos en el cálculo del presupuesto de enlace y contrarrestar

estos efectos. Se incorporan **márgenes de enlace adecuados**, teniendo en cuenta la localización geográfica y las condiciones climáticas promedio.

Finalmente, el análisis de pérdidas permite establecer los requerimientos de ganancia y directividad de las antenas a utilizar, parámetros fundamentales que se determinan cuantificando la ecuación de enlace satelital a partir del recorrido de la onda.

2.4.4 Trayectoria de la onda

La posición del satélite constituye un parámetro fundamental para determinar la trayectoria y distancia que recorrerá la onda durante la comunicación. Además, su seguimiento ayuda a mantener la continuidad del enlace de radiofrecuencia evitando la necesidad de mayor potencia, especialmente en órbitas bajas (LEO), donde el desplazamiento angular relativo es elevado y las ventanas de comunicación son de corta duración.

Los satélites artificiales en órbita terrestre se definen por seis elementos orbitales, conocidos como el conjunto de elementos keplerianos. el cálculo de posición y trayectoria se basa en estos elementos que describen de forma matemática la órbita de un cuerpo alrededor de la Tierra. Sin embargo, debido a perturbaciones gravitatorias, arrastre atmosférico y efectos de radiación solar, las órbitas reales se modelan mediante algoritmos de propagación como SGP4, ampliamente adoptado en la comunidad espacial [4].

Estos algoritmos se alimentan del formato estándar de elementos de dos líneas TLE (Two-Line Element), que resume los parámetros orbitales actualizados de cada satélite (figura 2.4). El conjunto TLE incluye los seis parámetros keplerianos necesarios, así como la hora de referencia o época. Estos son publicados por organismos internacionales (como el USSTRATCOM) y pueden obtenerse en plataformas como CelesTrak.

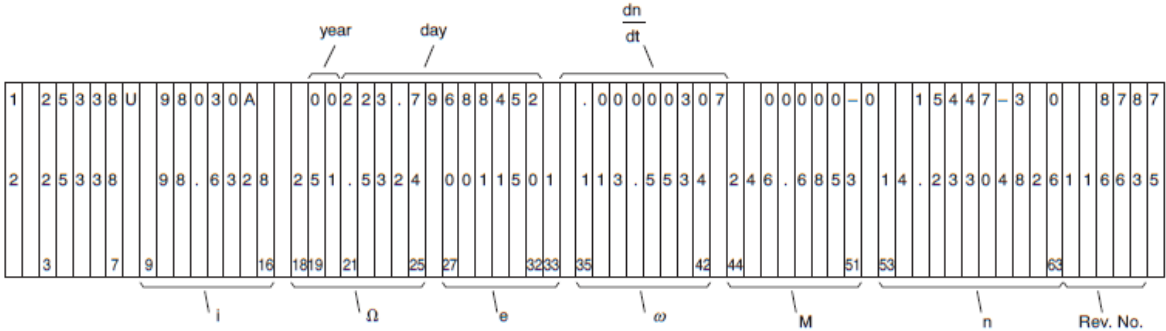


Figura 2-4: TLE para NOAA-15

A partir de estos datos, el software de predicción convierte las coordenadas orbitales geocéntricas en parámetros de apuntamiento locales, utilizándolos para determinar la Trayectoria, y ubicación calculando: azimut, elevación y rango (figura 2.5)

- **Azimut (Az):** define la dirección horizontal de apuntamiento de la antena respecto al Norte geográfico.
- **Elevación (El):** indica el ángulo vertical desde el horizonte hasta la línea de visión del satélite.
- **Rango (Slant Range):** representa la distancia en línea recta entre la estación y el satélite, variando durante cada pase y determinando las pérdidas por espacio libre en el presupuesto de enlace.

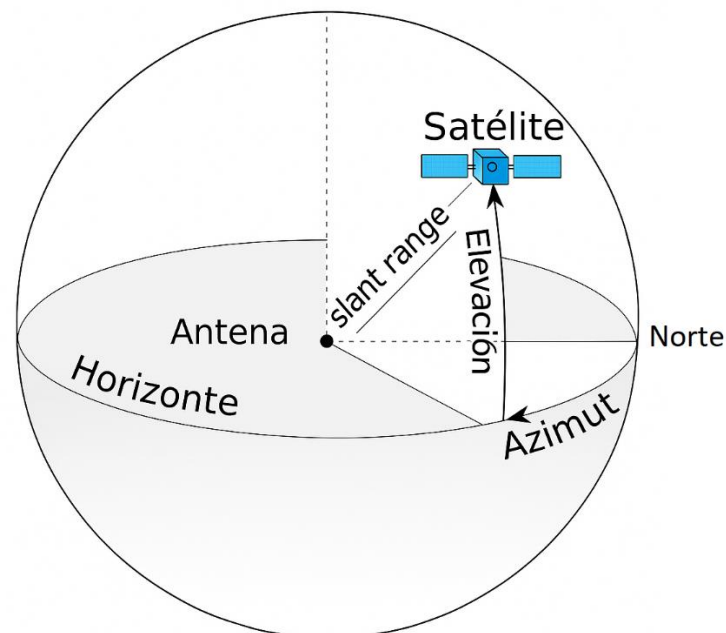


Figura 2-5: Coordenadas orbitales del satélite

Cada pase se caracteriza por tres eventos principales (Figura 2.6):

- Adquisición de señal *AOS* (Acquisition of Signal): instante en que la elevación del satélite cruza el umbral mínimo (típicamente 0°) en ascenso apareciendo sobre el horizonte y comienza la visibilidad.
- Máxima Elevación: punto de mayor altura angular alcanzada durante el pase.
- Pérdida de señal *LOS* (Loss of Signal): instante en que la elevación cruza nuevamente el umbral en descenso descendiendo nuevamente bajo el horizonte.

Maxima elevación

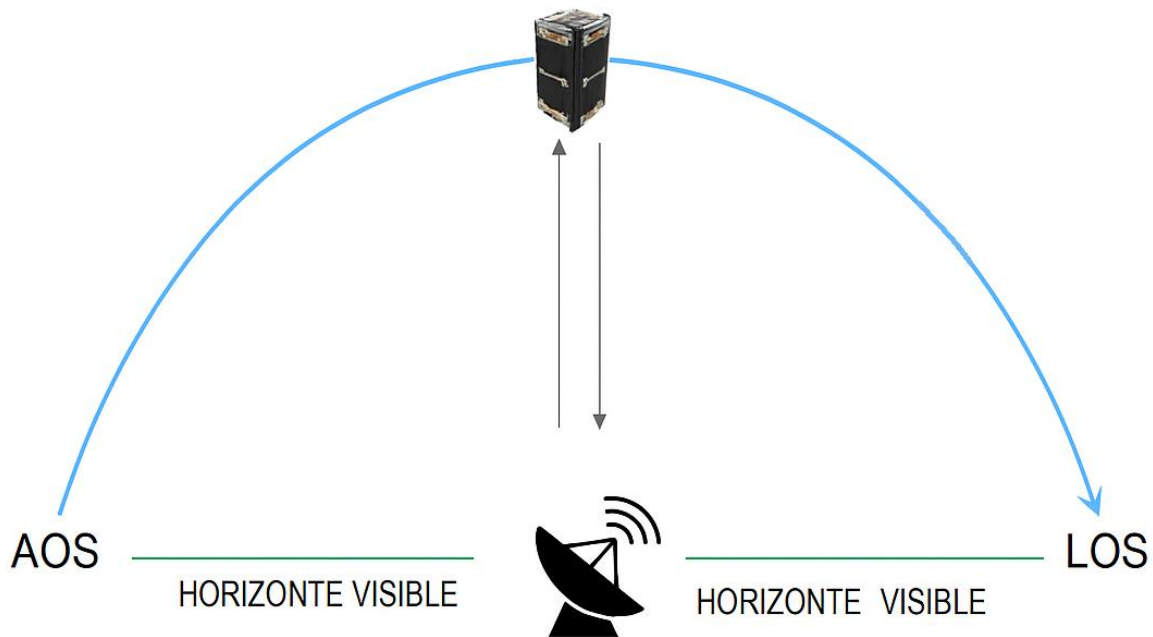


Figura 2-6: Eventos de pases satelitales

El cálculo y obtención de todos estos parámetros mediante un software de seguimiento que implemente SGP4, es requisito para realizar el cálculo de presupuesto de enlace y conocer las ventanas de visibilidad, proporcionando los tiempos de *AOS* y *LOS*, que pueden emplearse para la activación y desactivación automática de la cadena de recepción y transmisión, garantizando una operación eficiente y desatendida.

2.4.5 Presupuesto del enlace

Uno de los aspectos más críticos en el diseño de un enlace satelital, es el cálculo del presupuesto del enlace. Este cálculo permite determinar si la señal recibida por la estación terrena será lo suficientemente fuerte como para ser decodificada adecuadamente, teniendo en cuenta durante el periodo que se desea establecer la comunicación, la frecuencia de operación, las distancias involucradas, las ganancias en cada extremo, así como la atenuación sufrida durante la propagación. Las pérdidas que se presentan diversas formas afectando la calidad y confiabilidad del enlace, pueden ser constantes, estadísticas o dependientes del entorno, y deben ser cuidadosamente evaluadas en el diseño del sistema para garantizar una comunicación robusta y continua. Entre estas, la predominante es la pérdida por espacio libre.

El cálculo presupuesto del enlace permite estimar la potencia recibida en cada extremo de la comunicación, identificar los márgenes de enlace disponibles, y determinar si el sistema puede operar dentro de los límites requeridos para garantizar la integridad del flujo de información. A continuación, se analizan, cada uno de los factores que influyen en la calidad del enlace satelital.

La potencia recibida por una antena receptora ubicada a una distancia R de la antena transmisora, con un área de apertura efectiva $A_{R\text{ef}}$ (figura 2.7), está descrita por la ecuación 2.4 [20].

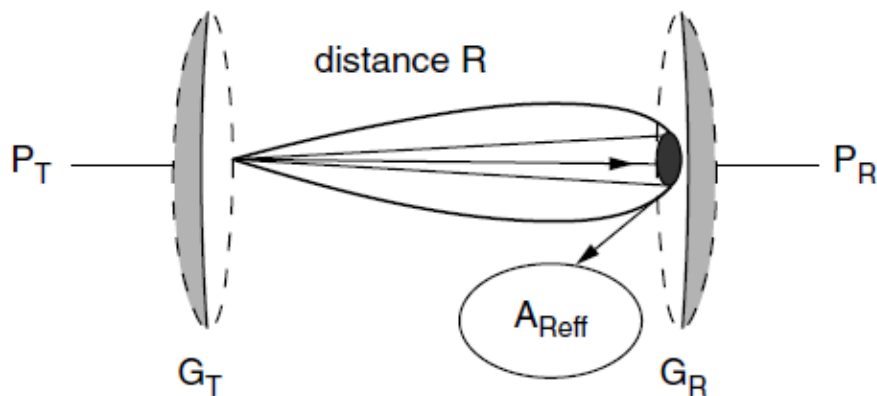


Figura 2-7: área efectiva de recepción

$$P_R = \Phi \cdot A_{R\text{ef}} = (P_T \cdot G_T / 4\pi R^2) \cdot (G_R / (4\pi / \lambda^2)) \text{ [Watts]} \quad (2.4)$$

$$P_R = (P_T \cdot G_T) (\lambda / 4\pi R)^2 \cdot G_R \text{ [Watts]} \quad (2.5)$$

$$P_R = (P_T \cdot G_T) (1 / L_{\text{FS}}) \cdot G_R \text{ [Watts]} \quad (2.6)$$

Donde:

- P_T : Potencia transmitida (W)
- G_T : Ganancia de la antena transmisora (adimensional)
- G_R : Ganancia de la antena receptora (adimensional)
- λ : Longitud de onda de la señal (m)
- R : Distancia entre transmisor y receptor (m)
- L_{FS} : Pérdida por espacio libre (Free Space Loss)
- $A_{R\text{ef}}$: Área efectiva de la antena receptora (m^2)
- Φ : Densidad de potencia en el espacio libre (W/m^2)

El producto $P_T \cdot G_T$ se denomina *PIRE* (potencia radiada isotrópica efectiva) o *EIRP* (Effective Isotropic Radiated Power). Por otra parte, $L_{FS} = (4\pi R/\lambda)^2$ es la pérdida en espacio libre entre las potencias recibida y transmitida en un enlace entre las dos antenas isotrópicas.

Expresando la ecuación 2.6 en función de la EIRP, G_R y L_{FS} , queda:

$$P_R = EIRP \cdot G_R \cdot (1/L_{FS}) \quad (2.7)$$

Expresando la ecuación 2.7 en dB, se obtiene:

$$P_R[\text{dBW}] = PIRE [\text{dBW}] + G_R [\text{dB}] - L_{FS} [\text{dB}] \quad (2.8)$$

Según la ecuación 2.8, la potencia recibida (en condiciones ideales) es por lo tanto la suma de la PIRE, la ganancia de la antena receptora G_R , menos la pérdida de trayectoria por espacio libre L_{FS} . Aun así, la pérdida L_{FS} sería el único factor de degradación de la señal transmitida en un escenario ideal, es decir, el vacío perfecto, un medio sin ruido y sin absorción. En la práctica, existen múltiples fuentes adicionales de pérdida que deben considerarse para obtener un modelo realista del enlace. Es necesario, tener en cuenta pérdidas adicionales debidas a diversas causas descritas anteriormente. Estas pérdidas adicionales pueden agruparse en dos grandes categorías:

Pérdidas atmosféricas [L_{Atm}]: comprenden la absorción por gases atmosféricos, la atenuación por lluvia y niebla, y otras pérdidas debido a la interacción con las capas de la atmósfera. Se pueden expresar como:

$$L_{Atm} = L_{abs} + L_{lluvia} + L_{niebla} \quad (2.9)$$

Pérdidas del sistema [L_{Sist}]: incluyen factores como desalineación de antenas, pérdidas por polarización cruzada, centelleo ionosférico, pérdidas por cableado y conexiones, entre otros. Se agrupan de la siguiente manera:

$$L_{Sist} = L_{far} + L_{cent} + L_{pol} \quad (2.10)$$

Se añade entonces a la ecuación de enlace (2.8) estos factores adicionales (2.9 y 2.10) para representar los variados factores de pérdidas obteniendo la ecuación completa del enlace (en dB) que queda expresada como:

$$P_R = EIRP + G_R - L_{FS} - L_{Atm} - L_{Sist} \quad (2.11)$$

2.4.6 Desempeño del enlace

El desempeño de un sistema de comunicaciones satelitales depende tanto de las características físicas (del canal y las antenas) como de parámetros que cuantifican la calidad del enlace, entre los que destacan: la temperatura de ruido del sistema, la relación señal-ruido y el margen de enlace. Estos parámetros permiten evaluar si la señal transmitida puede ser recibida y decodificada correctamente bajo distintas condiciones operativas.

La temperatura de ruido total (T) representa el ruido equivalente que afecta la señal recibida e integra las contribuciones del entorno, del alimentador y del propio receptor. Se calcula como:

$$T = \frac{T_A}{L_{FRX}} + T_F \left(1 - \frac{1}{L_{FRX}}\right) + T_{eRX} \quad (2.12)$$

donde:

- T_A : temperatura de ruido captada por la antena
- T_F : temperatura del alimentador
- T_{eRX} : temperatura equivalente del receptor
- L_{FRX} : pérdidas en el alimentador de recepción

A partir de este valor se determina la densidad espectral de ruido térmico $N_0 = kT$ siendo k la constante de Boltzmann, fundamental para los cálculos del presupuesto de enlace.

La relación señal a ruido (C/N) indica la calidad del enlace recibido. Se puede expresar como relación directa con el nivel de ruido:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{C}{kT} \quad (2.13)$$

Y se puede calcular en dB como:

$$\frac{C}{N_0} = EIRP - L_{FS} + \frac{G}{T} - 10 \log(k) \quad (2.14)$$

Donde:

- EIRP: potencia isotrópica radiada efectiva del transmisor
- L_{FS} : pérdida por espacio libre
- G/T: figura de mérito del receptor (ganancia sobre temperatura de ruido)
- K: constante de Boltzmann

El valor de C/N_0 permite derivar el C/N , teniendo en cuenta el ancho de banda B del receptor:

$$\frac{C}{N} = \frac{C}{N_0 \cdot B} \quad (2.15)$$

Este parámetro permite determinar si la señal recibida alcanza la calidad necesaria para una correcta demodulación.

El margen de enlace (M) indica la capacidad del sistema para sostener la comunicación ante degradaciones del canal o imprecisiones de cálculo. Se define como:

$$M = \left(\frac{C}{N_0} \right)_{\text{medido}} - \left(\frac{C}{N_0} \right)_{\text{mínimo requerido}} \quad (2.16)$$

Un margen positivo, típicamente superior a 3 dB, asegura una comunicación confiable ante atenuaciones atmosféricas, interferencias o desalineaciones. Valores inferiores pueden comprometer la tasa de error (BER) y la estabilidad del enlace.

3 Metodología y Desarrollo

En este capítulo se describe el diseño preliminar y desarrollo de la estación terrena. Se expone la metodología abordada investigando y analizando la funcionalidad de cada uno de sus subsistemas, los cuales dependen fundamentalmente del cálculo del presupuesto del enlace satelital. Las características orbitales, las condiciones atmosféricas del medio de propagación, junto con los demás factores técnicos descritos con anterioridad, son considerados en la justificación de la elección de los componentes y desarrollo de su interconexión, con el objetivo de establecer el enlace confiable y eficiente entre el satélite y la estación terrena.

3.1 Requerimientos de la estación

El objetivo principal del enlace es garantizar una transmisión y recepción confiable de datos entre el satélite Pehuensat III y la estación, que estará ubicada en la ciudad de Neuquén (Facultad de Ingeniería), para esto se realizan los cálculos para verificar su viabilidad.

3.1.1 Subsistemas principales

En un enlace satelital, la **estación terrena** constituye un componente esencial del **segmento terrestre de la misión espacial**. Es el conjunto de toda la infraestructura y los equipos de comunicación fijos o móviles que permiten comandar y rastrear un satélite, además de recibir y procesar su telemetría y distribuir la información a los operadores y usuarios finales. Es el primer y el último punto del enlace de comunicación, siendo crucial para el éxito de una misión. Por ello, luego de analizar los desafíos impuestos por la órbita del satélite y el medio de propagación, es necesario centrarse en la estructura funcional de dicha estación diseñada para superar estos desafíos.

Si bien las estaciones terrenas pueden variar significativamente en tamaño, costo y complejidad, todas comparten una arquitectura fundamental basada en un conjunto de subsistemas interconectados que cumplen funciones específicas para lograr el objetivo general de procesar la señal proveniente del satélite y enviada al mismo [15].

El propósito inicial es descomponer el sistema típico para comunicaciones con satélites LEO en subsistemas funcionales principales. Este análisis proporciona el marco metodológico que sustenta las decisiones de diseño y la elección de cada componente, que se aborda posteriormente.

La arquitectura general de una estación terrena se compone de varios elementos clave, interconectados para cumplir sus funciones y poder enviar y recibir la información. Estos son:

- Antenas (sistema irradiante): se puede considerar el componente principal de la estación terrestre, cuyas funciones pueden ser enviar y recibir la telemetría, telecomando, realizar seguimiento y enlaces de datos.
- Sistema de transmisión y recepción de RF (Radio Frecuencia): tiene la función de establecer la banda de frecuencia para transmitir y recibir vía RF desde la estación terrestre al satélite, filtrando y adaptando la señal.
- Sistemas de procesamiento digital: comprenden los dispositivos y software encargados de ejecutar tareas de control, adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos.
- Sistema de seguimiento (opcional): el fin de este sistema es mantener la antena apuntando en la dirección indicada de la ubicación del satélite. Se opta por este subsistema si la antena es muy directiva o si se desea tener un periodo de comunicación más amplio.

Las estaciones terrenas universitarias se diseñan principalmente para comunicarse con satélites desarrollados por estudiantes y/o profesores. El tamaño y la complejidad de la estación se establecerán por el servicio que desempeñará, las características operativas requeridas por el segmento espacial y, en nuestro caso en particular, por la disponibilidad y costos de los materiales. Las estaciones de estos proyectos se construyen con base a los conocimientos técnicos del servicio radioaficionado [11], realizando la comunicación en las bandas UHF y VHF, reguladas por International Amateur Radio Union (IARU) [7], y utilizando paquetes del protocolo de comunicación AX.25

En la Figura 3.1 se presenta por medio de diagrama de bloques, los subsistemas funcionales de una estación terrena genérica de bajo costo, capaz de operar en modo half-dúplex (transmitir o recibir en diferentes momentos dados). Esta arquitectura es representativa del sistema diseñado en este proyecto, centrándose en las funciones principales de cada componente, los parámetros relevantes de cada uno, y en las interconexiones entre ellos, mostrando el flujo de la señal de radiofrecuencia (RF).

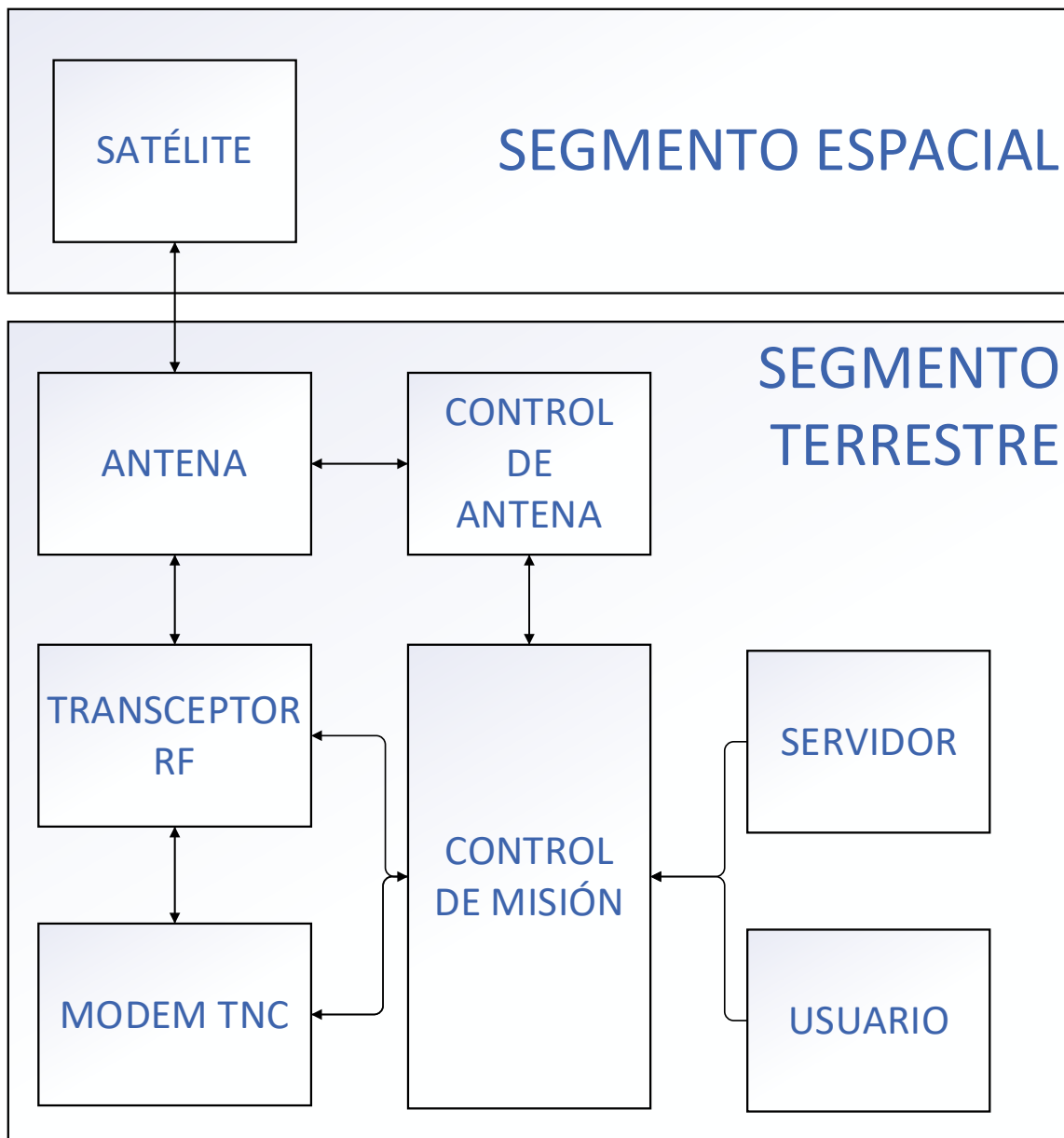


Figura 3-1: Diagrama de Bloques Funcional de una Estación Terrena de Bajo Costo

Esta arquitectura modular es la que se implementa en este proyecto, permitiendo una gran flexibilidad y un rendimiento robusto a un bajo costo permitiendo la evaluación posterior de la disponibilidad de componentes y su adaptación.

3.1.2 Distancia y tiempo de comunicación

La pérdida de trayectoria por espacio libre, depende de la distancia entre el satélite y la estación terrena, por ello es necesaria calcularla para obtener el resultado final de la ecuación de presupuesto de enlace. Esta línea de visión directa, denominada Slant Range, depende de los parámetros orbitales del satélite relativos a la posición geográfica de la estación terrena y, por

lo tanto, varía en función del tiempo y del ángulo de elevación. Si se considera una órbita circular, lo cual es habitual en satélites de órbita polar LEO, el Slant Range puede calcularse utilizando el uso de simple de principios básicos de trigonometría. La Figura 3.2 muestra el esquema geométrico considerado y los parámetros necesarios para su cálculo.

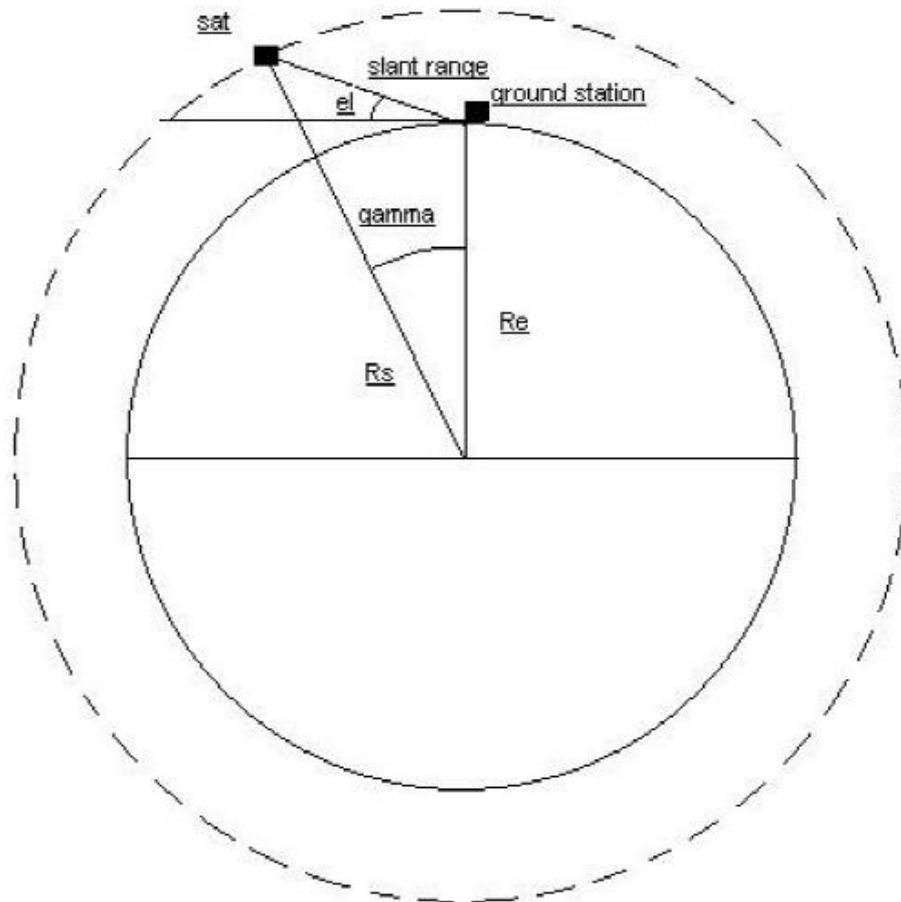


Figura 3-2: Parámetros utilizados en el cálculo del Slant Range

La expresión para obtener el Slant Range es la siguiente:

$$R = \sqrt{(R_e + h)^2 + R_e^2 - 2R_e(R_e + h)\cos \gamma} \quad (3.1)$$

Donde:

- R_e : radio de la Tierra (aproximadamente 6371 Km.)
- h : altura de la órbita (en LEO alrededor de 600 Km.)
- el : ángulo de elevación respecto al horizonte

Se puede calcular la relación entre γ y el ángulo de elevación “el” como:

$$(R_e + h) \cdot \cos \gamma = d \cdot \sin(el) + R_e \quad (3.2)$$

Luego, reorganizando, y al reconocer que la altitud de la órbita $h = R_s - R_e$, se obtiene el Slant Range (R) dado por:

$$R = R_e \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{R_e+h}{R_e}\right)^2 - \cos^2(el)} - \sin(el) \right] \quad (3.3)$$

Por otro lado, un satélite con órbita LEO, será visible desde la estación terrena durante un tiempo específico que dependerá de la altura orbital y del ángulo de elevación mínimo considerado desde la estación terrena. Reordenando la ecuación 3.3, se obtiene una expresión para el ángulo γ , que representa el ángulo central entre la línea imaginaria que conecta la estación terrena con el centro de la Tierra y la línea que conecta el satélite con el mismo centro.

$$\gamma = \arccos\left(\frac{R \cdot \sin(el) + R_e}{R_e + h}\right) \quad (3.4)$$

Este ángulo γ representa la mitad del arco visible desde la estación terrena, es decir, la porción del trayecto que el satélite recorre sobre la órbita circular durante la ventana de comunicación, y aplicando la tercera ley de Kepler, que permite calcular el período orbital [10], se obtiene:

$$T_{\text{visible}} = 2\gamma \cdot \sqrt{\frac{(R_e+h)^3}{\mu}} \quad (3.5)$$

Donde $\mu = 3,98 \times 10^5 \text{ Km}^3/\text{s}^2$ es la constante gravitacional estándar de Kepler.

En consecuencia, la distancia R y la ventana de comunicación T del satélite dependerá directamente de la altura orbital y del ángulo de elevación mínimo establecido. El valor exacto de la distancia y tiempo de visibilidad dependerá de la trayectoria relativa respecto a la estación y variará en cada pasada (y durante la misma). Para una órbita circular de 600 km, la distancia variará entre 600 y 2000 Km, y los pases típicamente alcanzan duraciones de 5 a 12 minutos.

Este es un aspecto a tener en cuenta como limitación al momento de evaluar el alcance de la cantidad de datos a transmitir y administrar la potencia necesaria para establecer la comunicación.

3.1.3 Cálculo del presupuesto de enlace

En el análisis del presupuesto de enlace, muchos parámetros permanecen constantes una vez definidos los componentes del sistema; sin embargo, la pérdida por espacio libre L_{FS} adquiere especial relevancia, ya que depende directamente de la frecuencia de operación (435 MHz) y de la distancia entre el satélite y la estación, variable durante cada pase en función de la geometría del enlace.

Recordando la fórmula para el cálculo de la pérdida L_{FS} en dB:

$$L_{FS} = 20 \cdot \log_{10}(d[\text{m}]) + 20 \cdot \log_{10}(f[\text{Hz}]) + 20 \cdot \log_{10}(4\pi/c) \quad (3.6)$$

$$L_{FS} = 20 \log_{10}(d[\text{m}]) + 20 \log_{10}(f[\text{Hz}]) - 147.55 \quad (3.7)$$

Donde:

- d: Distancia entre antenas (en m)
- f: Frecuencia (en Hz)
- c: Velocidad de la luz ($\approx 3 \times 10^8$ m/s)

En los cálculos del presupuesto de enlace de este proyecto se toma como referencia el enlace descendente, en el cual la antena terrestre actúa como receptora y la antena del satélite como transmisora. Se evalúa la potencia transmitida en el punto de máxima elevación (paso cenital), correspondiente a un pase directamente sobre la estación terrena ubicada en Neuquén, condición que representa la menor distancia y, por tanto, la menor atenuación del enlace.

A partir de este punto de referencia, se analiza la variación de la potencia extra necesaria en función del aumento de la distancia durante el pase, lo que permite determinar el alcance máximo efectivo de la comunicación y la ventana temporal de visibilidad asociada.

L_{FS} a 600 km (paso cenital):

$$L_{FS} = 20 \log_{10}(0,6 \times 10^6) + 20 \log_{10}(435 \times 10^6) - 147,55 \quad (3.8)$$

$$L_{FS} = 115,5 + 172,8 - 147,5 \quad (3.9)$$

$$L_{FS} = 140,8 \text{ dB} \quad (3.10)$$

Entonces en el escenario más optimista, la L_{FS} es aproximadamente 141 dB, valor que aumentará en función de la distancia (figura 3.3) y dependerá del ángulo de elevación (ϵ).

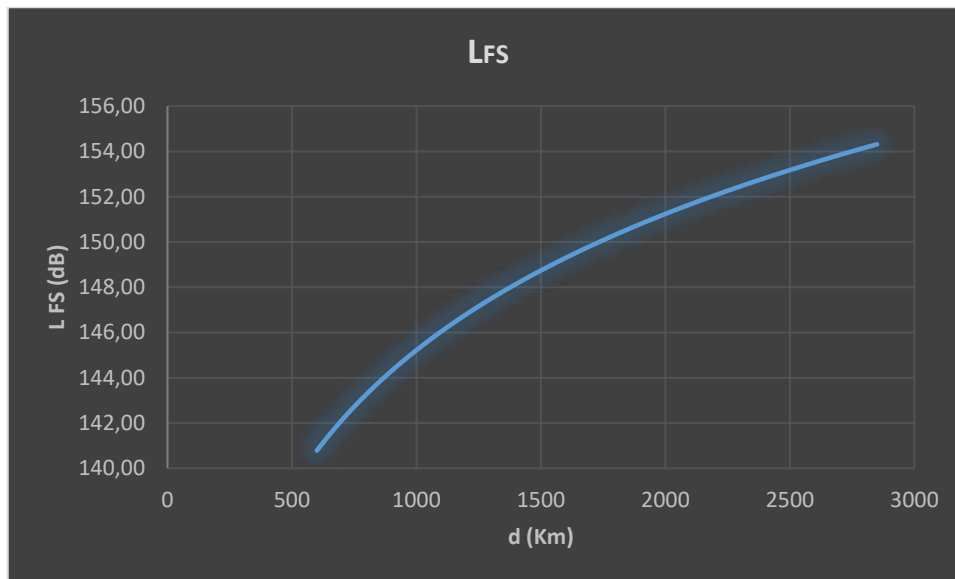


Figura 3-3: Variación L_{fs} con la distancia, para $f=435 \text{ MHz}$

En cuanto al resto de los parámetros de la ecuación del presupuesto de enlace, aquellos que contribuyen a la potencia total del sistema, se establecen como valores de diseño. Por su parte, las pérdidas se adoptan considerando un enfoque conservador, representativo de condiciones de peor caso, y se asumen constantes a lo largo del análisis. Cabe destacar que dichos valores constituyen referencias de cálculo y no necesariamente reflejan las condiciones reales de operación.

En la tabla 3.1 se presentan los parámetros físicos y técnicos más relevantes del presupuesto de enlace entre la estación terrena y el satélite Pehuensat III, junto con sus respectivos valores. Estos parámetros corresponden a un escenario de operación con el satélite a 600 km de altitud y utilizando el protocolo AX.25 sobre un canal AFSK, configurando la base para el cálculo final de la potencia recibida. Se considera que la sensibilidad del receptor (SNR) mínima requerida para AFSK a 1200 bps tomando un $\text{BER} \approx 10^{-3}$, lo que le permite tener un umbral aceptable para decodificación sin errores significativos, tiene un valor de -119 dB.

Parámetro	Símbolo	Valor
Frecuencia de operación	f	435 MHz
Distancia mínima al satélite	D	600 km
Potencia de transmisión del satélite (2 W)	P _t	33 dBm
Ganancia de antena satelital	G _t	3 dBi
Ganancia de antena terrena	G _r	10 dBi
Pérdidas por espacio libre	L _{FS}	141 dB
Atenuaciones atmosféricas (ionosféricas y troposféricas)	L _{Atm}	2 dB
Pérdidas por conectores y cableado	L _{Sist}	2 dB
Relación SNR (sensibilidad) mínima requerida para AX.25	S = C/N	-119 dB

Tabla 3-1: Valores de los parámetros del presupuesto de enlace

Con estos valores establecidos, se calcula la potencia recibida P_R mediante la ecuación general de presupuesto de enlace, expresada en dB:

$$P_R = P_T + G_T + G_R - L_{FS} - L_{ATM} - L_{SIST} \quad (3.11)$$

$$P_R = 33 \text{ dBm} + 3 \text{ dBi} + 10 \text{ dBi} - 141 \text{ dB} - 2 \text{ dB} - 2 \text{ dB} \quad (3.12)$$

$$P_R = -91 \text{ dB} \quad (3.13)$$

Este resultado indica que, con los valores asumidos, la señal recibida alcanza un valor de **-91 dBm**, nivel significativamente superior al umbral de sensibilidad del sistema AX.25 a 1200 (-119 dBm). Por lo tanto, el enlace cuenta con un margen de recepción de aproximadamente 28 dB, lo que garantiza una comunicación confiable incluso en escenarios de mayor distancia o pérdidas adicionales no previstas.

A partir de este resultado se definen los requerimientos mínimos para los componentes de la estación terrena y se valida la viabilidad del enlace.

Dado que la mayoría de los parámetros del enlace se mantienen constantes y la pérdida por espacio libre L_{FS} es la variable dominante con la distancia, la relación puede expresarse de forma analítica como:

$$P_R = 42 \text{ dB} - L_{FS} \quad (3.14)$$

Esta expresión permite representar, tanto analítica como gráficamente (figura 3.4), la variación de la potencia recibida a lo largo de la trayectoria del satélite, y a partir de ella, estimar los márgenes de enlace disponibles para distintas distancias durante una pasada (figura 3.5).

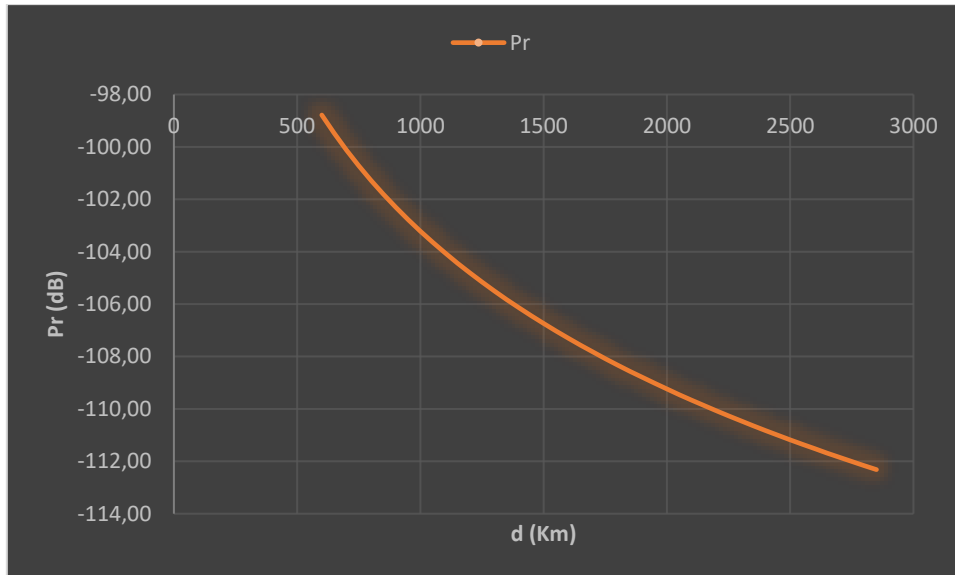


Figura 3-4: Variación libre P_R con la distancia

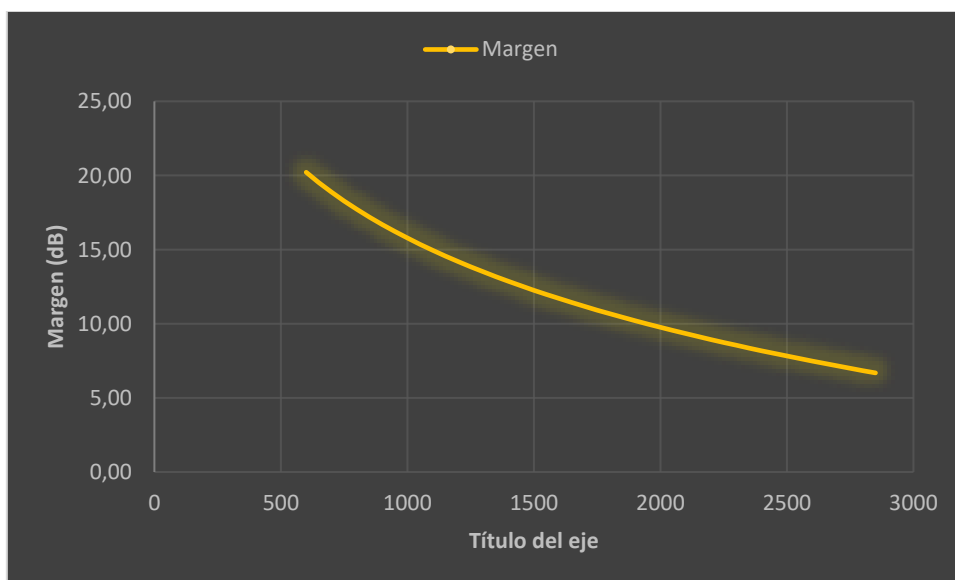


Figura 3-5: Variación del margen M (para AX25) con la distancia

El análisis gráfico permite visualizar el **margen de enlace disponible** a lo largo de toda la pasada, comparando la potencia recibida con el umbral de sensibilidad del sistema receptor (-119 dBm). Los valores superiores a 3 dB determinan los puntos de inicio y final de la

comunicación efectiva, delimitando la ventana temporal de contacto y garantizando la confiabilidad del canal y validando las decisiones de diseño adoptadas en cuanto a potencia de transmisión, ganancia de antenas para el tipo de modulación empleada (AFSK/AX.25).

3.1.4 Requerimientos funcionales de los componentes

La implementación de una estación terrena funcional, orientada tanto por los requerimientos del enlace ya definidos como por criterios de disponibilidad, costo, facilidad de integración y compatibilidad con los protocolos empleados (AX.25 en UHF) requiere de una selección rigurosa de componentes que aseguren la integridad y continuidad del enlace.

Cada subsistema de la estación, desde la antena encargada de la captación inicial de la señal, hasta el servidor responsable del almacenamiento, decodificación y análisis de los datos, cumple un rol específico en la cadena de comunicación. La adecuada elección e integración de estos elementos permite alcanzar un equilibrio entre rendimiento técnico, confiabilidad operativa y simplicidad constructiva, garantizando el funcionamiento sostenido de la estación y la viabilidad del enlace durante toda la ventana de comunicación.

Los criterios técnicos fundamentales que orientan la selección de los componentes se detallan a continuación:

Antena:

- **Ganancia (dBi):** fundamental para asegurar una adecuada relación señal/ruido (SNR) en la recepción de señales de baja potencia [15].
- **Directividad:** se priorizan configuraciones direccionales, tales como antenas Yagi o Moxon, para optimizar la captación en la trayectoria orbital y reducir la interferencia de señales externas.
- **Polarización y eficiencia:** la coincidencia entre la polarización de transmisión y recepción, junto con la eficiencia de radiación, son determinantes para minimizar pérdidas por desajuste y mitigar los efectos de propagación en el entorno ionosférico.

Transceptor:

- Rango de frecuencia: compatible con la banda UHF en 435 MHz que comunicará el Pehuensat III conforme a las asignaciones de la *International Amateur Radio Union (IARU)* para enlaces satelitales educativos y experimentales [2].
- Potencia de transmisión: adecuada para mantener la operación bidireccional en condiciones de enlace ascendentes (*uplink*) y descendentes (*downlink*).
- Estabilidad en frecuencia y selectividad: características críticas para evitar la degradación de señal causada por deriva de frecuencia, interferencias o ruido de canal, especialmente en entornos urbanos o electromagnéticamente ruidosos.

Servidor / Modem TNC:

- Compatibilidad de software: integración con el entorno de software utilizado para la comunicación, como *Direwolf*, *Soundmodem* o aplicaciones compatibles con sistemas SDR.
- Conectividad y escalabilidad: capacidad de gestión remota e integración con bases de datos o paneles de control, facilitando el registro y análisis continuo de la información recibida.
- Soporte para protocolo AX.25: requisito esencial para la correcta decodificación y enrutamiento de tramas, conforme al estándar de comunicación Packet Radio.
- Velocidad de transmisión: adaptable a la tasa de bits nominal del satélite (1200 bps en modulación AFSK).
- Interfaz PTT (Push-To-Talk): permite una conmutación eficiente entre los modos de transmisión y recepción, especialmente en estaciones operativas en modo *half-dúplex*.

La integración armónica de estos subsistemas (figura 3.6) constituye un aspecto fundamental en el diseño, ya que permite equilibrar el rendimiento eléctrico con la operatividad práctica y la estabilidad de comunicación. En las secciones siguientes se detallan analíticamente los componentes seleccionados para cada subsistema, junto con su justificación técnica y funcional.

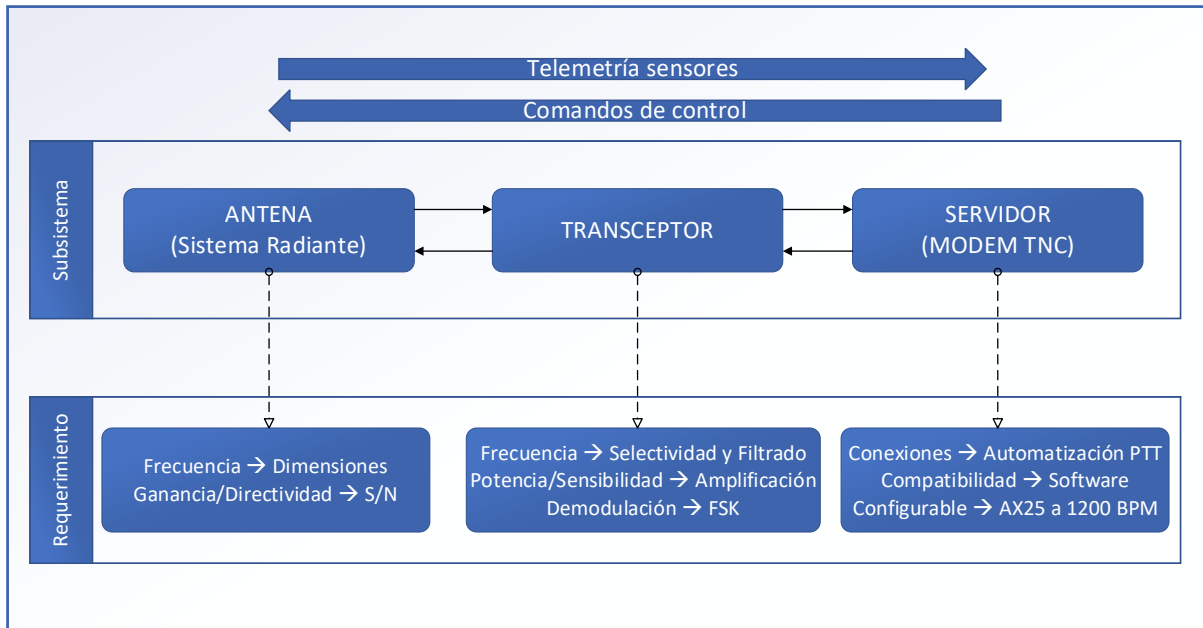


Figura 3-6: Diagrama de bloques de subsistemas de la estación terrena

3.2 Diseño de arquitectura de la Estación Terrena

3.2.1 Subsistema de Antena UHF y Montura

El subsistema de antena y su montura cumple una función esencial en la estación terrena, al combinar la capacidad de captación y radiación de señales con la necesidad de orientar mecánicamente el sistema hacia satélites en movimiento. Su desempeño influye directamente en la ganancia (G) y, en consecuencia, en la figura de mérito (G/T), parámetros determinantes para la calidad del enlace.

La antena actúa como transductor pasivo entre el espacio libre y la línea de transmisión, convirtiendo ondas electromagnéticas en señales eléctricas y viceversa. En aplicaciones de seguimiento de satélites LEO, resulta indispensable determinar su ganancia y directividad, que aseguran una mayor concentración de energía en la dirección deseada, así como la polarización, que debe ser compatible con la señal transmitida por el satélite. Por esta razón, en VHF/UHF suelen emplearse antenas de polarización circular, que ofrecen mayor inmunidad frente a la rotación de Faraday. Entre los diseños más utilizados destacan las antenas Yagi-Uda, las helicoidales y los arreglos de dipolos cruzados, cada uno con diferentes compromisos en ganancia, ancho de banda y complejidad mecánica.

Las antenas son un importante componente del sistema de comunicación, las cuales realizan las funciones primordiales de convertir la energía electromagnética del equipo transmisor, que viaja por la línea en energía electromagnética que se propaga en el espacio, adaptar la impedancia del generador a la impedancia del espacio, y captar de nuevo esa energía electromagnética en el espacio, para ser utilizada en el receptor. El sistema de antena es uno de los elementos más críticos del enlace, ya que su ganancia y directividad determinan en gran parte la eficiencia de la comunicación.

Hay una gran variedad de antenas en función de las aplicaciones a las que son destinadas, entre estas varía, además de la directividad y ganancia, el patrón de radiación y polarización, parámetros que también afectan el enlace.

En la tabla 3.2 se comparan estas características de las antenas usualmente utilizadas en las telecomunicaciones.

Tipo de Antena	Patrón de Radiación	Ganancia	Directividad	Polarización
Dipolo	Amplio	Baja	Baja	Lineal
Dipolo Multi-elemento	Amplio	Baja/Media	Baja	Lineal
Panel plano	Amplio	Media	Media/Alta	Lineal/Circular
Plato parabólico	Amplio	Alta	Alta	Lineal/Circular
Yagi	Estrecho	Media/Alta	Media/Alta	Lineal
Ranura	Amplio	Baja/Media	Baja/Media	Lineal
Microcinta	Estrecho	Media	Media	Lineal/Circular

Tabla 3-2: Tipos de antenas

Se analizan diferentes antenas disponibles en la universidad (Dipolos, Yagi-Uda y Moxon-Yagi, entre otras) mediante el generador de señales conectado a la antena y el analizador de espectro con una antena receptora. Rotando las antenas que transmiten la señal se verifica una alta ganancia en aquellas que son más directivas. Estas serán útiles únicamente en caso de realizar un traqueo que siga al satélite ya que de otra manera hay una fuerte disminución de la potencia por desapuntamiento.

Aun así, luego de tomar registro de las ganancias en un barrido de 360°, se observa que, si bien el espectro de potencias respeta la simetría esperada de las antenas, las mediciones son inestables y dependen fuertemente de la distancia y las reflexiones, haciendo que el patrón de radiación no está completamente formado con la distribución que se espera de estas antenas. Esto se debe a que la ganancia de una antena solo puede medirse con precisión cuando el punto de medición está lo suficientemente lejos para que el patrón de radiación esté completamente formado y la onda se comporte como una onda plana, a una distancia $R > 2 D^2/\lambda$ siendo D el largo de la antena. Sin embargo, dichas medidas son un punto de partida para verificar el

aumento de potencia entre una antena y otra, para luego evaluar la potencia de la antena seleccionada entre las analizadas en un campo lejano.

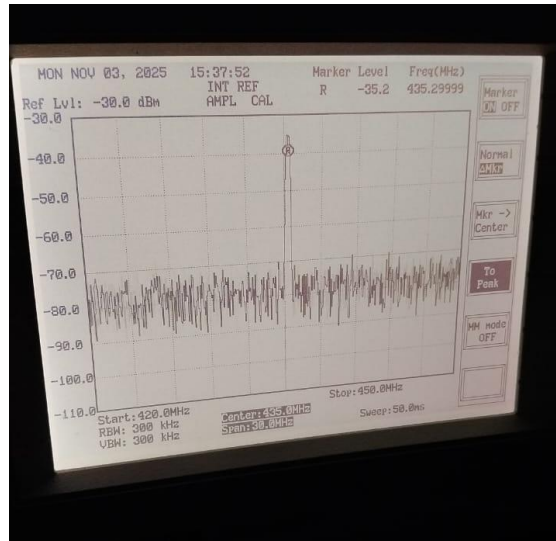


Figura 3-7: Analizador de espectro recibiendo señal de antena (435 MHz)

Finalizado el análisis de las diferentes configuraciones de antena, en la estación terrena se propone el uso de una antena Yagi, en la cual se regula la distancia entre elementos para transmitir y recibir la señal en la frecuencia de 435 MHz.

El diseño de una antena Yagi es crucialmente dependiente de las distancias y dimensiones de sus elementos, ya que opera como un arreglo de tipo radiación en la dirección del eje que se basa en el acoplamiento mutuo entre un elemento excitado (activo) y varios elementos parásitos (reflector y directores). Los elementos más críticos para el rendimiento, incluyendo la ganancia frontal, la ganancia trasera y la impedancia de entrada, son el tamaño y el espaciado de los directores.

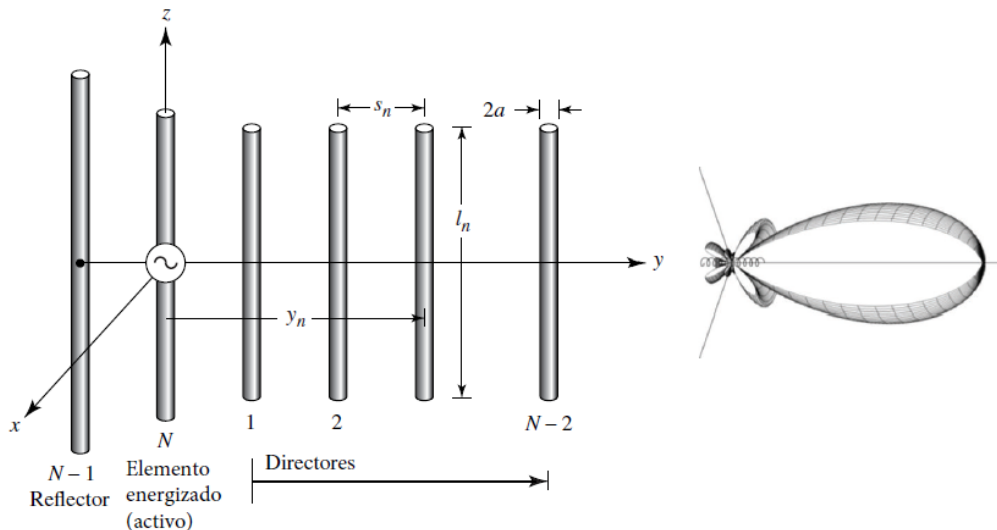


Figura 3-8: Diagrama de bloques de subsistemas de la estación

Para lograr la formación del haz de radiación longitudinal, los elementos parásitos en la dirección del haz son ligeramente menores que el elemento de alimentación (figura 3.6). Normalmente, el elemento accionado (activo) es resonante, con una longitud ligeramente inferior a $\lambda/2$ (normalmente $0.45-0.49\lambda$) mientras que las longitudes de los directores deben ser de aproximadamente $0,4$ a 0.45λ . Sin embargo, los directores no necesariamente tienen la misma longitud o diámetro. La separación entre los directores suele ser de $0,3 \lambda$ a $0,4\lambda$ y no es necesariamente uniforme para diseños óptimos. Se ha demostrado experimentalmente que, para un arreglo Yagi-Uda de longitud total de 6λ , la ganancia global fue independiente del espaciamiento del director hasta aproximadamente $0,3\lambda$. Se observó una caída significativa (5–7 dB) en la ganancia para espaciamientos de director mayores a $0,3\lambda$. Para esa antena, la ganancia también fue independiente de los radios de los directores hasta aproximadamente 0.024λ . La longitud del reflector es ligeramente mayor que la del alimentador. Además, la separación entre el elemento accionado y el reflector es ligeramente menor que la distancia entre el elemento accionado y el director más cercano, y se considera casi óptima a $0,25\lambda$ [2]

Basado en las distancias entre los elementos que optimizan la comunicación en términos de la longitud de onda de la señal de operación, se diseña una antena Yagi-Uda de cinco elementos destinada a las primeras pruebas de recepción. Las longitudes relativas de cada elemento, expresadas en múltiplos de λ (0,689 m), se definen de la siguiente manera:

- Reflector: $0,51 \lambda = 0,34$ m
- Dipolo activo: $0,48 \lambda = 0,32$ m

- Directores: $0,44 \lambda = 0,3 \text{ m}$

Estas dimensiones se toman como referencia para la construcción de la antena, partiendo de un dipolo activo con su reflector y añadiendo posteriormente los directores, con el objetivo de conformar una estructura Yagi-Uda optimizada para la frecuencia de operación.

Dado que nuestra antena será inferior a 6λ , se procede a optimizar su desempeño mediante el software MMANA-GAL, el cual permite modelar la disposición geométrica de los elementos (figura 3.9) y obtener parámetros electromagnéticos clave, como la Relación de Ondas Estacionarias (ROE), la ganancia directiva y la impedancia de entrada (Figura 3.10). Este entorno de simulación facilita el ajuste fino de las distancias y longitudes entre elementos, logrando un equilibrio entre directividad y adaptación de impedancia.

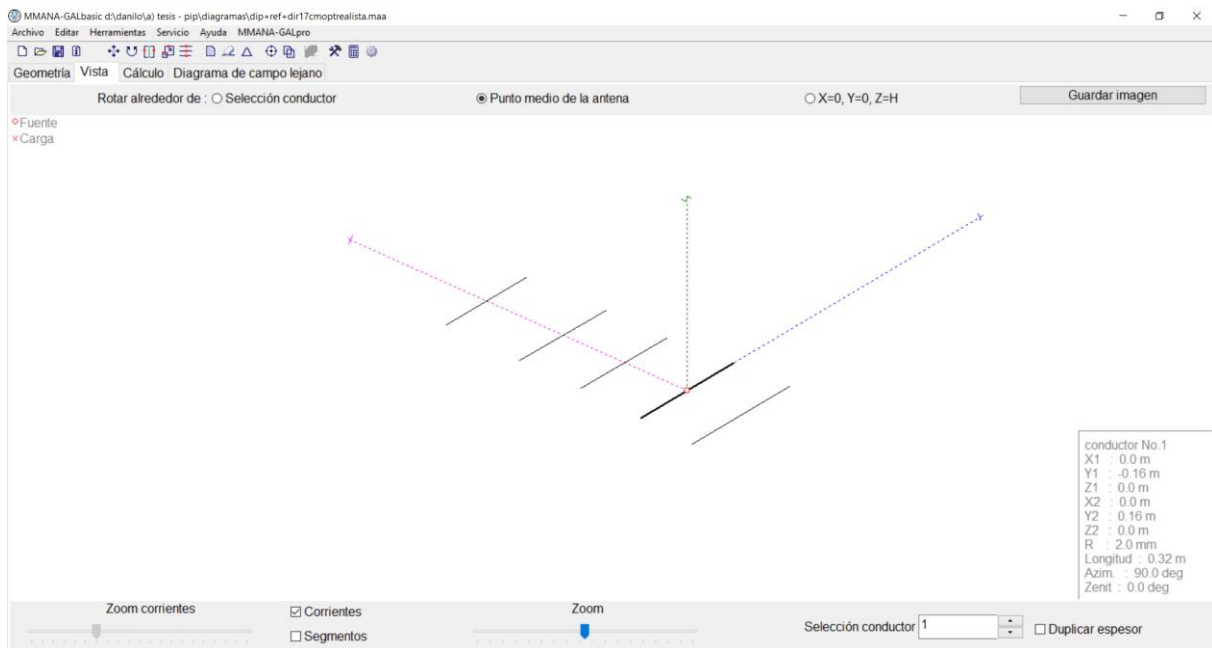


Figura 3-9: Modelado de antena Yagi mediante MMANA-GAL

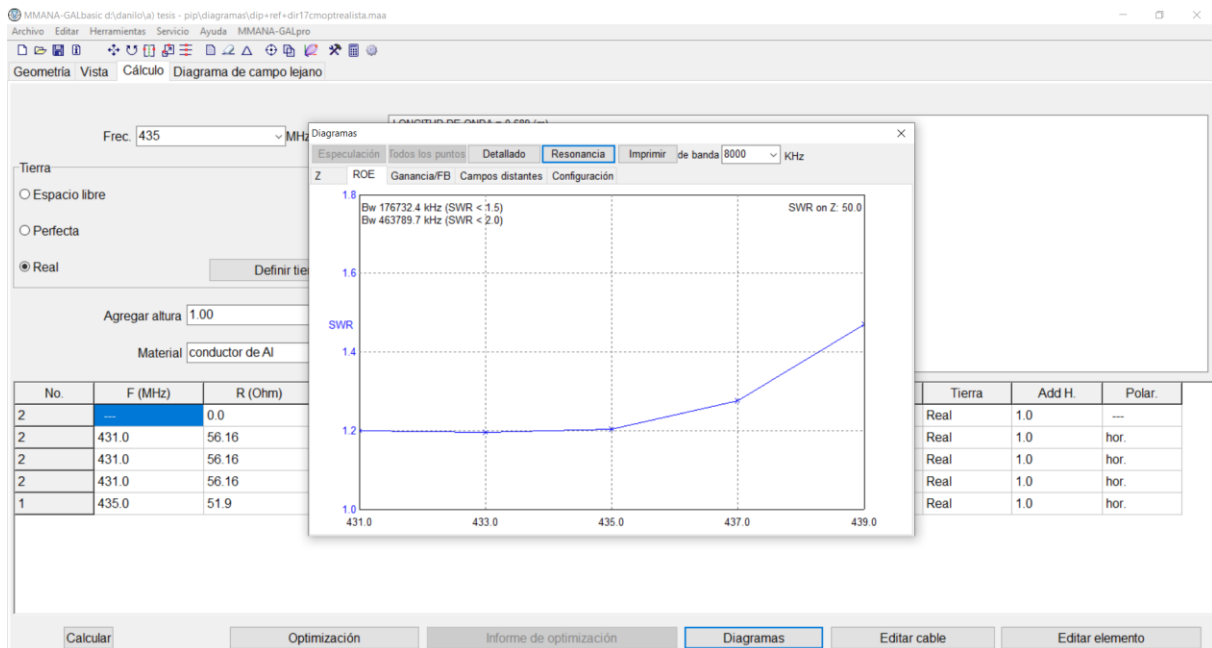
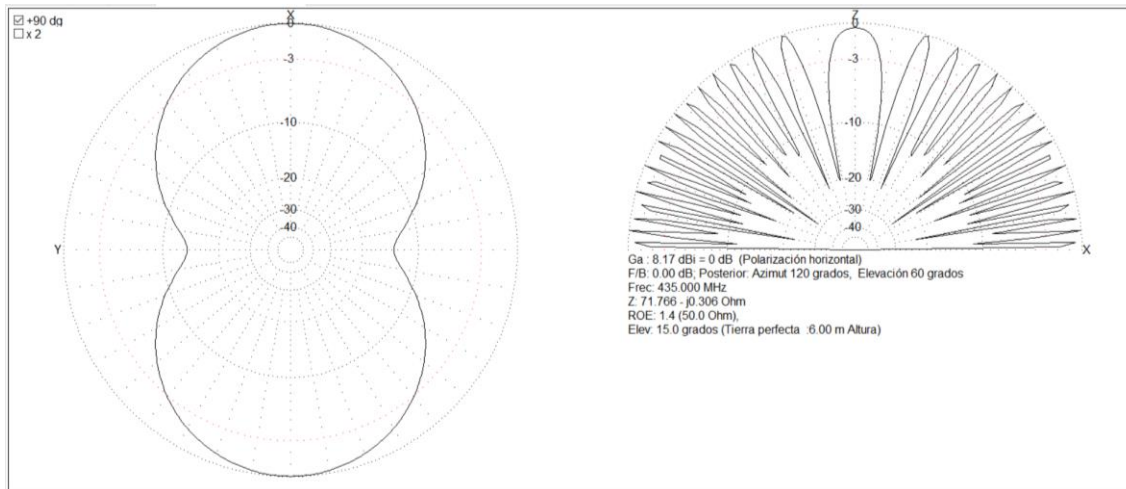


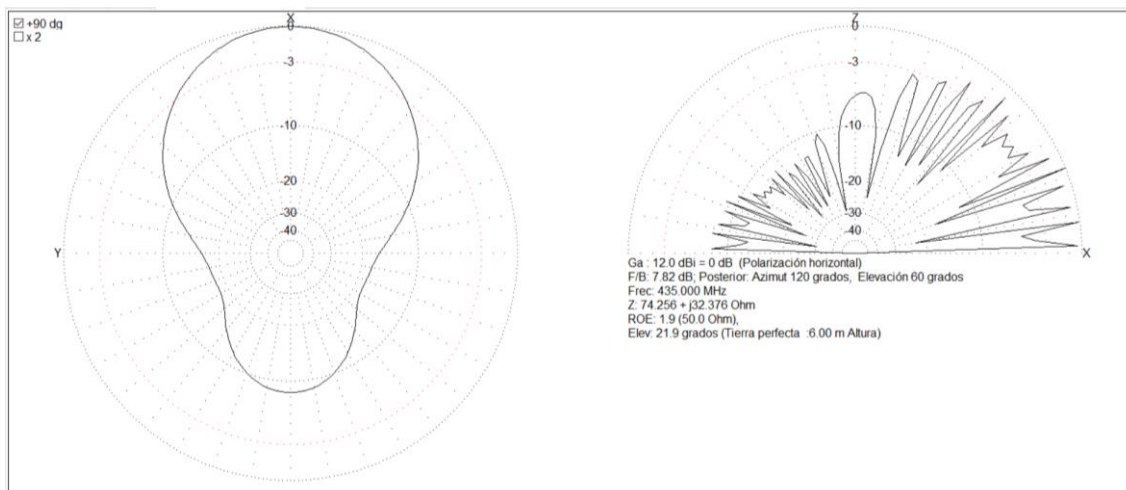
Figura 3-10: Diagrama de ROE mediante MMANA-GAL

A partir de los resultados obtenidos en la simulación, se calibró la antena construida mediante la medición experimental de su ROE utilizando un analizador vectorial de redes *NanoVNA*. Se logró una adaptación aceptable, con un valor de ROE aproximado de 1,5, dentro de los márgenes de funcionamiento esperados.

Posteriormente, se procede a la medición experimental de ganancia, comparando las magnitudes de potencia registradas con un analizador de espectro a distintas distancias. Las primeras pruebas, realizadas en un entorno confinado con una separación de aproximadamente 3 m, mostraron un espectro no representativo del comportamiento teórico esperado. Al repetir las mediciones en un espacio abierto y con mayor separación entre antenas, se obtuvo una respuesta más coherente con la simulación, evidenciando una ganancia superior a la del dipolo de referencia (figura 3.11).



a) Diagrama dipolo



b) Diagrama Yagi

Figura 3-11: Diagramas de patrón de radiación con MMANA-GAL

Las diferencias observadas entre los valores medidos y los teóricos se atribuyen principalmente a limitaciones del entorno experimental, como la presencia de reflexiones, obstáculos y ruido electromagnético, que afectan la precisión de las mediciones. No obstante, los resultados obtenidos resultan indicativos del comportamiento esperado, por lo que se consideran válidos para la validación funcional del diseño. En ausencia de un entorno controlado de laboratorio, se adoptan como parámetros de referencia los valores de ganancia y directividad obtenidos mediante simulación.

Por otro lado, en el satélite, se propone el uso de una antena dipolo, ubicada en el área disponible próximo a una de sus caras, la cual también se configura para trabajar en dicha misma frecuencia de la estación. Este dipolo estará formado por dos cintas metálicas flexibles, cuya longitud es

de una fracción de la longitud de onda λ . En nuestro caso, la antena será de $\lambda/2$, y cada conductor será la mitad de la longitud total, es decir $\lambda/4$.

$$\lambda = c/f = 3 \times 10^8 \text{ m/s} / 435 \times 10^6 \text{ Hz} = 0,689 \text{ m}$$

$$L_{\text{dip}}/2 = \lambda/4 = 0,172 \text{ m}$$

Esta antena y otros componentes del satélite nos proporcionan una potencia de 2 W equivalentes a 33 dB. Magnitud que se considera en el cálculo de presupuesto de enlace.

3.2.2 Subsistema de transmisión y recepción de RF (RF Front-End)

El subsistema de radiofrecuencia, o RF Front-End, constituye la primera etapa activa de la cadena de recepción y cumple la función crítica de acondicionar la señal débil capturada por la antena para que pueda ser procesada adecuadamente en las etapas digitales. Su desempeño, especialmente en términos de ruido, determina en gran medida la sensibilidad de la estación terrena y, por ende, su capacidad de detectar señales de baja potencia provenientes de satélites en órbita baja (LEO).

En configuraciones típicas de bajo costo, el RF Front-End integra dos elementos fundamentales: el Amplificador de Bajo Ruido (LNA) y el Filtro Pasa Banda (BPF). El LNA se encarga de proporcionar ganancia a señales que pueden encontrarse muy atenuadas añadiendo la menor cantidad posible de ruido adicional. La calidad de este componente se evalúa a través de su Figura de Ruido (NF).

Por otro lado, el Filtro Pasa Banda tiene como objetivo proteger al sistema frente a interferencias externas. En entornos urbanos, donde conviven variadas señales de radiodifusión que pueden superar ampliamente la del satélite, si no se atenúan antes de ingresar al LNA o al transceptor, dichas señales pueden inducir fenómenos de saturación o intermodulación, enmascarando la señal de interés. Así se asegura que el receptor procese una señal limpia y útil.

El tratamiento de la señal RF comienza con el transceptor (RF) que es el componente encargado de sintonizar, amplificar, filtrar y demodular la señal del satélite antes de que pueda ser procesada digitalmente en la recepción de datos, y del cambio inverso en la transmisión de comandos de control. Este equipo debe ser compatible con modulación en frecuencia (FM), con soporte para el protocolo AX.25 y capaz de operar en modo full-dúplex. Se selecciona un

transceptor de radioaficionado tipo base con capacidad de transmisión en 435 MHz entre su banda de frecuencias, potencia de salida regulable y conectividad de datos.

Para la implementación inicial de esta estación terrena, se opta por utilizar, entre el equipamiento disponible en la facultad, un transceptor Yaesu FT-5100 (figura 3.12), este cuenta con: Soporte para recepción y transmisión de datos, salida de audio para demodulación externa y entrada de micrófono o puerto de datos para modulación.

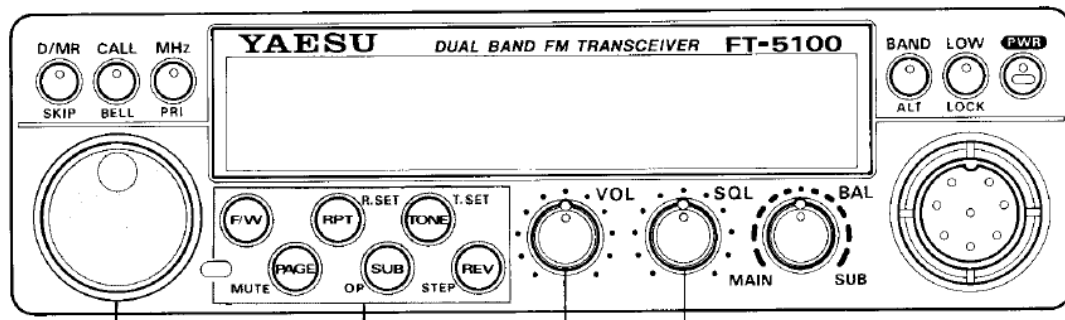


Figura 3-12: Radio Yaesu FT-5100

Justificación y Capacidades de la Yaesu FT-5100

La principal justificación para la selección de la Yaesu FT-5100 es su disponibilidad actual en la facultad, lo que permite una fase de implementación y pruebas rápida y costo-efectiva para el proyecto. Este transceptor de doble banda (VHF/UHF) es ampliamente utilizado en la comunidad de radioaficionados y ofrece las capacidades necesarias para la recepción de señales de satélites LEO en la banda de UHF.

Las características clave del Yaesu FT-5100 relevantes para este proyecto incluyen:

- Rango de Frecuencia: Cubre doble banda, VHF (144–148 MHz), y la banda de UHF (430–450 MHz), incluyendo los 435 MHz de operación del Pehuensat III.
- Modos de Operación: Soporta modos como FM, que es compatible con la modulación AFSK (Audio Frequency-Shift Keying) utilizada por el satélite. La radio demodula la señal de RF entrante a una señal de audio que contiene la modulación FSK.
- Salida de Audio/Datos: La FT-5100 proporciona una salida de audio (un conector de "Packet" o "Data", o la salida de parlante/auriculares) que entrega la señal demodulada en formato de audio, lista para ser procesada por software externo.
- Conectividad: Puerto de micrófono, altavoz externo y entrada PTT (Push-to-Talk)

- Potencia de salida: su potencia configurable permite adaptarse a diferentes condiciones del enlace. Alta: 50 W (VHF), 35 W (UHF), media y baja configurables

Estas características le permiten al Radio Yaesu ser un componente adecuado para el tratamiento (sintonización, filtrado y demodulación) de nuestra señal y acoplamiento al resto del equipamiento (conexión antena – computadora).

3.2.3 Subsistema de procesamiento digital de la señal (SDR)

El subsistema computacional de procesamiento digital de la señal constituye el núcleo computacional e inteligente de la estación terrena. Mientras los subsistemas de RF y de control mecánico actúan sobre dominios analógicos y físicos, este subsistema se implementa principalmente en el dominio digital mediante software ejecutado en una computadora. Estas herramientas actúan como interfaz entre el dominio analógico de la RF y el dominio digital del ordenador, una vez procesada la señal, permiten gestionar el seguimiento y predicción de pases a partir de TLE (Two Lines Elements), funcionar como demodulador TNC y decodificar los datos AX25 para su posterior tratamiento de almacenamiento y visualización.

Una vez que la señal de RF es procesada por el hardware, el procesamiento restante para extraer los datos útiles se lleva a cabo en el dominio del software que se ejecuta en la computadora de control de la estación terrena. Este enfoque de radio definido por software (SDR) en las etapas finales permite una gran flexibilidad y robustez en el manejo de las señales y la extracción de datos.

La arquitectura de software proporciona tres etapas principales:

Seguimiento y predicción orbital: El software **Orbitron** (Figura 3.13) utiliza los parámetros orbitales en formato *TLE* para predecir los pases satelitales visibles desde la ubicación de la estación. A partir de estos datos, genera las ventanas de oportunidad de comunicación y los parámetros de apuntamiento (Azimut y Elevación), que pueden emplearse tanto en la operación manual como en la eventual automatización del sistema.

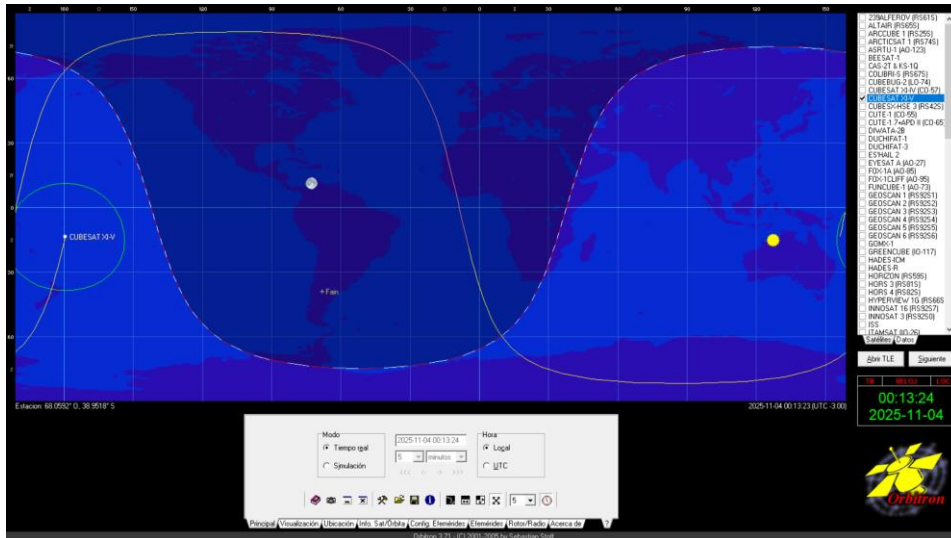


Figura 3-13: Software Orbitron

Demodulación y decodificación de la señal: La señal recibida por la placa de sonido de la computadora, es digitalizada y entregada a **Direwolf** (figura 3.14), un software TNC que implementa la modulación/demodulación AFSK y la decodificación del protocolo AX.25. Direwolf actúa como modem virtual, procesando el audio en tiempo real y entregando tramas digitales listas para su interpretación. De esta forma, cumple la función que en sistemas más complejos se implementa con cadenas DSP personalizadas, ofreciendo una solución eficiente y de bajo costo computacional.

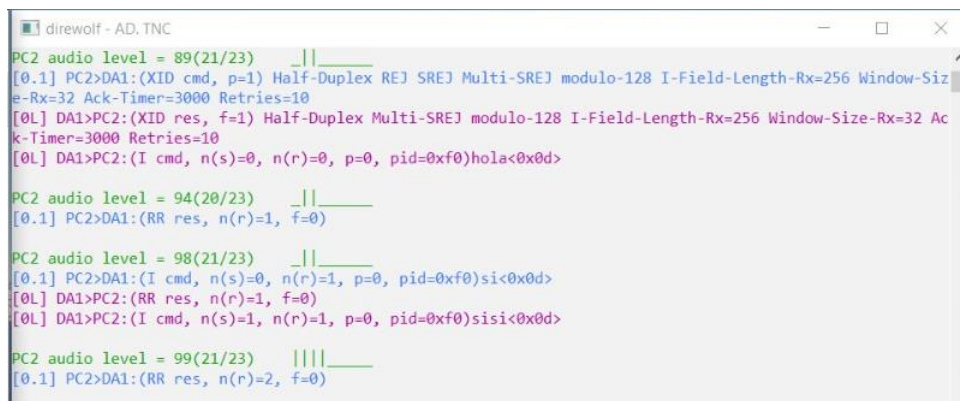


Figura 3-14: Software Direwolf

Visualización e interacción con la telemetría: Finalmente, las tramas decodificadas son presentadas mediante **EasyTerm** (figura 3.15), una aplicación que permite visualizar y registrar en tiempo real la información recibida. Esta interfaz facilita la interpretación directa de la telemetría y asegura un entorno operativo sencillo y confiable para el usuario.

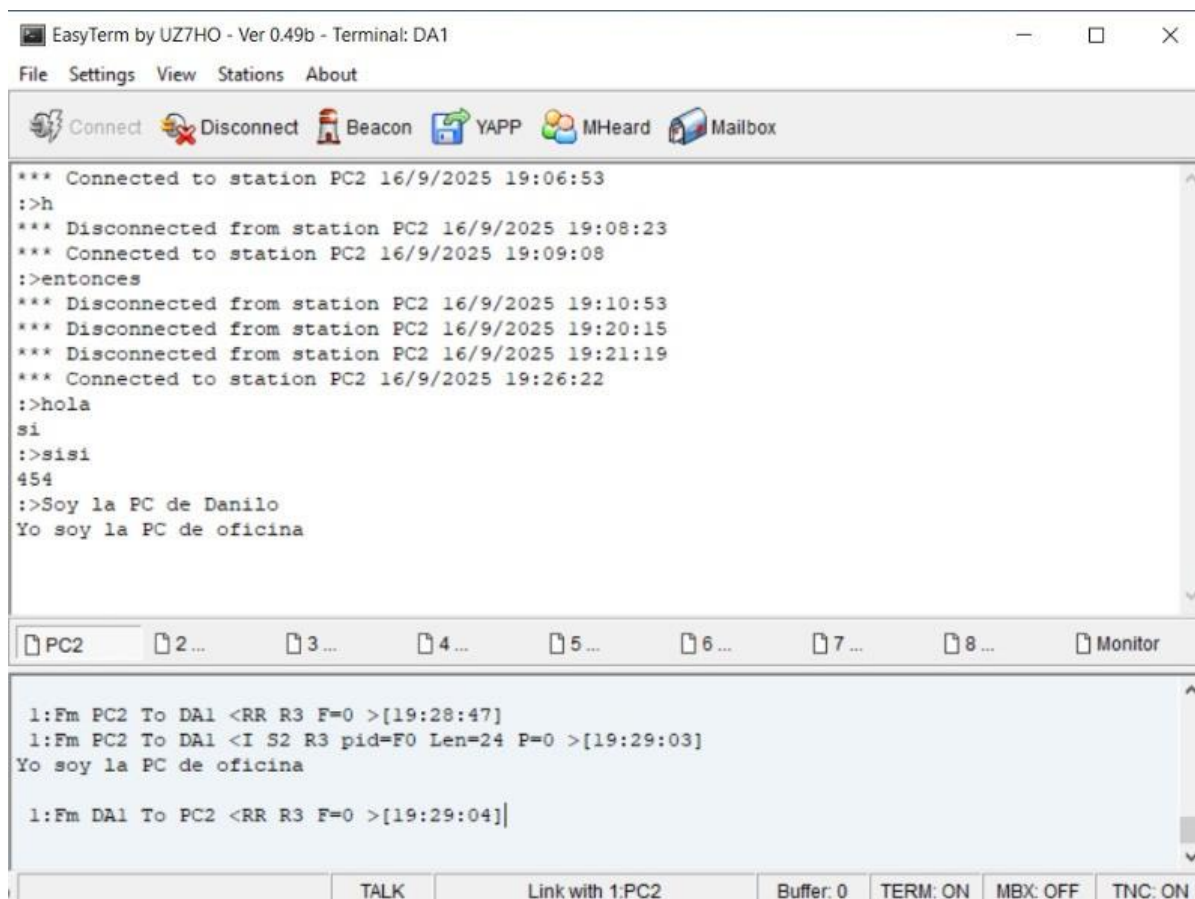


Figura 3-15: Software EasyTerm

En conjunto, esta arquitectura basada en herramientas de software ligeras y de amplia difusión, se combina con la flexibilidad del hardware. El resultado es un subsistema robusto y accesible, capaz de recibir, demodular y visualizar datos satelitales sin necesidad de equipamiento especializado, y con la posibilidad de ser ampliado en el futuro mediante la incorporación de módulos adicionales de control y análisis.

3.3 Integración y puesta en marcha

La etapa de integración y puesta en marcha constituye un paso fundamental para validar el funcionamiento del sistema de estación terrena en condiciones reales de operación. Una vez seleccionados los componentes y definido el esquema general, se procede a su interconexión, configuración, pruebas funcionales y validación del enlace satelital.

3.3.1 Configuración del Software SDR en servidor

Ya que quien controla el flujo de datos es el servidor, previo a la construcción de interfaces entre la computadora y la antena, se analizan los requisitos que se necesitan configurar para la correcta recepción y decodificación de tramas en el software instalado. Una de las características de Direwolf es su capacidad de configuración flexible, que incluye parámetros como velocidad de bits por segundos (BPS), los puertos de entrada y salida de la señal (audio), y entre lo de mayor relevancia dado que los tiempos de comunicación son breves, el control del PTT (Push To Talk).

El software *Direwolf* actúa como módem TNC (Terminal Node Controller) por software, permitiendo la decodificación de señales AFSK transmitidas por el satélite bajo el protocolo AX.25. Este programa reemplaza al hardware TNC tradicional, verificando las conexiones establecidas (figura 3.12) y procesando digitalmente la señal de audio proveniente del transceptor Yaesu FT-5100 y transformándola en paquetes de datos interpretables por la computadora.

```
direwolf - AD. TNC
Dire Wolf version 1.7
Includes optional support for: cm108-ptt

Reading config file direwolf.conf
Available audio input devices for receive (*=selected):
* 0: Varios micrfonos (Realtek(R) A (channel 0)
Available audio output devices for transmit (*=selected):
* 0: Altavoces (Realtek(R) Audio) (channel 0)
Channel 0: 1200 baud, AFSK 1200 & 2200 Hz, A+, 44100 sample rate.
ERROR can't open device COM9 for channel 0 PTT control.
Note: PTT not configured for channel 0. (Ignore this if using VOX.)
Ready to accept AGW client application 0 on port 8000 ...
Ready to accept KISS TCP client application 0 on port 8001 ...
```

Figura 3-16: Direwolf previo a la conexión de puertos

En la configuración implementada en este proyecto, la demodulación FSK la realiza previamente el hardware del transceptor, por lo que Direwolf se encarga exclusivamente del

procesamiento digital la señal de audio AFSK proveniente de la tarjeta de sonido. El software analiza el flujo de audio, detectando los tonos correspondientes a los bits "0" y "1", y sincronizando la secuencia binaria. Posteriormente, interpreta las tramas conforme a la estructura definida por el protocolo AX.25, identificando las banderas de inicio y fin, eliminando el relleno de bits (bit stuffing) y verificando la integridad mediante el cálculo de la redundancia cíclica (CRC), descartando aquellas tramas que presenten errores. A partir de este proceso, Direwolf extrae los campos relevantes de cada trama, como las direcciones de origen y destino, el campo de control, el identificador de protocolo (PID), y el campo de información que contiene los datos de usuario o la telemetría del satélite.

Como alternativa al uso de Direwolf, durante el proyecto se considera el software *Soundmodem*, que también actúa como un TNC virtual capaz de demodular señales AFSK utilizando la tarjeta de sonido de la computadora. Sin embargo, se opta por el uso de Direwolf debido a sus ventajas técnicas y operativas: utiliza algoritmos DSP (Digital Signal Processing) más avanzados para la detección y sincronización de tonos, lo que mejora la tasa de éxito de decodificación en condiciones de bajo nivel de señal o alto ruido; posee una capacidad de registro y diagnóstico superior, proporcionando información detallada sobre niveles de señal, errores de CRC y desempeño del enlace; y permite su configuración mediante un archivo de comandos, lo cual facilita la replicación de la instalación en otros equipos y reduce el tiempo de puesta en marcha en cada instalación.

Direwolf es una herramienta altamente configurable, cuya operación se gestiona principalmente a través de un archivo de configuración denominado *direwolf.conf*. Este archivo de texto permite establecer todos los parámetros operativos del sistema, desde la selección del dispositivo de audio de entrada hasta los formatos de salida de los datos decodificados. Su principal ventaja radica en la posibilidad de definir de forma permanente los valores requeridos para la estación terrena, facilitando la replicación del entorno de trabajo y su adaptación a distintas configuraciones de hardware o software sin necesidad de reconfiguraciones manuales extensas, adaptándose a las necesidades específicas de la estación terrena.

Entre las directivas más relevantes configuradas en el archivo `direwolf.conf` para este proyecto, se destacan las siguientes:

- **ADEVICE (Dispositivo de Audio):**
Define el dispositivo de entrada de audio desde el cual Direwolf recibirá la señal AFSK proveniente del transceptor. Esta instrucción permite seleccionar

explícitamente la interfaz de audio correcta, garantizando la correspondencia entre el flujo de señal física y la fuente digital procesada por el software.

- CHANNEL y MODEM:
Se especifica el número de canal y el tipo de módem empleado en la decodificación. Para la señal del satélite Pehuensat III, que opera a 1200 bps FSK, se configura un módem de tipo 1200 baud, optimizando la detección de tonos y la estabilidad temporal del enlace.
- PTT (Push-To-Talk, opcional):
Direwolf puede controlar de manera automática el PTT del transceptor a través de un puerto serie. En las configuraciones que incluyen transmisión, el programa activa la línea correspondiente del puerto COM cada vez que se requiere enviar datos, sincronizando el cambio entre los modos de recepción y transmisión.
- AGWPORT o KISSPORT (Puertos de Salida):
Estas directivas determinan el modo en que Direwolf emula un TNC físico para la salida de paquetes decodificados. El software puede operar en modo KISS (Keep It Simple, Stupid) o AGWPE Packet Engine, a través de un puerto TCP/IP o, más frecuentemente, mediante un puerto serie virtual.
Esta funcionalidad resulta esencial para la interconexión con EasyTerm, que puede conectarse directamente a dicho puerto serie y recibir los paquetes AX.25 decodificados en tiempo real. Direwolf, en este caso, actúa como un puente entre el flujo de audio y los datos digitales interpretables por el sistema.
- LOGFILE (Registro y almacenamiento de datos):
Permite registrar toda la actividad de decodificación en un archivo de texto plano.
 - LOGFILE <nombre_archivo.log>: Define el nombre y la ubicación del archivo de registro.
 - LOGFILEAPPEND YES/NO: Determina si los nuevos datos se anexan al archivo existente o si se genera uno nuevo en cada ejecución.
El archivo de log contiene los paquetes AX.25 decodificados en un formato legible, incluyendo direcciones de origen y destino, tipo de paquete y contenido del campo de información (telemetría, mensajes, etc.). Esto garantiza la persistencia de los datos recibidos, incluso si la sesión en tiempo real se interrumpe, posibilitando su posterior análisis o procesamiento.

En el archivo *Direwolf.conf* del servidor de la estación terrena se establecen los comandos y los parámetros operativos específicos necesarios ya descriptos para la comunicación para el Pehuensat III resumidos en la tabla

Comando	Función
ADEVICE 0	Selecciona el parlante (salida) y micrófono (entrada) externos
CHANNEL 0	Selecciona el canal 0
MODEM 1200	Velocidad de modem de 1200 bps
PTT COM9 -DTR	Configura PTT por COM9 por salida -DTR
KISSPORT 8001	Genera un enlace virtual KISS en el puerto 8001

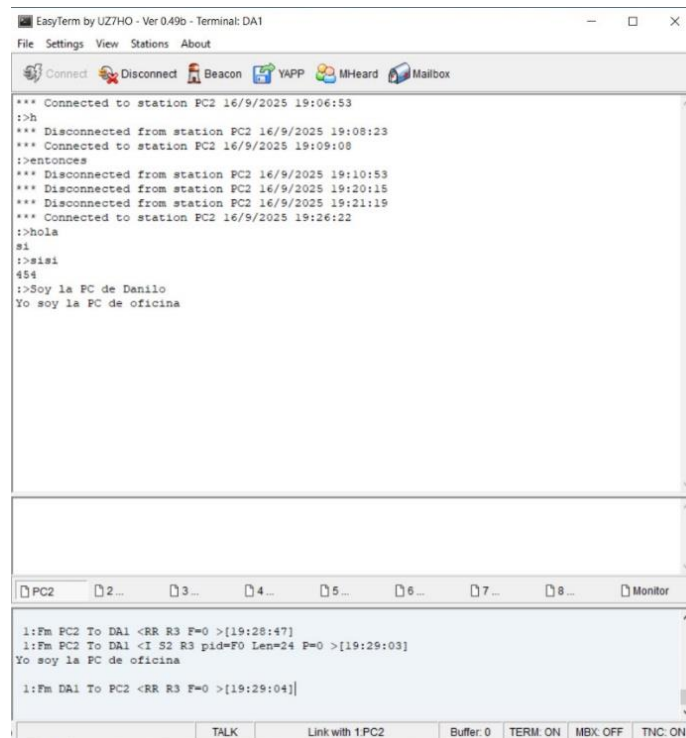
Tabla 3-3: Parámetros establecidos en la configuración de la estación

El tratamiento y visualización de los datos decodificados por Direwolf se complementa con el software terminal **EasyTerm**, el cual se emplea como herramienta de monitoreo y control en la etapa de recepción y validación de datos. EasyTerm permite la visualización en tiempo real de

los paquetes AX.25 recibidos desde el satélite, una vez que estos han sido procesados por el módem TNC virtual Direwolf.

A través de su interfaz, el programa muestra de forma estructurada la información contenida en cada paquete, mostrando tanto los encabezados del protocolo como el campo de datos, donde se incluye la telemetría que será transmitida por el satélite Pehuensat III. De este modo, EasyTerm permite verificar en tiempo real la integridad de los datos recibidos y confirmar el correcto funcionamiento del flujo de comunicación entre la radio, el módem y el sistema de cómputo de la estación terrena.

EasyTerm funciona como una interfaz de comunicación serial o TCP, capaz de recibir los datos decodificados por Direwolf y mostrarlos en formato texto (figura 3.13). Esta característica lo convierte en una herramienta esencial para la etapa de validación y prueba del enlace, ya que permite monitorear el contenido de los marcos AX.25, identificar posibles errores en la transmisión y verificar la correcta configuración del protocolo.



```
EasyTerm by UZ7HO - Ver 0.49b - Terminal: DA1
File Settings View Stations About
[Connect] [Disconnect] [Beacon] [YAPP] [MHeard] [Mailbox]

*** Connected to station PC2 16/9/2025 19:06:53
:>h
*** Disconnected from station PC2 16/9/2025 19:08:23
*** Connected to station PC2 16/9/2025 19:09:08
:>entonces
*** Disconnected from station PC2 16/9/2025 19:10:53
*** Disconnected from station PC2 16/9/2025 19:20:15
*** Disconnected from station PC2 16/9/2025 19:21:19
*** Connected to station PC2 16/9/2025 19:26:22
:>hola
s1
:>:sisi
454
:>Soy la PC de Danilo
Yo soy la PC de oficina

[PC2] [2...] [3...] [4...] [5...] [6...] [7...] [8...] [Monitor]

1:Fm PC2 To DA1 <RR R3 F=0 >[19:28:47]
1:Fm PC2 To DA1 <I S2 R3 pid=FO Len=24 F=0 >[19:29:03]
Yo soy la PC de oficina

1:Fm DA1 To PC2 <RR R3 F=0 >[19:29:04]

TALK Link with 1:PC2 Buffer: 0 TERM: ON MBX: OFF TNC: ON
```

Figura 3-17: Monitoreo de comunicación en EasyTerm

Entre sus principales utilidades, EasyTerm permite el monitoreo, control y diagnóstico del enlace, facilitando tanto la observación de tramas individuales como la ejecución de pruebas de transmisión y recepción. La configuración básica realizada para la estación incluye los siguientes parámetros:

- Identificación del terminal: nombre o indicativo de estación.
- Configuración de baliza (Beacon): tiempo de transmisión y contenido del mensaje.
- Longitud máxima de mensaje: hasta 255 caracteres por trama.
- Puerto de comunicación: definido en 8001, correspondiente al puerto KISS configurado en Direwolf.

Una vez establecida la comunicación entre ambos programas mediante la configuración coincidente del puerto KISS 8001, es posible realizar pruebas de conexión entre terminales. Esto permite solicitar la conexión a otra terminal mediante una llamada desde un equipo a otro. De esta manera, todas las tramas decodificadas por Direwolf sean visualizadas en EasyTerm y, de forma inversa, que los mensajes generados en el terminal se codifiquen nuevamente a través del TNC virtual para su transmisión hacia otra estación.

Una vez establecida la comunicación entre ambos softwares, y tras verificar que el puerto KISS configurado en Direwolf (8001) coincide con el definido en EasyTerm, el sistema queda completamente operativo para el intercambio de información. Desde EasyTerm es posible iniciar una conexión con otra estación remota mediante una llamada entre terminales, permitiendo tanto la recepción como la transmisión de tramas AX.25 en tiempo real.

Haciendo uso de los comandos del archivo *direwolf.conf*, se configura en el software la opción de registro de tramas, esto permite preservar la información recibida y facilitar el análisis de llegada de datos. Se establece la creación de un archivo de texto en el que se almacenan todas las tramas AX.25 recibidas decodificadas. Este registro luego de construida la trama que enviará el Pehuensat, incluirá datos como la hora de recepción, las direcciones de origen y destino y el contenido del campo de información (telemetría), permitiendo así un seguimiento detallado del enlace y la verificación de la integridad de los datos recibidos. La información almacenada en estos archivos constituye la base para las etapas posteriores de análisis y validación del enlace, permitiendo evaluar el desempeño del sistema y la correcta decodificación de la telemetría transmitida por el satélite. Además de la disponibilidad de estos datos para su registro en una plataforma web alojada en el servidor.

Adicionalmente al conjunto de software de tratamiento de la señal, en el servidor se instala el programa Orbitron, que implementa el modelo SGP4 y permite calcular con precisión la posición instantánea del satélite (figura , así como predecir los pases visibles en función de la ubicación de la estación anticipando en cada pase se caracteriza los tres eventos principales: adquisición de la señal (AOS), máxima elevación, y pérdida de la señal (LOS)

Orbitron genera los valores de **azimut y elevación** en tiempo real y, en caso de utilizar sistema de seguimiento por traqueo, los transmite al sistema de control del rotor, que ajusta automáticamente la orientación de la antena, garantizando que el lóbulo principal permanezca alineado con el satélite durante toda la ventana de comunicación.

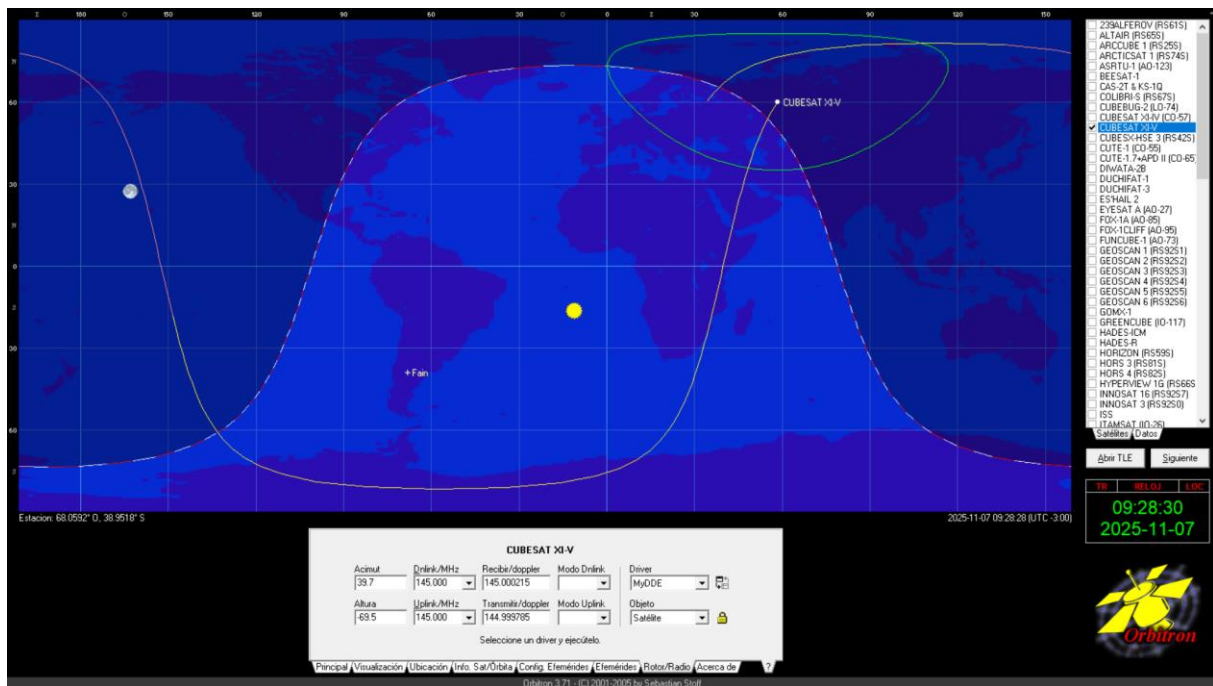


Figura 3-18: Orbitron mostrando seguimiento y coordenada de Cubesat

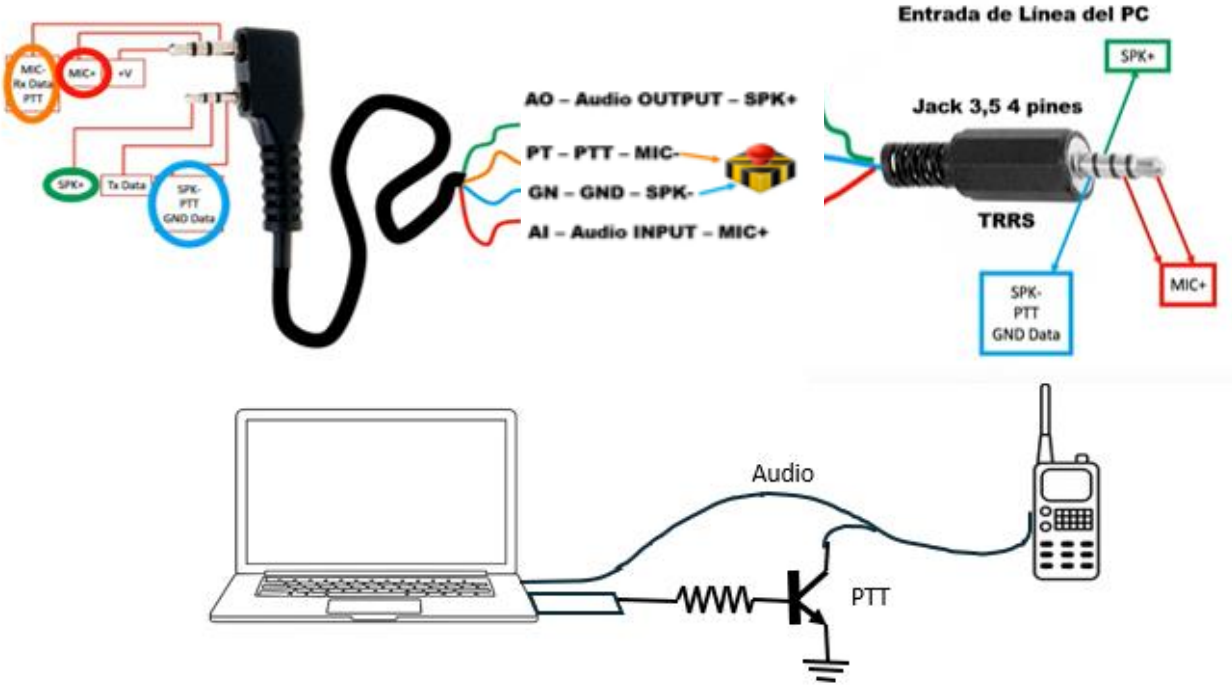
En conjunto, estos procesos permiten planificar las sesiones de enlace y optimizar el aprovechamiento de las ventanas de visibilidad, que para satélites LEO como el Pehuensat III suelen tener una duración promedio de 5 a 12 minutos, dependiendo de la altitud orbital y la trayectoria relativa respecto a la estación terrena.

3.3.2 Interfaz servidor – transceptor

Una vez que el software se encuentra correctamente configurado para la recepción de señales, se procede al diseño de la interfaz (hardware) necesaria para que la placa de sonido de la computadora (servidor) pueda recibir y transmitir las señales de audio APRS provenientes de otra terminal de comunicación.

Esta etapa se realiza de forma escalonada, utilizando inicialmente transceptores portátiles (handys) como equipos de transmisión y recepción. La conexión entre el handy y la computadora se realiza mediante cables de audio y conectores tipo plug, empleando los jack del conector “manos libres” del handy y la entrada/salida de audio de la PC. La señal de salida de un dispositivo se dirige hacia la entrada del otro, permitiendo verificar que el audio transmitido por una computadora pueda ser escuchado en la otra, esto sucede siempre que se mantenga presionado el **PTT** del equipo transmisor.

Como durante la comunicación satelital es necesario automatizar este proceso y sincronizar los tiempos de transmisión, se implementa el control automático de PTT configurado por software a través del puerto serie (COM) del equipo. Se emplea un módulo conversor TTL-USB CP2102, utilizando su salida DTR (Data Terminal Ready) como señal de activación. De este modo, la computadora puede habilitar o deshabilitar la transmisión de manera programada, en los momentos exactos en los que transmite, sin intervención manual (figura 3.14)



a) Representación de la interfaz



b) Prueba de implementación de la interfaz

Figura 3-19: Conexiones iniciales para comunicación por Handy con PTT automático

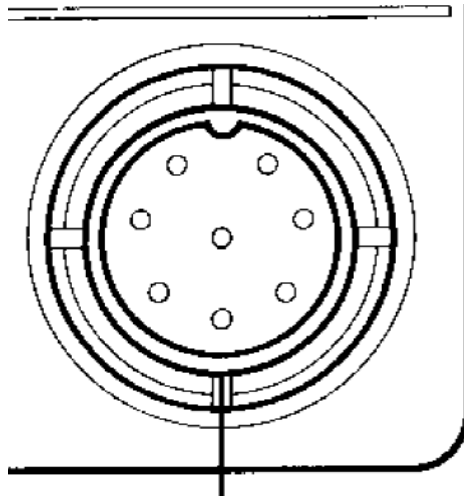


Figura 3-21: Pines Jack del transceptor Yaesu

En el caso de la señal proveniente de la computadora hacia la radio (línea de transmisión de audio), se implementó un divisor resistivo con el fin de atenuar el nivel de salida, evitando así la sobresaturación del circuito de modulación de la FT-5100. De manera inversa, la señal de audio recibida desde la radio, correspondiente a la demodulación de la portadora FSK, presentó un nivel de tensión inferior al requerido por la entrada de línea de la computadora para ser escuchada. Para compensar esta diferencia y asegurar una correcta decodificación por parte del software, se incorporó una etapa de amplificación y filtrado de audio intermedia (figura 3.22).

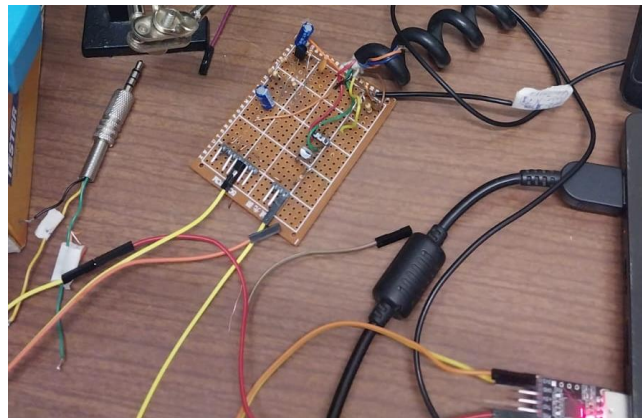


Figura 3-22: Pruebas de interfaz para amplificación y filtrado de señal

Se repiten las pruebas de comunicación a diferentes distancias y se verifica que esta adaptación permite adaptar los niveles de señal entre ambos dispositivos, garantizando una transferencia de audio limpia y estable, condición esencial para el funcionamiento confiable del sistema de comunicación digital basado en Direwolf y EasyTerm.

De esta manera, con la integración de la radio Yaesu FT-5100 para la recepción de señales de RF y la demodulación FSK, junto con las capacidades del software Direwolf, encargado de procesar el audio AFSK y decodificar el protocolo AX.25, y el uso de EasyTerm como herramienta de visualización, monitoreo y validación de datos, se completa la arquitectura de decodificación de la estación terrena. Esta configuración ofrece una solución robusta, eficiente y adaptable para el procesamiento de la señal descendente del satélite, optimizando el uso de los recursos de hardware disponibles y manteniendo la flexibilidad necesaria para futuras mejoras o expansiones del sistema.

En este diseño, todos los paquetes decodificados por Direwolf se presentan de manera legible en EasyTerm, mientras que los mensajes generados desde el terminal son codificados por el TNC virtual y transmitidos a través de la radio. Este esquema de funcionamiento permite una comunicación bidireccional confiable y controlada, garantizando la verificación en tiempo real del enlace satelital entre la estación terrena y el satélite Pehuensat III, así como la validación integral del flujo de datos dentro del sistema.

3.3.3 Interconexión transceptor – antena

Con la interfaz ya establecida desde la computadora hasta el transceptor, la integración final consiste en la interconexión del transceptor a la antena, asegurando su correcta ubicación y accesibilidad. Luego de testear que la antena Yagi cuente con sus parámetros óptimos para la transmisión y recepción en la frecuencia deseada, se realiza su instalación en un mástil elevado ubicado en el techo de la facultad. El mástil cuenta con orientación inicial manual ajustable. Un cable coaxial se conecta desde la antena hasta el transceptor, procurando minimizar las pérdidas por longitud y seleccionar conectores apropiados con aislación resistente a intemperie. Se emplea RG-213 ya que posee impedancia de 50 Ohm y un buen equilibrio de pérdidas, adecuado para la distancia a utilizar para conectar.

Se procede a conectar el transceptor para probar la recepción de señal en la frecuencia configurada y se verifica que los datos llegan al transceptor en forma de tonos. Dichos tonos se transmiten a la placa de sonido de la computadora, se comprueba por el parlante del transceptor que señales recibidas por la antena Yagi emitidas desde otro transmisor (Handy) lleguen a él y mediante el circuito de adaptación la señal se decodifica en Direwolf junto con las especificaciones de calidad al mismo tiempo que los mensajes son monitorizados en el EasyTerm.

3.3.4 Pruebas y validación de la comunicación

Completada la integración de los componentes que conforman la estación terrena, se procede a la etapa de pruebas de funcionamiento y validación de la recepción de señales. El objetivo principal de esta fase es verificar el desempeño integral del sistema de enlace, asegurando la correcta demodulación y decodificación de las tramas bajo el protocolo AX.25, así como la estabilidad y fidelidad de la transmisión de datos en condiciones reales de operación.

Las pruebas iniciales se realizan en entorno controlado, transmitiendo tramas desde una computadora local equipada con su correspondiente software de transmisión. Estas tramas son enviadas hacia la estación terrena a través de un transmisor portátil (Handy) utilizando modulación AFSK a 1200 baudios. El objetivo de esta prueba es confirmar que la cadena de recepción, compuesta desde la antena hasta la computadora, procese correctamente las señales entrantes y sean correctamente interpretados por el software (figura 3.23).

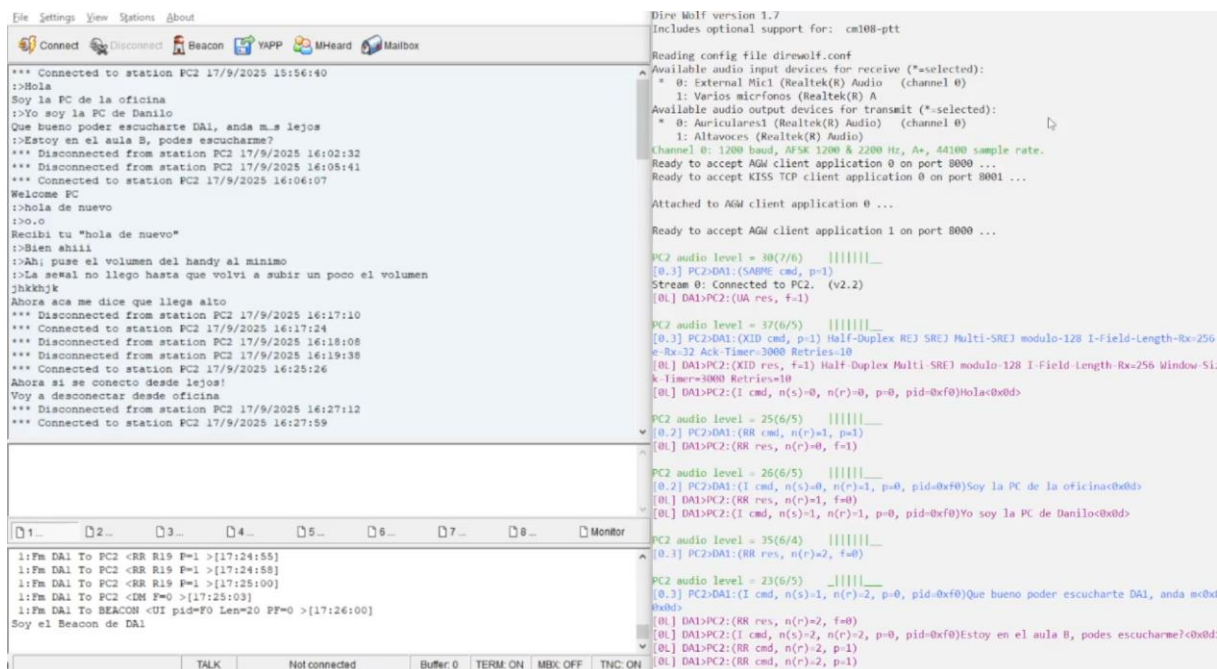


Figura 3-23: Pruebas de comunicación y decodificación

Posteriormente, se deja preparado el sistema completo para los cambios necesarios para realizar pruebas de recepción de señales provenientes de satélites públicos operativos, compatibles con el protocolo AX.25 y la modulación AFSK, como la Estación Espacial Internacional (ISS).

Estas pruebas permiten validar el correcto desempeño de la estación en condiciones reales de propagación y niveles de señal variables durante el pase del satélite.

4 Resultados

4.1 Resultados obtenidos

Completada la integración de los componentes de hardware y software, es posible proceder a la validación funcional del sistema completo de comunicación satelital mediante una serie de pruebas operativas y de rendimiento.

El objetivo principal de esta etapa es verificar la capacidad de la estación terrena para establecer enlaces efectivos con satélites en órbita baja (LEO), recibir tramas bajo el protocolo AX.25, procesar la información correctamente y almacenarla localmente para su posterior transmisión a la nube.

Las pruebas iniciales consistieron en la transmisión y recepción de tramas AX.25 entre dos estaciones terrestres: una computadora conectada a un transceptor portátil (handy) y otra conectada al sistema completo de la estación (antena, transceptor, módem TNC/SDR y servidor)

4.2 Evaluación técnica de la comunicación

Durante las pruebas, se analizaron los siguientes aspectos técnicos:

- Integridad de la señal recibida:
 - Se monitoreó el nivel de potencia y la calidad de la señal demodulada en función de la distancia.
 - Las mediciones se realizaron de forma indirecta a través de los indicadores de calidad del enlace proporcionados por el software (relación señal-ruido —SNR— y número de tramas válidas frente a tramas erróneas).
 - Asimismo, se observó la variación del nivel de potencia de los paquetes recibidos al modificar la separación entre los equipos terminales, constatando una correlación entre el incremento de distancia y la reducción de potencia efectiva.
- Decodificación y procesamiento de tramas:
 - La verificación de la decodificación correcta de los paquetes AX.25 se realizó mediante el software EasyTerm, confirmando la integridad de los campos de dirección, control, protocolo e información.
 - La correcta visualización de los mensajes recibidos en el terminal demostró la

consistencia del flujo de datos entre el transceptor, el software Direwolf y la interfaz de comunicación del servidor, asegurando el procesamiento adecuado de la información.

4.3 Validación final del sistema

Los resultados obtenidos validan el diseño del hardware y la configuración del software, demostrando que la estación terrena es capaz de recibir, demodular y decodificar con precisión tramas AFSK bajo el protocolo AX.25. Este desempeño confirma la funcionalidad del enlace descendente, condición indispensable para la futura comunicación con el satélite Pehuensat III.

Las tramas decodificadas fueron posteriormente analizadas para comprobar la integridad, legibilidad y compatibilidad del contenido con el sistema de archivos configurado. Asimismo, se verificó el correcto funcionamiento de los scripts de procesamiento y filtrado ejecutados en el servidor, garantizando la automatización del registro y almacenamiento de los datos recibidos.

Con esta etapa, se concluye la fase técnica de implementación, quedando la estación terrena validada como un nodo funcional y operativo dentro del sistema de comunicación del satélite.

5 Conclusiones

5.1 Conclusiones generales

El desarrollo del presente Proyecto Integrador Profesional permitió diseñar, implementar y validar una estación terrena funcional destinada a establecer comunicación con satélites en órbita baja (LEO) que operan en la banda UHF (435 MHz) utilizando el protocolo AX.25. La estación fue concebida con un enfoque modular, integrando de manera armónica los subsistemas de antena, transceptor y servidor de procesamiento, bajo criterios de compatibilidad, eficiencia y disponibilidad tecnológica. Esta arquitectura permitió alcanzar una comunicación confiable y reproducible entre el servidor local y el sistema de radio, cumpliendo con los objetivos planteados.

Durante la etapa de validación, se comprobó la correcta recepción y decodificación de tramas AX.25, evidenciando la adecuada configuración de los flujos de datos entre el transceptor, el software Direwolf y la interfaz de gestión en el servidor. Las pruebas funcionales demostraron la capacidad del sistema para mantener un enlace estable en diferentes condiciones de potencia y distancia, validando la selección de componentes y el dimensionamiento del enlace.

El sistema implementado sienta las bases para la comunicación efectiva con el satélite Pehuensat III, demostrando la factibilidad técnica del enlace y el correcto funcionamiento de la infraestructura local. Asimismo, el proyecto contribuye al fortalecimiento de la capacidad institucional de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue en el ámbito de las telecomunicaciones satelitales educativas, generando una plataforma abierta para futuras experiencias de docencia, investigación y desarrollo tecnológico.

Finalmente, la metodología de trabajo aplicada, basada en la integración progresiva de hardware y software, la validación empírica y el análisis funcional del enlace, permitió consolidar una estación terrena robusta, adaptable y escalable, capaz de evolucionar hacia configuraciones más complejas, como la incorporación de control automático de antena o la gestión remota del sistema.

5.2 Limitaciones del proyecto y recomendaciones futuras

Si bien los resultados obtenidos confirman la viabilidad técnica del sistema, durante el desarrollo se identificaron limitaciones inherentes tanto al alcance del proyecto como a las condiciones experimentales:

- Cobertura y disponibilidad de enlace: la operación depende de la visibilidad del satélite, limitada a aproximadamente cuatro pasadas diarias de unos minutos cada una, lo cual restringe la ventana efectiva de comunicación.
- Control de apuntamiento y cobertura: la antena utilizada opera con orientación fija, lo que reduce la ganancia efectiva durante el paso orbital y afecta la estabilidad del enlace en los extremos de la trayectoria.
- Condiciones del entorno urbano: las interferencias electromagnéticas presentes en el entorno de la Facultad pueden atenuar o distorsionar la señal, afectando la relación señal/ruido (SNR) durante la recepción.
- Potencia limitada del transmisor: las pruebas de transmisión evidenciaron una dependencia significativa del amplificador para mantener una comunicación estable a mayores distancias.

En función de estas observaciones, se proponen las siguientes recomendaciones para el desarrollo futuro:

- Realizar diseños y mediciones de ganancia en antenas de polaridad circular para adaptar al sistema y evitar pérdidas por desajuste de polarización, o incluso tener que evitar el traqueo de la antena si esta es menos directiva que la Yagi.
- Montar la antena Yagi configurada, u otra de mayor rendimiento, ya que debido a la dificultad al acceso donde se va a fijar, las pruebas se realizaron con una antena colocada con anterioridad.
- Implementar un sistema de seguimiento automático de antena (rotor azimut-elevación) controlado por software, a fin de optimizar la ganancia durante la pasada satelital. La facultad cuenta con equipo para dicho sistema, aun así, es necesario realizarle mantenimiento para su correcta utilización.
- Incorporar etapas de amplificación y filtrado adicionales en la cadena de RF para mejorar la sensibilidad de recepción y reducir el impacto del ruido local.

- Realizar pruebas de comunicación aumentando la velocidad de comunicación para aumentar la descarga de datos durante la ventana de tiempo visible. Configurando el software y revisando la compatibilidad del hardware para esta configuración.
- Automatizar la adquisición y almacenamiento de datos, integrando el servidor con servicios en la nube y bases de datos de telemetría en tiempo real.
- Desarrollar una interfaz web o panel de control remoto para supervisar el estado operativo de la estación y facilitar su mantenimiento.
- Extender la validación del sistema con satélites reales, incluyendo el Pehuensat III y otros satélites compatibles con APRS, para obtener métricas comparativas de desempeño en condiciones orbitales reales.

6 Bibliografía

- [1] American Radio Relay League (ARRL). (2021). *The ARRL Handbook for Radio Communications*.
- [2] Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- [3] Bruninga, B. (2000). *Automatic Packet Reporting System (APRS) Protocol Reference*. Naval Academy Satellite Lab.
- [4] DENNIS RODDY, *Satellite Communications*, McGraw-Hill, 4th Edition, 2006
- [5] Elbert, B. R. (2008). *Introduction to Satellite Communication* (3rd Edition). Artech House.
- [6] Espíndola Díaz, J. E., & Rosales Agredo, J. A. (2018). *Estación terrena satelital: rastreo y control de pequeños satélites*. Tunja, Colombia: Editorial UPTC. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/uncoma/131537>
- [7] International Amateur Radio Union (IARU). (2022). *Satellite Frequency Coordination Guidelines*. IARU.
- [8] ERIK NARVERUD, *Design of a UHF Radio System for Small LEO Satellites*, Norwegian University of Science and Technology Department of Electronics and Telecommunications, 2007
- [9] International Telecommunication Union (ITU). (2020). *Radio Regulations* (Edición de 2020). Geneva, Switzerland: ITU.
- [10] Ippolito, L. J. Jr. (2008). *Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance*. John Wiley & Sons.
- [11] Klofas, B. (2010). *Amateur Radio Satellite Communications*. AMSAT.
- [12] Larreburo D. López P. Araoz M. (2025). Pehuensat III: protocolo de comunicación para descarga de datos IOT. *Universidad Nacional del Comahue*. XIII Congreso Argentino de Tecnología Espacial
- [13] Maral, G., & Bousquet, M. (2009). *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- [14] National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2019). *NASA Systems Engineering Handbook* (Rev. 2). NASA.
- [15] Pratt, T., Bostian, C. W., & Allnutt, J. E. (2003). *Satellite Communications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

- [16] Puig-Suari, J., Turner, C., & Ahlgren, W. (2001). *Development of the Standard CubeSat Deployer and a CubeSat Class Picosatellite*. En *IEEE Aerospace Conference Proceedings* (Vol. 1, pp. 435–443). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AERO.2001.931758>
- [17] Riquelme, J. L., & Meroi Martínez, C. (2014). *Diseño del sistema de comunicaciones del nanosatélite Pehuensat II*. Universidad Nacional del Comahue.
- [18] RODRIGUES CAPELA C. J.(2012), Protocol of Communications for VORSat Satellite, FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
- [19] Tucson Amateur Packet Radio (TAPR). (1997). *AX.25 Link Access Protocol for Amateur Packet Radio* (Version 2.2). TAPR.
- [20] Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (2012). *Antenna Theory and Design* (3rd ed.). John Wiley & Sons.