

Sistema de Telecomunicación de Bajo Costo para el Enlace con Satélites de Órbita Baja LEO

Luis A. Miranda Kunert^a, Prof. Dra. Ing. Miki Saito^b, Prof. Dr. Diego Stalder^b, Prof. MSc. Federico Gaona^b

^aAlumno de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay. Email: lmiranda@fiuna.edu.py

^bAsesor de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la UNA.

PALABRAS CLAVE

Bajo costo.
Telemetría.
Amateur AX.25.
Componente Comercial
Salido del estante.
Radio Definida por
Software.
Antenas
Omnidireccionales.

RESUMEN

El desarrollo de tecnología espacial básica abre una oportunidad de involucrar diversos sectores del país como la academia y el gobierno. El GuaraniSat-1, es el “Primer Nanosatélite de Paraguay” construido y lanzado en el contexto del Proyecto Paraguay al Espacio de la Agencia Espacial del Paraguay (AEP). Unos de los elementos importantes de toda misión espacial es el segmento terrestre ya que permite recibir datos y enviar comandos al satélite. Sin embargo, los costos de implementación de estos sistemas pueden superar los presupuestos disponibles por este motivo se propone del diseño de una estación terrestre de bajo costo. El presente trabajo final de grado presenta dos modelos de segmento terrestre, el primer prototipo permite recibir señales de telemetría en la banda de Ultra Alta Frecuencia (UHF) mientras que el segundo es capaz de transmitir y recibir paquetes de radio el protocolo Amateur X.25 (AX.25) en la banda de Muy Alta Frecuencia (VHF) aplicables para misiones satelitales Digipeater y Store & Forward. Los requerimientos de hardware y software se basaron en las recomendaciones de la Asociación Mundial de Satélites de Radioaficionados (AMSAT) y las Estaciones Terrenas Abiertas en red Satelital (SatNOGS). Se utilizaron Componentes Comerciales Salidos del estante (COTS, del inglés Commercial Off-The-Shelf), Radio Definida por Software (SDR) y aplicaciones de licencia pública general (GPL) para controlar el hardware de la estación de radio y los datos de la misión. Para reducir los costos en lugar de utilizar sistemas de seguimiento se utilizaron antenas omnidireccionales basados en los cálculos de enlace satelital. Los prototipos fueron integrados y validados mediante la recepción y decodificación de señales de radio de diversos nanosatélites. Las estaciones de bajo costo permitirían implementar a proyectos para la promoción de capacidades en el área de telecomunicaciones en instituciones educativas del nivel medio y universitario.

KEYWORDS

Low cost.
Telemetry.
Amateur AX.25.
Commercial
Off-The-Shelf.
Software Defined Radio.
Omnidirectional Antenna.

ABSTRACT

The development of basic space technology opens an opportunity to involve various sectors of the country such as academy and government. GuaraniSat-1 is the First Paraguayan Nanosatellite built and launched in the context of the Paraguay Space Project of the Paraguayan Space Agency (AEP). One of the main elements of any space mission is the ground segment since it allows receiving data and sending commands to the satellite. However, the implementation costs of these systems can exceed the available budgets, for this reason is proposed the design of a low-cost ground station. This final degree project presents two ground segment models, the first prototype allows receiving telemetry signals in the Ultra High Frequency band (UHF), while the second one is capable of sending and receiving radio packets with the Amateur X.25 protocol. (AX.25) in the Very High Frequency band (VHF), applicable for Digipeater and Store & Forward satellite missions. The hardware and software requirements were based on the recommendations of the World Association Radio Amateur Satellites (AMSAT) and the Open Earth Stations in Satellite Network (SatNOGS). Commercial Off-The-Shelf (COTS), Software Defined Radio (SDR) and General Public License (GPL) applications were used to control the radio station's hardware and mission data. To reduce costs, instead of using tracking systems, omnidirectional antennas were used based on satellite link calculations. The prototypes were integrated and validated by receiving and decoding radio signals from various nanosatellites. The low-cost stations would allow the implementation of projects for the promotion of capacities in the telecommunications area of educational institutions of the secondary and university levels.

1. INTRODUCCIÓN

El entorno espacial continuó cambiando rápidamente en 2021 con el despliegue acelerado de megaconstelaciones satelitales en órbita terrestre baja (LEO, del inglés Low Earth Orbit) [1] [2] [3] aumentando la demanda para el despliegue de pequeñas cargas útiles [4]. La figura 1 captura la evolución de los últimos 60 años del entorno espacial en términos de número de objetos por tipo de órbita.

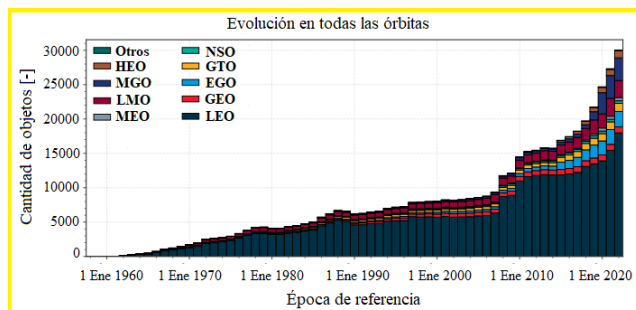


Fig. 1: Evolución de los números de objetos espaciales por tipo de órbita. **Fuente:** [4].

A este hecho los nanosatélites se están convirtiendo en plataformas educativas y de innovación relevantes debido a su costo relativamente bajo. Actualmente, hay cientos de ellos en el espacio, tienen muchas misiones con aplicaciones que décadas atrás eran impensadas, tales son (i) Observación de la tierra; (ii) Seguimiento de activos; (iii) Internet de las cosas (IoT, del inglés Internet of Things) y (iv) Aplicaciones científicas [5] como recolección de datos de sensores instalados en áreas remotas [6].

En toda misión espacial es necesario el diseño de un segmento terrestre que permite la gestión de una nave espacial, y la distribución de datos de carga útil y telemetría. Algunos ejemplos de costos en implementación de segmentos terrestres ofrecidos por algunas empresas se pueden constatar en los siguientes: el primero corresponde a la empresa Alén Space [5] y el segundo a ISISPACE [7], ambas empresas dedicadas al desarrollo de pequeños satélites y soluciones llave en mano para proyectos en el espacio. Sin embargo, los costos de implementación de estos sistemas muchas veces superan los presupuestos de algunas organizaciones, como la academia.

Los avances recientes en la tecnología Radio Definida por Software (SDR, del inglés Software Defined Radio) de bajo costo y la impresión 3D han hecho posibles redes de estaciones terrestres (GS, del inglés Ground Station) y móviles. Se han propuesto varios proyectos de GS de bajo costo para su implementación con diferentes protocolos de comunicación, modulación, frecuencias de enlace ascendente y descendente, antenas, polarización [8][9] [10]. El proyecto FUNcube es un ejemplo de un esfuerzo bien organizado para recibir y recopilar datos de los satélites con fines educativos [11]. Otro ejemplo es el proyecto SatNOGS, cuyo objetivo es conectar a los usuarios/observadores de satélites con los operadores de estaciones terrestres [12]. Sin embargo, la mayoría de estos proyectos mencionados están diseñados solo para recibir datos de un solo satélite en específico.

Para un segmento terrestre educativo en los cursos de ingeniería, este sistema puede animar a los estudiantes a analizar y comprender las propiedades de las señales, funcionamiento y estado de salud (eléctrica) de nanosatélites. Se pueden realizar investigaciones y experimentos para

proponer misiones satelitales de monitoreo con sensores en áreas remotas, IoT, etc. En tanto que en cursos para la educación media podría entusiasmar y educar a los jóvenes sobre la astronomía, radioafición, el espacio, la física y la electrónica.

Por lo tanto se buscará desarrollar en el presente trabajo final de grado el diseño de un sistema de telecomunicación de bajo costo para el enlace con satélites LEO, que pueda ser implementado por centros de investigación, universidades, colegios e instituciones del país.

Dentro de los objetivos de este trabajo esta la de colaborar con la Agencia Espacial del Paraguay (AEP) para el montaje e implementación de un segmento terrestre para el GuaraniSat-1, “Primer Nanosatélite del Paraguay” [13].

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de telecomunicación de bajo costo para el enlace con satélites de órbitas LEO.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las características y efectos del medio de propagación en las señales radioeléctricas para el seguimiento de satélites LEO;
- Analizar los criterios y recomendaciones según la ITU para el cálculo del balance de potencia en la banda de frecuencia VHF/UHF para ambos sistemas de telecomunicaciones Tierra-Espacio;
- Implementar un Estación Terrena de recepción basada en SDR de bajo costo en la Banda UHF, para decodificar señales CW procedentes de satélites LEO;
- Implementar una Estación Terrena semidúplex de bajo costo en la Banda VHF, para transmitir y/o recibir señal de radio por paquetes hacia y/o desde satélites LEO;
- Colaborar en la implementación de una estación terrena a ser utilizada por la Agencia Espacial del Paraguay con el GuaraniSat-1, Primer Satélite Paraguayo.

3. Alcance y limitaciones

El presente trabajo final de grado presenta dos modelos de segmento terrestre, el primer prototipo permite recibir señales de telemetría en la banda de UHF y el segundo prototipo es capaz de transmitir y recibir paquetes de radio en la banda VHF aplicables para misiones satelitales Digipeater y Store&Forward. Como resultado del trabajo se propone, cálculos de enlace satelital con antenas omnidireccionales para ambos modelos y la determinación del ángulo mínimo de comunicación.

4. MARCO TEÓRICO

El diseño de todo sistema de telecomunicación comienza con un análisis del balance de potencia del enlace Tierra-Espacio (*Uplink*) y Espacio-Tierra (*Downlink*), donde a través de algunos parámetros se podrá constatar su fiabilidad. Para asegurar que la información sea correctamente transmitida se necesitan definir criterios claros a la hora de seleccionar cada uno de los componentes del sistema.

Algunos de los requerimientos utilizados para definir los requerimientos de un enlace de comunicación son la relación Señal a Ruido (S/N) y relación de Energía por bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido (E_b/N_0) [14].

Para un óptimo análisis del radioenlace se necesita comprender los parámetros de radiofrecuencias de cada uno de los segmentos involucrados (Espacial y Terrestre), así como el medio de propagación, dicho esquema se puede visualizar en la figura 2.

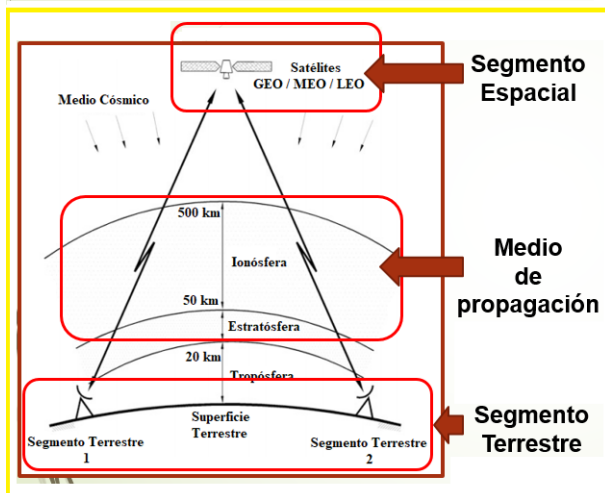


Fig. 2: Trayecto típico de ondas de radio en un enlace de radio con satélites. **Fuente:** [15].

4.1. Satélites en órbita terrestre baja

Un satélite es un objeto artificial en el espacio, por lo cual está sometida a las mismas leyes de rotación como lo hacen los planetas en su rotación alrededor del sol. En esta categoría se encuentran los satélites LEO. Las siglas LEO (del inglés: Low Earth Orbit), es decir, “Órbita terrestre baja”, lo que quiere decir que los mismos orbitan cerca de la superficie terrestre.

Los parámetros básicos de los satélites LEO de comunicación son la frecuencia de comunicación y la órbita. Para el segmento terrestre se tiene en cuenta parámetros como el tiempo de visibilidad, modos de comunicación, etc.

Un satélite es un sistema muy complejo y delicado, integrado por varios subsistemas; cada uno de ellos es igualmente importante, pues su probable falla podría causar la inutilidad parcial o total del conjunto. El satélite necesita energía eléctrica, disipar calor, corregir sus movimientos y mantenerse en equilibrio, ser capaz de regular su temperatura, ser resistente al medio en el que vive y, desde luego, poder comunicarse con la tierra [16]. Dichos conjuntos de subsistemas son:

- De la computadora a bordo (OBC): Telemetría y Telemandos;
- De determinación y control de actitud;
- De energía eléctrica;
- De control térmico;
- De comunicaciones.

Los subsistemas de comunicación se encuentran entre las partes más críticas de los satélites, ya que proporcionan el único acceso a la nave espacial. Durante las operaciones del

satélite, los enlaces de comunicación se utilizan para comandos, recuperación de la telemetría, el seguimiento, y tareas como la aplicación de actualizaciones de software [15]. Por lo tanto, el conocimiento de los elementos del subsistema de comunicaciones como bandas de frecuencias asignadas, tipos de antenas y modo de trabajo de los transpondedores adquiere relevancia para el diseño del segmento terrestre.

4.2. Principales fenómenos de propagación en la señal para el enlace con satélites LEO

En las comunicaciones por satélite, el trayecto de las ondas de radio entre la Tierra y los satélites se encuentran con diferentes fenómenos relacionados con la propagación. Estos fenómenos se evalúan según [15] en las siguientes:

- Consideraciones ambientales locales relacionadas con la estación terrena.
- Efectos de la capa de la troposfera.
- Efectos de la capa de la ionosfera.
- Efectos más allá de la Tierra o del espacio profundo.

La recomendación UIT-R P.618-13 [17] denominada *Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio* es una de las principales y prevé los diversos parámetros de propagación necesarios en la planificación de sistemas que funcionan en el sentido Tierra-espacio o espacio-Tierra [17]. En la tabla ?? pueden observarse la respuesta en frecuencia de algunos de los fenómenos a los que se ve sometido la señal a lo largo de su propagación.

Particularmente para el seguimiento de los satélites LEO, habría que tener en cuenta los siguientes fenómenos:

1. cambio de azimut y elevación del satélite respecto de la superficie terrestre, ya que este se encuentra orbitando a una velocidad de 7 km/seg [18];
2. frecuencia de recepción es distinta a la de transmisión, debida al “efecto Doppler” [19];
3. el efecto de cambio de polarización en la recepción debido al movimiento constante del satélite [20];
4. la órbita del satélite LEO debe actualizarse periódicamente debido a la variación de los elementos Keplerianos de dos líneas (TLE, del inglés Two Line Elements) [21].

Bajo lo expuesto estos factores resultan de vital importancia para el óptimo funcionamiento de la estación;

TABLA 1: Máximo desplazamiento Doppler para diferentes bandas

Frecuencia	Banda Aficionado	Doppler
145.900 MHz	2 m	± 3.27 KHz
435.070 MHz	70 cm	± 9.76 KHz
1269 MHz	23 cm	± 28.5 KHz
2400 MHz	13 cm	± 53.8 KHz

Fuente: [19].

Este trabajo tendrá en cuenta las recomendaciones ITU-R P.618-13 [17] para fenómenos de propagación y la UIT-R P.372-15[22] para el análisis del ruido radioeléctrico, ambos para realizar el calculo de radioenlace entre los Cubesats y el segmento terrestre.

4.3. Segmento terrestre para satélites LEO

Una parte fundamental de la misión espacial es el diseño de la estación terrena. Este subsistema tiene como misión principal la comunicación con los satélites de órbita baja en los tiempos de visibilidad para descargar datos de telemetría, enviar comandos y recibir datos de la carga útil [23]. La particularidad con este tipo de sistemas es que la transmisión de la Tierra al espacio y viceversa solo se produce cuando el nanosatélite se encuentra visible para la estación terrena.

Otros datos a tener cuenta para el diseño de un segmento terrestre deben ser (i) ubicarla en una zona alta sin nada que pueda interferir, teniendo el horizonte despejado en todas direcciones. (ii) La ubicación de la estructura GS debe proporcionar un cable de tierra para conectar el pararrayos. (iii) La sala del transceptor deberá estar lo más próximo a las antenas. (iv) Los cables de RF muy largos pueden atenuar demasiado la señal. (v) La sala del transceptor deberá contar con conexión eléctrica y de internet. (vi) Y por último quizá el aspecto más importante como se hará uso del espectro radioeléctrico, existen aspectos regulatorios, por lo tanto la GS deberá contar con las debidas autorizaciones de la Administración local (CONATEL) [24].

El segmento terrestre generalmente está equipado con un solo rotador de azimuth y elevación para rastrear el segmento espacial. Una sola PC controla el hardware de la estación terrestre y los datos de carga útil de la misión [25]. Una configuración para una estación terrena típica puede apreciarse en la figura 3.

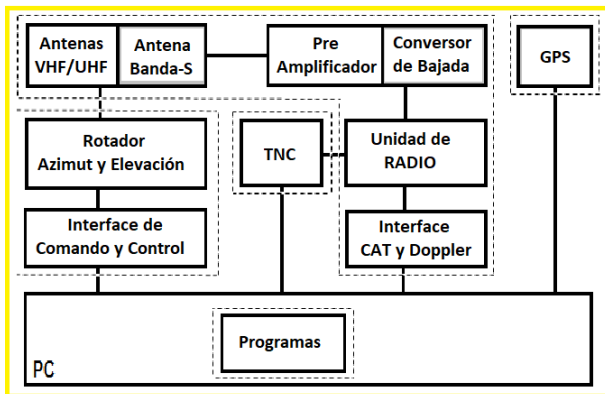


Fig. 3: Diseño típico de la arquitectura de un segmento terrestre para las bandas VHF/UHF/S. **Fuente:** [19].

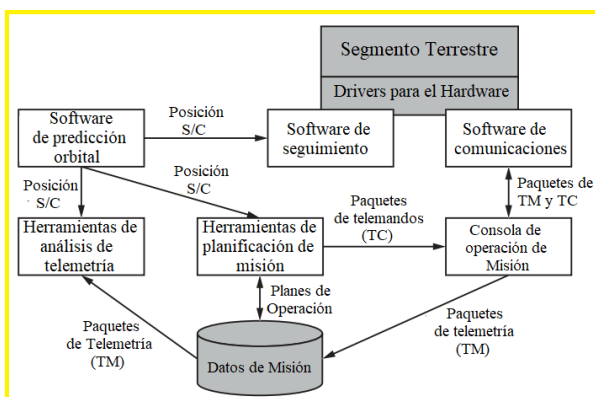


Fig. 4: Arquitectura de software del segmento terrestre. **Fuente:** [26].

Un esfuerzo significativo del diseño de un segmento de terrestre debe estar en la selección y desarrollo de los software del GS. Estos programas gestionan todos los elementos de hardware y proporcionan herramientas a los operadores para ejecutar su trabajo. Según otras fuentes también es llamada Unidad de Control y Visualización [16]. En la figura 4 se observa una arquitectura de software típica de un segmento terrestre que se utiliza para diferentes etapas de la operación.

La idea principal detrás de los dispositivos Radio Definida por Software - SDR (del inglés: Software Defined Radio) es reemplazar algunos de los componentes de hardware de los segmentos terrestres por componentes de software. Esto se puede lograr realizando la conversión analógico a digital lo más cerca posible a la antena e implementando técnicas de procesamiento digital de señales [26].

Esta arquitectura basada en software brinda la flexibilidad de cambiar fácilmente la definición de la modulación, el tipo de señal o los anchos de banda. Con los SDR, las estaciones terrestres aumentan su flexibilidad, compatibilidad y reducen su costo, ya que el hardware es posible usarlo en diferentes misiones.

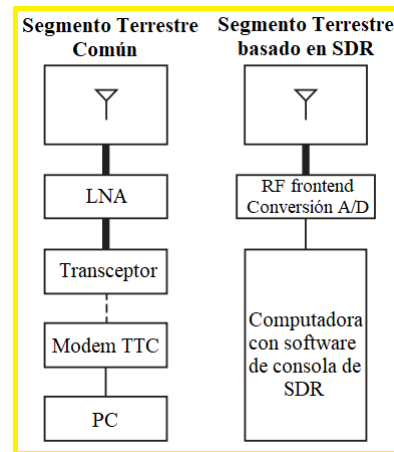


Fig. 5: Segmento Terrestre común versus Basado en SDR. **Fuente:** [26].

4.3.1. Confiabilidad de los enlaces satelitales LEO

La comunicación deseable en los sistemas digitales es en términos de Tasa de error de bits (BER, del inglés Bit error ratio) y en los sistemas analógicos es en términos de Relación Señal a Ruido (SNR, del inglés Signal to Noise Ratio). Para lograr la confiabilidad requerida, es esencial considerar la asignación de algún valor para el margen de desvanecimiento en el enlace. Esta cantidad de margen de desvanecimiento dependerá de la confiabilidad requerida y también de la frecuencia de trabajo [15].

El criterio de la relación señal a ruido mínima depende de la modulación empleada en el enlace y comparando con la relación señal a ruido real del sistema medida, se obtiene por resultado un margen. Según [15] el margen de seguridad se refiere a la diferencia en decibelios entre las relaciones portadora/ruido reales y requeridas relevantes para el enlace de interés expresado por la ecuación 1.

$$\text{Margen}_{SNR} [dB] = SNR_{real} [dB] - SNR_{mínima} [dB](1)$$

El parámetro E_b/N_0 mínima o también llamada requerida refleja las diferencias de un diseño de sistema a otro; esto puede deberse a diferencias en los esquemas de modulación o

codificación. Un valor E_b/N_0 requerida mayor de lo esperado puede deberse a un sistema de RF no optimizado, que manifiesta grandes errores de sincronización o que permite que entre más ruido en el proceso de detección que un filtro adaptado ideal [27]. Este margen puede ser calculado según [27] a través de la ecuación 2.

$$\text{Margen } E_b/N_0 \text{ [dB]} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{real}} \text{ [dB]} - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{mínima}} \text{ [dB]} \quad (2)$$

Con el sistema a implementar en este trabajo el primer prototipo utilizará la modulación Onda Continua (CW) y el segundo prototipo con la modulación por desplazamiento de frecuencia y audio (AFSK, del inglés Audio Frequency Shift Keying). Se toma como criterio de SNR mínima 10 dB en el cálculo de enlace para ambos modelos. Para la selección de dicho valor se han revisado los cálculos de enlace de los siguientes proyectos [28] [29] [30] [31].

Actualmente la AMSAT ha puesto a disposición una hoja de cálculo del presupuesto de enlace con satélites LEO de calidad profesional para el uso de aficionados y otros desarrolladores de satélites no comerciales [32]. Allí puede se encuentra el valor de una E_b/N_0 mínima que puede observarse en la tabla 2 [33].

TABLA 2: Márgenes mínimos de E_b/N_0 para diferentes tipos de Modulación, Codificación y BER en enlaces satelitales LEO.

Tipo de Modulación	BER especificada	E_b/N_0 mínima requerida (dB)
AFSK/FM	1.00E-04	21.0
AFSK/FM	1.00E-05	23.2
G3RUH FSK	1.00E-04	16.7
G3RUH FSK	1.00E-05	18.0
FSK No-Coherente	1.00E-04	13.4
FSK No-Coherente	1.00E-05	13.8
FSK Coherente	1.00E-04	10.5
FSK Coherente	1.00E-05	11.9
GMSK	1.00E-04	8.4
GMSK	1.00E-05	9.6
BPSK	1.00E-05	9.6
BPSK	1.00E-06	10.5
QPSK	1.00E-05	9.6
QPSK	1.00E-06	10.5

Fuente: [33] [32].

5. PROPUESTA Y DISEÑO DE IMPLEMENTACIÓN

5.1. Análisis costo/beneficio para usos de antenas direccionales y sistemas de rotadores en segmentos terrestres de satélites LEO de bajo costo

De la figura 6 se puede clasificar básicamente en 4 sistemas un segmento terrestre típico:

- Sistemas de Antenas
- Sistemas seguimiento de satélites LEO
- Sistema de adquisición de señal
- Sistema de control y procesamiento de datos

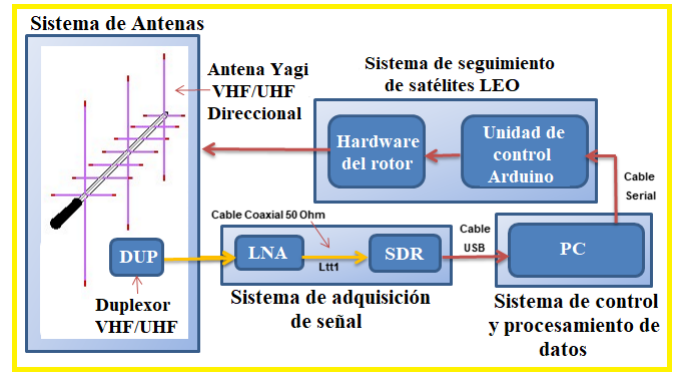


Fig. 6: Propuesta inicial de un segmento terrestre de recepción UHF basada en SDR con antena direccional. **Fuente:** Elaboración propia.

Sin duda el sistema que ha despertado las suspicacias al realizar un análisis costo/beneficio para sostener un segmento terrestre a bajo costo ha sido el sistema de seguimiento de satélites LEO. Este sistema usualmente se compone de rotadores para azimuth/elevación y elementos estructurales. Por lo tanto en fases previas a una posible prueba e implementación se ha realizado un estudio costo/beneficio sobre los sistemas rotadores disponibles en el mercado.

Como resultado del estudio hecho se ha decidido descartar el sistema de seguimiento de satélites LEO debido a las siguientes razones:

- Dicho sistema también demandaría un estudio de balance de cargas para el sistema de antenas en los elementos estructurales que corresponde al área de ingeniería mecánica, que ya escapa a los objetivos de este trabajo;
- Todas las unidades comerciales disponibles no pueden ser adquiridas en el mercado local, lo que llevaría a un costo adicional por exportación;
- También se han encontrado sistemas de seguimiento de bricolaje a bajo costo, sin embargo demandan constante mantenimiento y tiempo de desarrollo que ya escapa de los objetivos de este trabajo, por lo cual será propuesto como trabajo futuro;
- El método de apuntamiento manual por operador tiene la ventaja que no requiere ningún costo. Sin embargo tiene dos desventajas; primero se necesita un costo adicional en recurso humano; uno para el sistema de control y otro para el sistema de seguimiento. Segundo, este método es muy limitado para antenas de gran volumen en caso que el link budget demande antenas de altas ganancias.

Según [34], para la operación de satélites LEO, se puede obtener señales bastante fuertes usando solo una antena omnidireccional optimizada para elevaciones altas, como la región mostrada en amarillo en la figura 7 que corresponde a estadísticas de elevaciones durante el tiempo de visibilidad de satélites [35].

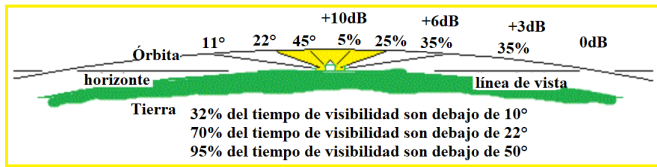


Fig. 7: Estadísticas de elevaciones durante el tiempo de visibilidad de satélites LEO. **Fuente:** [34].

Vale mencionar que en proyectos como el *Irazu* [36] y el trabajo *Servicio WEB para satélites meteorológicos NOAA basado en receptor SDR* [10] han sido utilizados antenas omnidireccionales para segmentos terrestres de satélites LEO obteniendo resultados satisfactorios.

Por lo tanto se plantea una nueva propuesta para el segmento terrestre a bajo costo suprimiendo el sistema de seguimiento de satélites LEO y compensar dicho sistema utilizando antenas omnidireccionales.

5.2. Prototipo de un segmento terrestre UHF basada en SDR a bajo costo sin necesidad de licencia.

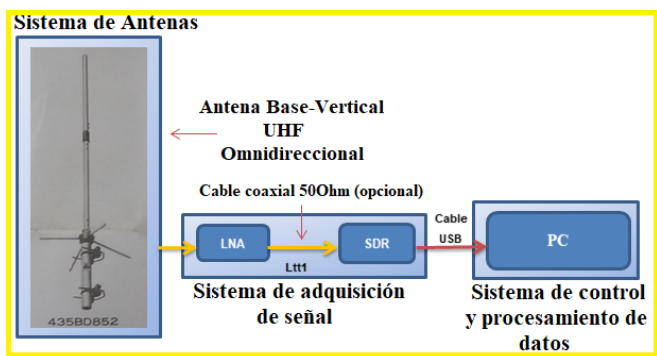


Fig. 8: Segmento terrestre de recepción UHF basada en SDR con antena omnidireccional. **Fuente:** Elaboración propia.

5.2.1. Misión

Este diseño representado en la figura 8 consiste en un segmento terrestre basado en SDR para un enlace descendente en la banda de UHF, capaz de recibir señales baliza CW a 437.375 MHz desde nanosatélites que transmiten a muy baja potencia cerca de los 100mW o 20dBm. El software de comunicaciones decodifica los caracteres del CW para extraer los datos básicos de mantenimiento (HK, del inglés: Housekeeping Data) del satélite.

5.2.2. Análisis del segmento espacial

Por ejemplo la constelación de satélites BIRDS3 (NepaliSat-1, Raavana-1, Uguisu) [28] envían paquetes de 5 bytes (40 bits) que contienen el estado eléctrico del satélite, como el voltaje, las corrientes y las temperaturas de la batería, etc. como se observa en la figura 16.

Los satélites Maya3 y Maya4 [30] poseen un formato similar que se muestra en la figura 10. Todos los satélites anteriormente mencionados serán compatibles con este segmento terrestre en frecuencia y tipo de señal emitida.

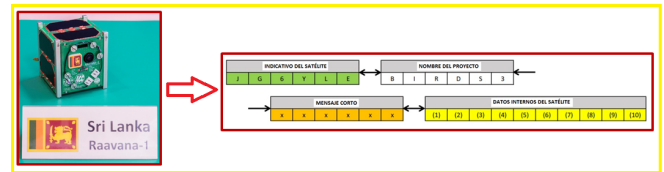


Fig. 9: Formato misión CW del Raavana-1. **Fuente:** [37].

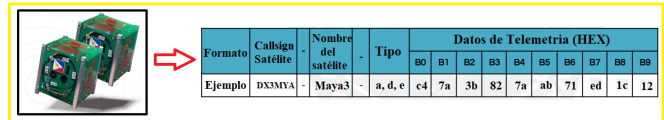


Fig. 10: Formato CW de telemetría de los nanosatélites Maya3 y Maya4. **Fuente:** [30].

5.2.3. Análisis para la selección de las unidades del Segmento Terrestre

A continuación se lista las unidades Hardware y Software más importantes del segmento terrestre propuesto. Como el objetivo de este trabajo consiste en diseñar un sistema de bajo costo, para la selección de las unidades se tuvieron en cuenta tanto la característica del dispositivo como el valor monetario del mismo.

Sistema de antenas

La Antena Base Vertical 435BD852 MASPRO [38] es proveída por el Laboratorio de Transmisión y Accesos Inalámbricos (CITEC). Longitud eléctrica: Λ . Rango de Frecuencia: 430 a 440 MHz. Ganancia: 6 dBi. [38]. El diagrama de radiación a dar cobertura durante la pasada del satélite se observa en la figura 11.

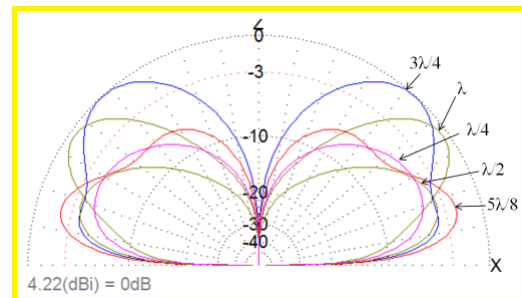


Fig. 11: Comparación de patrón de radiación de campo lejano de antenas verticales. **Fuente:** [39].

Sistema de adquisición de señal

- Unidad de Amplificación Fornt-End:

El amplificador de bajo ruido (LNA) Hiletgo [40] posee un rango de frecuencia: 0.1 a 2000MHz; ganancia: 30dB; Figura de ruido: 2dB.

- Unidad de Radio Definida por Software:

El dispositivo Noolec NE-SDR Smartee V4 [41]. Chip Basado en RTL2832U - R820T2 [42] [43]. Además posee un conector USB 2.0 y un conector de antena tipo SMA hembra. El dispositivo posee una arquitectura SDR similar al Tipo IF mencionado en el capítulo [44].

Sistema de control y procesamiento de datos

La jerarquía para el software de control y visualización cuenta con tres programas diferentes de la siguiente manera: (i) el control y operación del SDR, muchos de ellos son gratuitos y con licencia comercial; (ii) un programa para decodificar/demodular los datos de la misión, para este caso sería decodificadores Modo CW; (iii) un programa de predicción de órbitas que muestra las posiciones de los satélites en tiempo real o simulado, también corrige el desplazamiento Doppler controlando la frecuencia de sintonización del SDR y por último (iv) un software de análisis de telemetría del satélite.

- Software de control SDR:

El programa HDSDR [45] se basan en la librería librtlsdr [46]. Los dispositivos RTL-SDR contienen tanto esta librería, como herramientas basado en línea de comandos que realizan funciones de transferencia de datos desde y hacia el dispositivo.

- Software para predicción y seguimiento de Satélites:

los programas SatPC32 [47] y el Orbitron [48] poseen la funcionalidad de ser predictor orbital y de seguimiento de satélites. Por último satisfacen la condición de ser compatibles con el programa HDSDR [45] para el ajuste doppler automático como se observa en la figura 12.

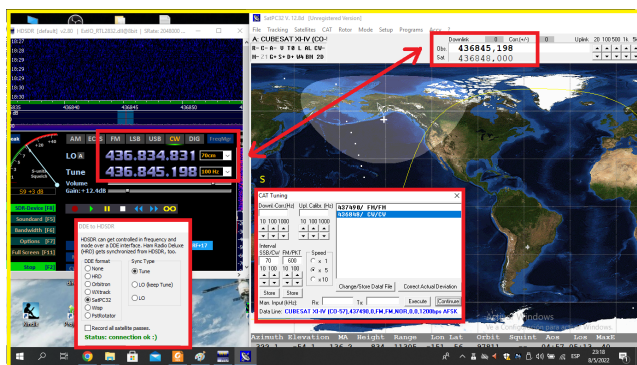


Fig. 12: Enlace virtual de comunicación entre el HDSDR (SDR) y SatPC32 para el ajuste Doppler del RTL-SDR. **Fuente:** [45][47].

- Software de comunicaciones:

El proceso de decodificación se puede lograr con programas como: CwSkimmer[49] y CwDecoder [50] con sistema operativo Windows a través de un enlace por cable de audio virtual [51] entre la programa consola del SDR (HDSDR).

- Software análisis de telemetría:

Los programas de análisis de telemetría son desarrollados por los stakeholders desarrolladores de los nanosatélites. Se utilizará de la constelación BIRDS3 [52] y del Maya-3 [30].

Según [53] [54] [55] se concluye que la configuración mínima absoluta recomendada para el computador de la estación es: Windows 7 de 64 bits o superior, procesador Core 2 Duo Intel I3, 4 GB de RAM. O También como PC embebido una Raspberry Pi 3B+ [56] o superior como se ha utilizado en este proyecto [10] ya citado anteriormente para la recepción de señales APT de los satélites NOAA [57].

5.2.4. Cálculo de presupuesto de enlace Downlink

A modo de validar que los componentes seleccionados garantizan el diseño de un sistema de telecomunicación Espacio-Tierra fiable se realiza el cálculo de enlace bajada (Downlink). La recomendación UIT-R P.618-13 [17] denominada *Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio* prevé los diversos parámetros de propagación necesarios en la planificación de sistemas Tierra-espacio en la banda de UHF. Los resultados pueden observarse en la figura 13.

Parámetros Satélite: Raavana-1 (JG6YLG)					
Frecuencia [MHz]	437.375				
Tipo de Emisión / Modulación	500HA1A / Onda continua				
Tasa de transmisión [wpm]	20				
Potencia de Transmisión [dBm]	20				
Pérdida línea de transmisión [dB]	3.00				
Ganancia antena [dBi]	2.15				
P.I.R.E [dBm]	19.2				
Tramo del enlace de bajada					
Pérdida por apuntamiento de antena Satélite [dB]	5.00				
Pérdida por polarización antena SAT-GS [dB]	3.00				
Pérdidas atmosféricas + Pérdidas Ionosféricas [dB]	0.63				
Máxima Elevación por pasada	5º	20º	35º	50º	75º
Distancia enlace Satélite-GS [km]	1827	987	661	509	412
Pérdida del espacio libre [dB]	150.5	145.1	141.6	139.4	137.6
Nivel de señal isotrópica en la GS [dBm]	-139.9	-134.5	-131.1	-128.8	-127.0
Parámetros Estación Terrena (GS)					
Pérdida de apuntamiento de antena GS [dB]	-20.0	-3.0	0.0	-3.0	-20.0
Ganancia de antena [dBi]	5.8				
Temperatura de Antena [K]	290				
LNA: Ganancia [dB] / Figura de ruido [dB]	31.0 / 2.0				
Pérdida línea de transmisión [dB]	0.00				
Temperatura efectiva de ruido [K]	460				
Análisis SNR: SDR Input					
Figura de mérito (G/T) [dB/K]	-20.8				
Relación Señal a Densidad Potencia de Ruido (S/No) [dB-Hz]	17.9	40.3	46.7	46.0	30.8
Nivel de señal en entrada SDR [dBm]	-123.1	-100.7	-94.3	-95.0	-110.2
Ancho de Banda receptor [Hz]	500				
Potencia de ruido en receptor GS [dBm]	-114.0				
Relación SNR en receptor [dB]	-9	13.3	19.7	19.0	3.8
Relación SNR requerida [dB]	10				
Margen de Enlace SNR [dB]	-19	3.3	9.7	9	-6.2

Fig. 13: Cálculo de enlace de bajada - GS UHF basada en SDR. **Fuente:** Elaboración propia.

5.3. Prototipo de un segmento terrestre semidúplex VHF de radiopaquetes a bajo costo con licencia requerida.

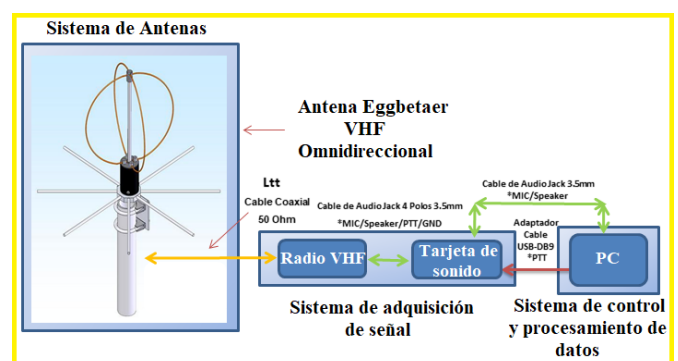


Fig. 14: Segmento terrestre semidúplex VHF de Radiopaquetes con antena omnidireccional. **Fuente:** Elaboración propia.

5.3.1. Misión

Este diseño representado en la figura 14 consiste en un segmento terrestre semidúplex en la banda de VHF (145.825MHz), donde el modo de operación consistiría en la transmisión y recepción de señales de radio por paquetes hacia / desde satélites que operan con el modo APRS-Dgipeater. El software de comunicaciones codifica/decodifica los radiopaquetes modulados en AFSK para la comunicación entre dos estaciones distantes en la superficie utilizando el transpondedor del satélite como repetidor. La aplicación es ilustrada en la figura 15.

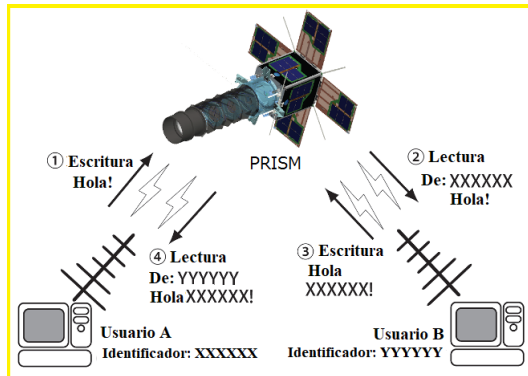


Fig. 15: Satélite Modo Digipeater Descripción general del servicio de radioaficionados PRISM - Crédito de la imagen Universidad de Tokio. **Fuente:** [58].

5.3.2. Análisis del segmento espacial

Los segmentos espaciales que poseen transpondedores en las bandas de radioaficionados VHF con el formato de repetidores digitales APRS son la Estación Espacial Internacional (ISS) [59] y PSAT2 Navy Oscar 104 (NO-104) [60].

APRS creado por Bob Bruninga WB4APR. Utiliza una transmisión de radio por paquetes a 1200 baudios o 9600 baudios. Permite enviar un informe de datos como: coordenadas GPS, altitud, rumbo y velocidad de la estación. Así como información meteorológica, mensajes o el estado de sistemas, como temperatura de funcionamiento y estado de la batería, etc. Todas las transmisiones APRS utilizan las tramas UI del protocolo AX. 25 UI [61] [62] con 9 campos como el que se ilustra en la figura 16

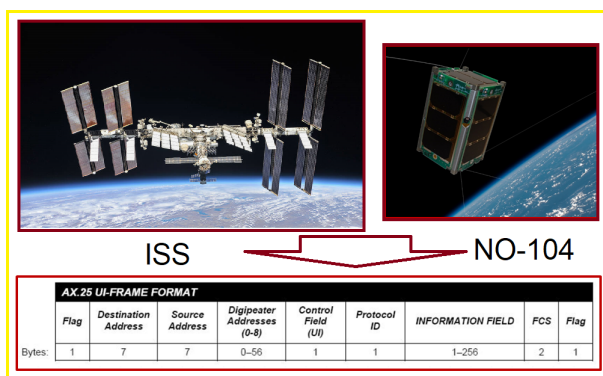


Fig. 16: Formato APRS utilizados por la ISS y el NO-104 como repetidor digital. **Fuente:** [60].

Los satélites LEO mencionados transmiten con potencia entre los 5W a 15W y frecuencia de 145.825 MHz. Retransmiten paquetes AFSK/APRS a 1200 bps (APRS - Digipeater).

5.3.3. Análisis para la selección de las unidades del Segmento Terrestre

A continuación se lista las unidades Hardware y Software más importantes del segmento terrestre propuesto. Como el objetivo de este trabajo consiste en diseñar un sistema de bajo costo, para la selección de las unidades se tuvieron en cuenta tanto la característica de los dispositivos como el valor monetario del mismo.

Sistema de antenas

La antena seleccionada fue la Eggbeater EB-144/RK-2M M2 Inc [63] proveída por la Agencia Espacial del Paraguay. La antena Eggbeater se compone de dos bucles (loops) de onda completa de alambre rígido o tubo de metal. Los bucles se alimentan 90° desfasados entre sí y esto crea un patrón de polarización circular. El diagrama de radiación a dar cobertura durante la pasada del satélite se observa en la figura 17.

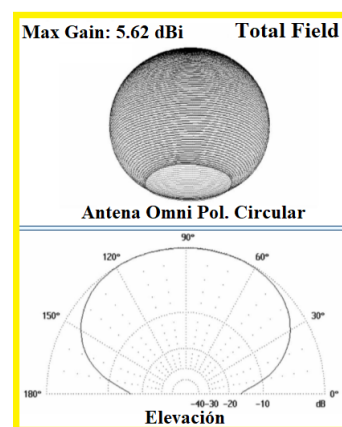


Fig. 17: Diagrama de radiación Antena EB-144/RK-2M. **Fuente:** [63].

Sistema de adquisición de señal

- Cable coaxial:

El cable seleccionado fue el del Tipo RG-8 [64] (50 Ω). El punto de operación en cuestión es la frecuencia de 145.825 MHz, y en la figura 18 obtenemos la atenuación al medirlo con un analizador vectorial de redes NanoVNA [65]. Atenuación: 1.6 dB.

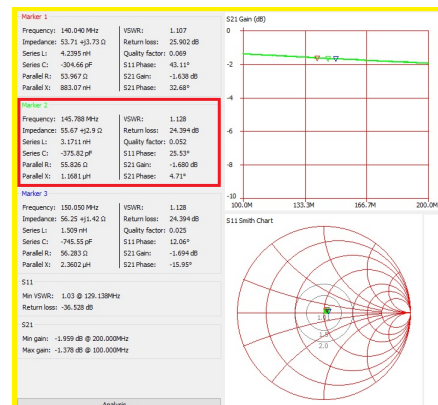


Fig. 18: Medición del parámetro S21. **Fuente:** Elaboración propia.

- Unidad de Radio/Transceptora:

De acuerdo al tipo de modulación empleada por la estación de radiopaquetes en el protocolo AX.25 es la modulación AFSK (del inglés: Audio Frequency Shift Keying), siendo estas señales moduladas/demoduladas por un simple FM transceiver y submoduladas en tonos de audio a 1200bps con un módem (TNC) [66], dicho esquema puede apreciarse en la figura 19.

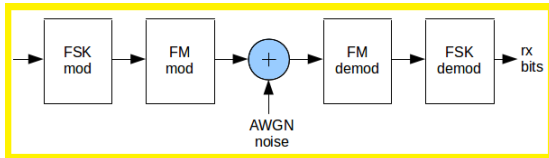


Fig. 19: Envío y recepción de una señal modulada FSK a través de una radio FM convencional. **Fuente:** [66].

La unidad de radio seleccionada es el transceptor portátil Baofeng UV-5R FM de doble banda VHF/UHF [67], que podría transmitir al menos una potencia de 5W. Este transceptor no tiene funcionalidad de transceptor asistido por computadora (CAT), por lo que el operador debe realizar la sintonización de radio manualmente debido al desplazamiento Doppler.

- Unidad Controlador de Nodo Terminal (TNC):

La utilización de un TNC incorpora tres funciones básicas a una estación de radio por paquetes, las cuales son (i) traducción de señales de audio a información digital y viceversa; (ii) control y almacenamiento de datos; (iii) comunicación con una PC o terminal. Sin embargo, de acuerdo al estudio y análisis hecho

Sin embargo, el TNC basado en hardware representan un costo elevado existiendo otras opciones con similar performance y de menor coste.

Se puede obtener mejores resultados a menor costo conectando un transceptor (radio) a la interfaz de "tarjeta de sonido" de una computadora y usando un software para decodificar las señales. Resultando el TNC basada en software la mejor solución. La arquitectura para la instalación de una estación de radio por paquetes con TNC (software) es representado en la figura 20.

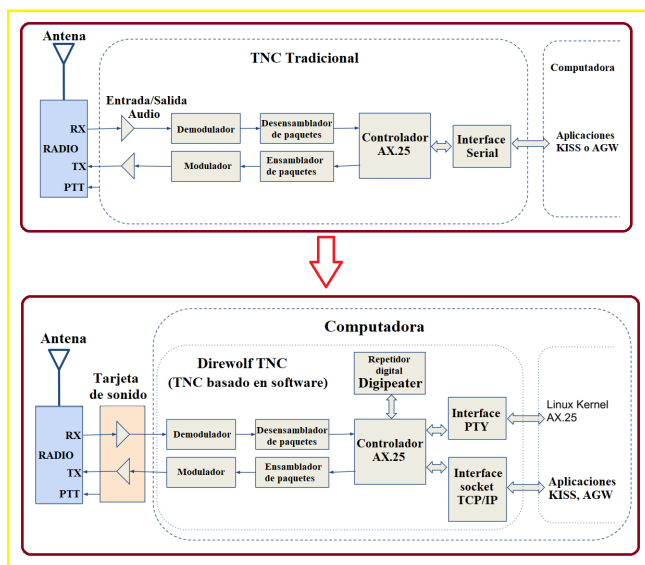


Fig. 20: Arquitectura de estación de radiopaquete con TNC basado en Hardware y otro basado en software. **Fuente:** [68].

- Unidad interface de audio Radio-PC

Con el puerto entrada/salida (Mic/Speaker) de la radio conectadas directamente a la tarjeta de sonido de la computadora y el control PTT de la radio manejado por una señal enviada desde un puerto COM o LPT y una computadora que ejecuta el TNC Software puede trabajar directamente con la radio, como se observa en la figura 20.

La unidad seleccionada para formar parte del segmento terrestre Semidúplex es la interfaz EASY-DIGI [69]. La misma consta de dos transformadores de línea de 600 Ω para la entrada y salida de audio entre Radio-PC, y un circuito push to talk optoacoplado que funciona con un puerto RS-232 en la computadora. Placa de circuito impreso de alta calidad FR-4 de un solo lado soldable y compatible con la mayoría de los transceptores de radioaficionados modernos.

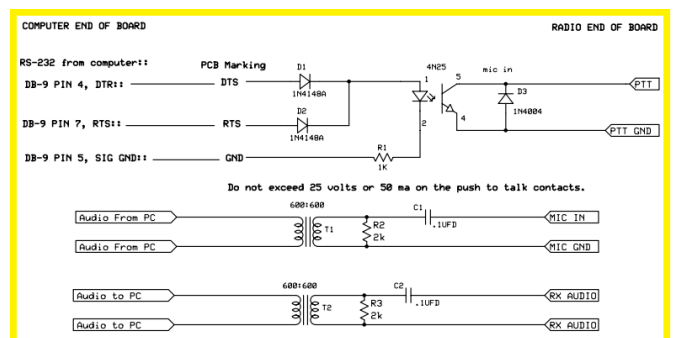


Fig. 21: Circuito interno Easy-Digi. **Fuente:** [69].

Sistema de control y procesamiento de datos

La jerarquía para el sistema de control y visualización cuenta con dos programas principales bien diferenciados: (i) el TNC basado en software, donde los mismos son de licencia pública y gratuita como ya se explicó más arriba; (ii) un programa para la codificación/decodificación de los datos de la señal, para este caso sería la aplicación APRS; utilizando tramas tipo AX.25. Este modelo funciona como el modelo cliente-servidor en redes de computadoras, siendo el TNC Software como *Servidor* y la aplicación APRS como *Cliente*.

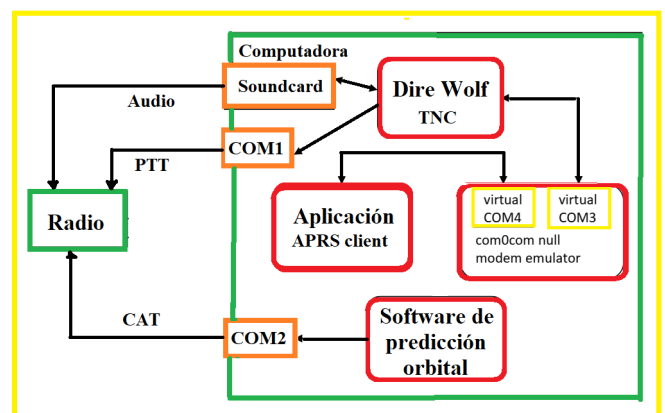


Fig. 22: Arquitectura Hardware/Software para una estación de radiopaquetes con Direwolf. **Fuente:** [70].

El software de predicción orbital y seguimiento es independiente a los dos softwares de comunicaciones recién mencionados.

- Software TNC:

Entre las unidades de TNC basados en software que van a ser utilizadas acorde su simplicidad de uso será el Direwolf [70]. Dire Wolf [70] (Del inglés: Decoded Information from Radio Emissions for Windows Or Linux Fanses) es un módem de paquete/TNC y codificador/descodificador APRS. Se puede usar de forma independiente para observar el tráfico APRS, como rastreador, digipeater, puerta de enlace APRStt o puerta de enlace de Internet (IGate). El SoundModem [71] también es de un fácil uso para SO Windows. Ambos no requieren de demasiado recursos en hardware para su ejecución en SO Windows y Linux.

- Software de comunicaciones:

El uso de software para la aplicación APRS se divide en dos categorías básicas: cliente y servidor. El software del servidor (TNC) normalmente está diseñado para ejecutarse en segundo plano sin una GUI. La función principal del software del servidor es pasar paquetes APRS a todos los clientes conectados [58].

El software APRS cliente normalmente tiene una GUI y está diseñado para un sistema operativo específico. El software cliente muchas veces puede actuar como un IGate [35] y retransmisión de paquetes y otras capacidades.

El programa seleccionado para la fase de pruebas fue el UISS [72]. Puede digitalizar encabezados de marcos de interfaz de usuario (UI-Frame) (sin protocolo) o completarlos con datos de Transmisión de texto, ubicación APRS y/o mensajes APRS, boletines, noticias, correo, etc [72]. Ha sido diseñado para facilitar la comunicación por paquetes de radio (por parte de operadores de radioaficionado) con la ISS (Estación Espacial Internacional), PCSat o satélites APRS compatibles [60].

- Software para predicción y seguimiento de Satélites:

Pueden ser utilizados los mismos software que ya se han visto y analizado en el prototipo 1, tales como Orbitrón [48], SatPC32 [47], Gprecit [73] y la App Look4sat [74]. Para este prototipo el programa solo nos servirá para la predicción y posiciones de los satélites en tiempo real. No es necesario que posea una interfaz CAT para la sintonización automática de la radio (Doppler) ya que dicho ajuste se realizará manualmente.

Según recomendaciones para la ejecución de todos los programas del sistema de control y visualización de datos se concluye que la configuración mínima absoluta para el computador de la estación es: Windows 7 de 64 bits o superior, procesador Core 2 Duo Intel I3, 4 GB de RAM. O También como PC embebido una Raspberry Pi 3B+ [70][71][72].

5.3.4. Cálculo de presupuesto de enlace Downlink / Uplink

A modo de validar que los componentes seleccionados garantizan el diseño de un sistema de telecomunicación Espacio-Tierra fiable se realiza el cálculo de enlace tanto de bajada (Downlink) como de subida (Uplink). La recomendación UIT-R P.618-13 [17] denominada *Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio* prevé los diversos parámetros de propagación necesarios en la planificación de sistemas Tierra-espacio en la banda VHF. Los resultados pueden observarse en la figura 13.

Elevación instantánea	10º	30º	45º	60º	80º
Parámetros Satélite ISS					
Potencia de Transmisión [dBm]	40				
Ganancia antena [dBi]	2.15				
Pérdida línea de transmisión [dB]	2.00				
P.I.R.E [dBm]	40.15				
Tramo del enlace de bajada					
Pérdida por apuntamiento de antena Satélite [dB]	5.00				
Pérdida por polarización GS-SAT [dB]	0.00				
Pérdidas atmosféricas + Pérdidas ionosféricas [dB]	4.88				
Distancia enlace Satélite-GS [km]	1510	780	580	480	427
Pérdida del espacio libre [dB]	139.3	133.6	131.0	129.4	128.3
Nivel de señal isotrópica en la GS [dbm]	-109.1	-103.3	-100.7	-99.1	-98.1
Parámetros Estación Terrena (GS)					
Ganancia de antena GS [dBi]	6.0				
Pérdida de apuntamiento de ganancia directiva antena GS [dB]	-10.0	-3.00	-1.00	0.00	0.00
Pérdida línea de transmisión [dB]	1.60				
Temperatura efectiva de ruido [K]	9000				
Análisis Eb/No : Radio Input					
Figura de merito (G/T) [dB/K]	-43.5	-36.5	-34.5	-33.5	-33.5
Relación Señal a Densidad	46.0	58.7	63.3	66.0	67.0
Potencia de Ruido (S/No) [dB-Hz]	1200				
Velocidad de transmisión [bps]	1200				
Eb/No del sistema GS [dB]	15.2	27.9	33.0	35.1	36.2
BER especificado	1.0E-04				
Eb/No Umbral	22				
Margen de Enlace Eb/No [dB]	-6.7	5.9	11.0	13.1	14.2
Análisis SNR: Radio Input					
Nivel de señal en entrada Radio [dBm]	-114.6	-101.9	-97.3	-94.6	-93.6
Ancho de Banda receptor [Hz]	12500				
Potencia de ruido en receptor GS [dBm]	-119.60				
Relación SNR en receptor [dB]	5.0	17.7	22.3	25.0	26.0
Relación SNR requerida [dB]	10				
Margen de Enlace SNR [dB]	-5.0	7.7	12.3	15.0	16.0

Fig. 23: Cálculo de enlace de bajada - GS semidúplex VHF.

Fuente: Elaboración propia.

Elevación instantánea	10º	30º	45º	60º	80º
Parámetros Estación Terrena (GS)					
Potencia de Transmisión [dBm]	37				
Pérdida línea de transmisión [dB]	1.60				
Ganancia antena [dBi]	6.0				
Pérdida de apuntamiento de ganancia directiva antena GS [dB]	-10.0	-3.00	-1.00	0.00	0.00
P.I.R.E [dBm]	31.4	38.4	40.4	41.4	41.4
Tramo del enlace de subida					
Pérdida por polarización GS-SAT [dB]	0.00				
Pérdidas atmosféricas + Pérdidas Ionosféricas [dB]	4.88				
Distancia enlace Satélite-GS [km]	1510	780	580	480	427
Pérdida del espacio libre [dB]	139.3	133.6	131.0	129.4	128.3
Nivel de señal isotrópica en la GS [dbm]	-112.7	-100.0	-95.4	-92.8	-91.7
Parámetros Satélite ISS					
Pérdida por apuntamiento de antena Satélite [dB]	5.00				
Ganancia de antena SAT [dBi]	2.15				
Pérdida línea de transmisión [dB]	2.00				
Temperatura efectiva de ruido [K]	10000				
Análisis Eb/No : Radio Input					
Figura de merito (G/T) [dB/K]	-37.8				
Relación Señal a Densidad Potencia de Ruido (S/No) [dB-Hz]	43.1	55.8	60.4	63.0	64.1
Velocidad de transmisión [bps]	1200				
Eb/No del sistema GS [dB]	12.3	25.0	29.6	32.2	33.3
BER especificado	1.0E-04				
Eb/No Umbral	22				
Margen de Enlace Eb/No [dB]	-9.7	3.0	7.6	10.2	11.3
Análisis SNR: Radio Input					
Nivel de señal en entrada Radio [dBm]	-117.5	-104.8	-100.1	-97.6	-96.5
Ancho de Banda receptor [Hz]	12500				
Potencia de ruido en receptor GS [dBm]	-119.6				
Relación SNR en receptor [dB]	2.4	14.8	19.5	22.0	23.1
Relación SNR requerida [dB]	10				
Margen de Enlace SNR [dB]	-7.6	4.8	9.5	12.0	13.1

Fig. 24: Cálculo de enlace de subida - GS semidúplex VHF.

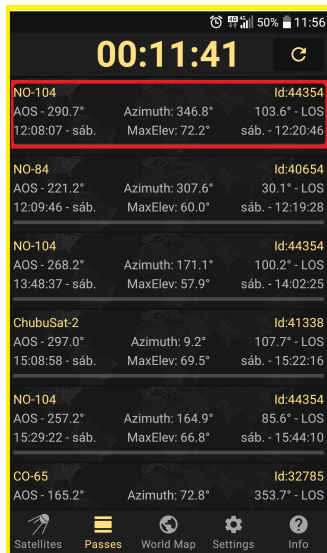
Fuente: Elaboración propia.

6. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

6.1. Planificación y procedimientos de operaciones en Hardware/Software para el seguimiento de satélites LEO

A continuación se detallan los más importantes:

- Elegir un lugar donde se tenga una vista clara del horizonte (sin obstáculos) en la distancia.
- Actualizar los TLE con los valores más actualizados desde el software de predicción orbital utilizado a través de internet.
- Realizar el cálculo de las efemérides mediante la visualización de las posiciones del satélite en un futuro próximo, así como visualización de otros datos relacionados a los instantes de adquisición señal (tiempo AOS, azimut AOS) y pérdida de señal (tiempo LOS, azimut LOS) y distancia más cercana (Azimut TCA, elevación TCA o máxima elevación).



00:11:41			
NO-104	Id:44354		
AOS - 290.7°	Azimuth: 346.8°	103.6° - LOS	
12:08:07 - sáb.	MaxElev: 72.2°	sáb. - 12:20:46	
NO-84	Id:40654		
AOS - 221.2°	Azimuth: 307.6°	30.1° - LOS	
12:09:46 - sáb.	MaxElev: 60.0°	sáb. - 12:19:28	
NO-104	Id:44354		
AOS - 268.2°	Azimuth: 171.1°	100.2° - LOS	
13:48:37 - sáb.	MaxElev: 57.9°	sáb. - 14:02:25	
ChubuSat-2	Id:41338		
AOS - 297.0°	Azimuth: 9.2°	107.7° - LOS	
15:08:58 - sáb.	MaxElev: 69.5°	sáb. - 15:22:16	
NO-104	Id:44354		
AOS - 257.2°	Azimuth: 164.9°	85.6° - LOS	
15:29:22 - sáb.	MaxElev: 66.8°	sáb. - 15:44:10	
CO-65	Id:32785		
AOS - 165.2°	Azimuth: 72.8°	353.7° - LOS	

Fig. 25: Cálculo de efemérides del satélite NO-104 con la app Look4sat. **Fuente:** [74].

- Revisar los parámetros de las unidades de radiofrecuencia como el ROE del sistema de antenas y las pérdidas de los tramos de coaxial y otros dispositivos pasivos y activos de RF. Ambas mediciones se logran con un Analizador de Antenas o Analizador Vectorial de redes (VNA).
- Programar la radio con las frecuencias satelitales correctas para las frecuencias de subida y bajada.
- Para el ajuste Doppler automático. En el prototipo 1 conectar el software control del SDR con el software de seguimiento. Con el prototipo 2 en caso de disponer de una radio con sistema CAT realizar el mismo ajuste vía el software de seguimiento.
- Tener la capacidad de grabar la señal de audio durante la pasada del satélite para su posterior registro y análisis.



Fig. 26: Analizador de antena RigExpert. **Fuente:** [75].

6.2. Implementación del primer prototipo: Segmento terrestre Downlink UHF basada en SDR con antena omnidireccional.

Para la implementación se lleva cabo la propuesta de la figura 8. El LNA se instala cerca de la antena para tener una relación señal-ruido más estable a la entrada del SDR. En este caso, a la salida del LNA será conectada a la entrada del SDR como se observa en la figura 27. Por último la antena va soportada por un mástil de madera y a una altura superior a 3λ del suelo para no alterar parámetros de la antena (ganancia directiva), como se observa en la figura 28.

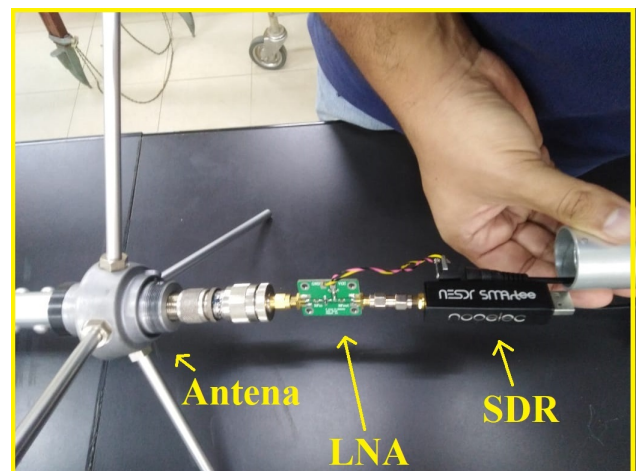


Fig. 27: Unidades de hardware implementadas en el segmento terrestre UHF. **Fuente:** Elaboración propia.

A modo de evitar pérdidas por difracción y obstáculos entre el segmento terrestre y los nanosatélites, la zona geográfica elegida para las pruebas de recepción del segmento terrestre fue el campus CITEC-FIUNA en Isla Bogado, Luque. Coordenadas:

- **Latitud:** 25°17'40,91" S;
- **Longitud:** 57°29'24,76" O;
- **Nivel medio respecto al mar (AMSL):** 140m.



Fig. 28: Set de prueba segmento terrestre UHF basado en SDR portátil. **Fuente:** Elaboración propia.

6.2.1. Resultados obtenidos de las mediciones con el Segmento espacial: Raavana-1 (BIRDS3)

Serán observados los resultados de las mediciones de recepción tipo Onda continua CW con el segmento terrestre UHF basado en SDR. El resultado esperado final con el segmento espacial Raavana-1, es la obtención de su telemetría o datos de mantenimiento (HK).

• Software de seguimiento: Orbitrón

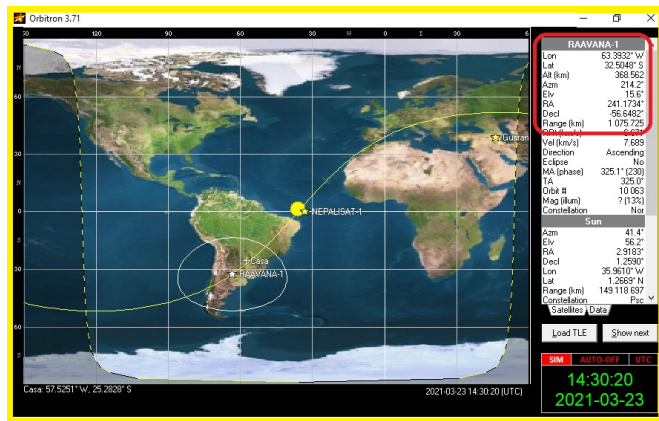


Fig. 29: Descripción de la trayectoria del Raavana-1. **Fuente:** [48].

La pasada tiene una característica de máxima elevación de 60°. Se observó que en los 10 minutos de observación se recibieron hasta 3 veces las señales CW resultando la señal de mejor SNR entre los ángulos 10° y 45°.

• Recepción de señal con el RTLSDR y software HSDR

En la figura 30 se observa la señal con mejor SNR: 25dB. Dada la funcionalidad de las consolas SDR para la grabación del espectro de señales RF, IF o audio, el ajuste Doppler no resulta tan crítico para la recepción con el SDR, por lo que

durante el procedimiento puede grabarse con un ancho de banda superior al determinado según la tabla 1 y procesarlo una vez terminada la pasada.

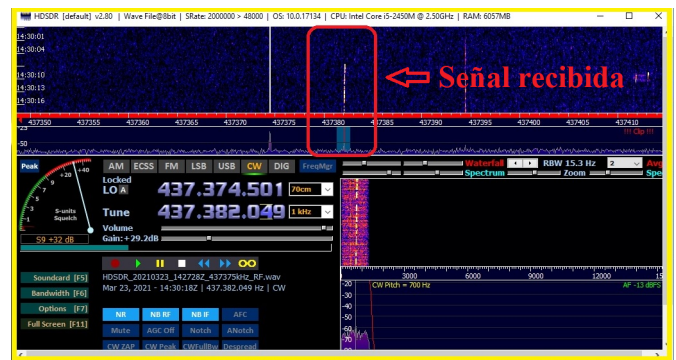


Fig. 30: Señal CW recibida del Raavana-1 con SNR: 25dB. **Fuente:** [45].

• Decodificación Código Morse (CW): CWSkimmer y CWDecoder

En la figura 31 se observa la señal CW decodificada con el software CW Skimmer [49], en forma visual mediante las equivalencias en letras y números de las figuras. Con respecto a lo mencionado del ajuste Doppler se mencionó que no es crítico para la recepción dada el ancho de banda del SDR, sin embargo en base a la experiencia para la decodificación CW, la variación Doppler también se traslada a las señales de audio. Los resultados con el software CW Decoder [50] realizado de manera automática se muestra en la figura 32



Fig. 31: Formato CW completo del Raavana-1: Callsign + Nombre del proyecto + Mensaje Corto + HK. **Fuente:** [49].

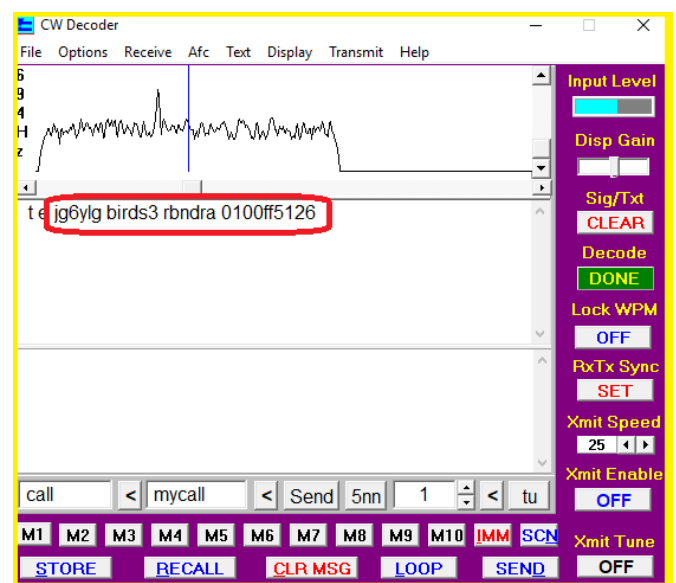


Fig. 32: Formato CW completo del Raavana-1: Callsign + Nombre del proyecto + Mensaje Corto + HK. **Fuente:** [50].

• Obtención de la telemetría del satélite

Una vez obtenido el formato CW completo de telemetría del satélite Raavana-1, se ejecuta el programa proveído por los desarrolladores del satélite para la obtención del estado de mantenimiento del satélite, como voltaje/corriente/temperatura de la batería, paneles solares en sombra/luz solar, etc; como se observa en la figura 33. En este caso los datos de mantenimiento obtenidos fueron: **0100ff5126**.

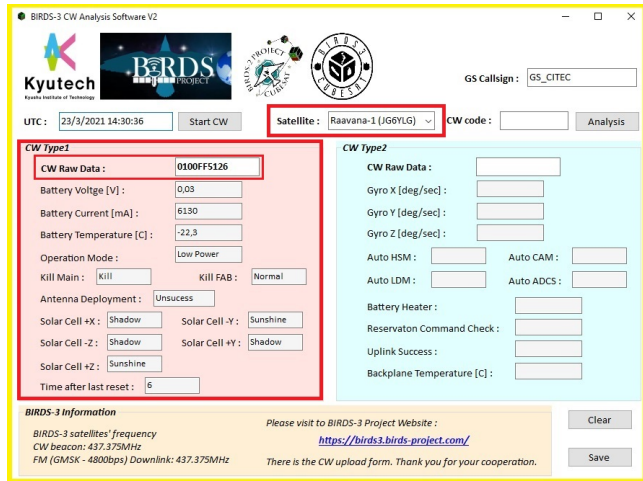


Fig. 33: Datos de telemetría obtenidos del Raavana-1. **Fuente:** [28].

6.2.2. Resultados obtenidos de las mediciones con el Segmento espacial: Maya-3

Para el caso del Maya-3 es el único que posee una potencia de transmisión de 800mW [30] siendo de mayor PIRE comparado a los 100mW de los BIRDS3. El resultado esperado final con el Maya-3, es la obtención de su telemetría o datos de mantenimiento (HK).

• Software de seguimiento: App Look4Sat

El software de seguimiento en estudio fue el Look4Sat [74]. Dicha unidad actualmente no posee un mecanismo para la conexión con el software consola del SDR. Por lo tanto solo nos ha servido para determinar el cronograma y característica de la pasada. La pasada tiene una característica de máxima elevación de 70°. Se observó que en los 10 minutos de observación se recibieron hasta 1 vez la señal CW resultando la señal de mejor SNR entre los ángulos 10° y 45°.



Fig. 34: Descripción de la trayectoria del Maya-3. **Fuente:** [74].

• Recepción de señal con el RTLSDR y software HDSDR

En la figura 35 se observa la señal con mejor SNR: 20dB.

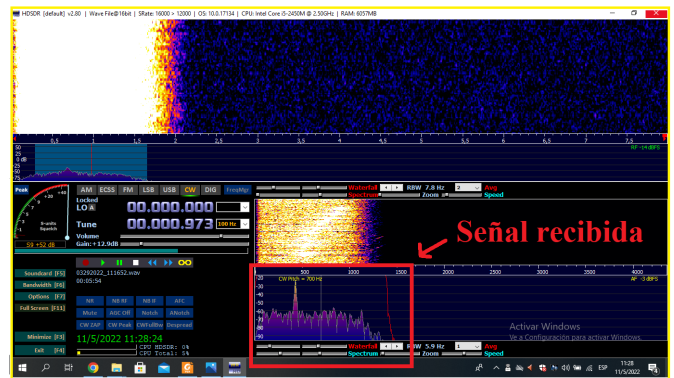


Fig. 35: Señal CW recibida del Maya-3 con SNR: 20dB. **Fuente:** [45].

• Decodificación Código Morse (CW): CW Skimmer

En la figura 36 se observa la señal CW decodificada con el software CW Skimmer [49].

Cabe mencionar que también se han logrado resultados positivos con SNR superiores a 25dB con las unidades CW decoder [50] y la app Morse Code Agent [76].



Fig. 36: Formato CW completo del Maya-3: Callsign satélite + Nombre del satélite + tipo de dato + telemetría. **Fuente:** [49].

• Obtención de la telemetría del satélite

Con el formato CW completo de telemetría, se ejecuta el programa proveído por los desarrolladores del satélite para la obtención del estado de mantenimiento del satélite, como se observa en la figura 37.

En este caso los datos de mantenimiento obtenidos fueron: **DA17700EB0E00C01DF880**.

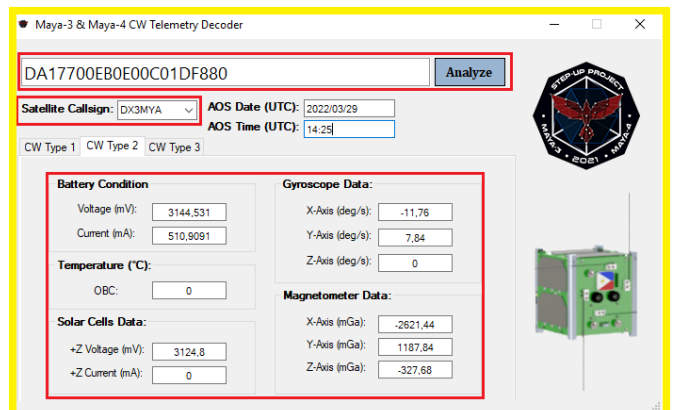


Fig. 37: Datos de telemetría obtenidos del Maya-3. **Fuente:** [30].

6.3. Implementación del segundo prototipo: Segmento terrestre semidúplex VHF de APRS con antena omnidireccional

Para la implementación se lleva cabo el prototipo de la figura 14. La radio es conectada a la antena a través del coaxial RG-8 de bajas pérdidas para tener una relación señal-ruido más estable a la entrada del transceptor. A la salida de los puertos de audio AUX IN/AUX OUT de la radio se conecta con la placa interfaz de audio EASY-DIGI a través de cables Jack de audio y para la activación del PTT se utiliza un cable tipo serial-USB. Por último se realiza las configuraciones de software como el Direwolf (TNC) y el software UISS (software de comunicaciones APRS). La estación VHF bajo prueba instalada se representa en las figuras 38 y 39.



Fig. 38: Unidades de hardware implementadas en el segmento terrestre VHF APRS. **Fuente:** Elaboración propia.

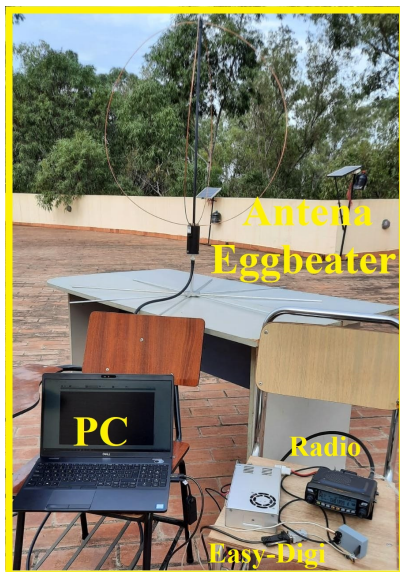


Fig. 39: Set de segmento terrestre VHF APRS bajo prueba. **Fuente:** Elaboración propia.

Las pruebas para la obtención de resultados consistieron en realizar las pruebas de APRS-Digipeater para la comunicación entre dos estaciones de radiopaquetes utilizando tanto como segmento espacial al NO-104 y la ISS. Una de las estaciones sería la que se encuentre bajo prueba y la segunda con equipos que garanticen una transmisión/recepción fiable en Modo APRS para la evaluación de desempeño a la estación bajo prueba.

Con respecto a la licencia de radioaficionado otorgada por el ente regulador del país, siendo CONATEL [24] para el caso de

Paraguay. El costo de la licencia a ser otorgada por CONATEL, la misma tiene un canon en concepto de autorización (a renovar cada 5 años) y un canon en concepto de arancel anual. Esta tasa se encuentra sujeta a disposición de la CONATEL [24] con ajustes de manera anual.

A modo de evitar pérdidas por difracción y obstáculos entre el segmento terrestre bajo prueba y los nanosatélites, la zona geográfica elegida para las pruebas de transmisión y recepción en Modo APRS fue el campus de la UNA (Estación AEP-UNA), San Lorenzo; con coordenadas Latitud: 25°20'7,32" S, Longitud: 57°30'48" O y AMSL: 116m. Y la segunda estación el campus CITEC-FIUNA en Isla Bogado, Luque.



Fig. 40: Posición geográfica desde el software Google Earth de ambas estaciones para las pruebas APRS-Digipeater a través de la ISS. **Fuente:** [77].

Se observa en la figura 40 las disposiciones geográficas de ambas estaciones VHF, estando las mismas separadas aproximadamente 5km. Se comprueba que no exista comunicación por el medio terrestre en ambos sentidos UNA-CITEC y CITEC-UNA, por lo cual es fiable la utilización de satélites LEO para pruebas del segmento terrestre VHF de bajo costo.

• Segmento terrestre: CITEC-FIUNA

A continuación se lista las unidades Hardware y Software más importantes del segmento terrestre - Estación CITEC-FIUNA para las operaciones conjuntas con el segmento terrestre bajo prueba, como se observa en la figura 41.

- **Sistema de Antenas:** Antena Yagi Arrow VHF 146/437-10WBP [78];
- **Unidad de Seguimiento de satélites:** Apuntamiento manual por el operador;
- **Unidad de Radio:** Radio KENWOOD TH-D74 (TNC Interno) [79];
- **Cables RF coaxial:** RG-8 (incluido con antena);
- **Software para seguimiento de Satélites:** Look4Sat App [74];
- **Software de comunicaciones:** La radio TH-D74 incorpora su propio software de visualización de datos en el display del mismo.



Fig. 41: Unidades de Hardware para la Estación portátil CITEC-FIUNA. **Fuente:** Elaboración propia.

Para la realización de las pruebas de comunicación son necesarios definir los identificadores de origen y destino de cada estación, así como también el parámetro APRS PATH. Este parámetro APRS-PATH indica la ruta o la distancia que se propagará un paquete APRS antes de que caduque de la red [35]. El identificador de licencia que fue otorgada por la CONATEL a la Agencia Espacial del Paraguay fue la de **ZP6XSM** (Estación AEP-UNA) y **ZP1XSN** (Estación CITEC-FIUNA). Para el parámetro APRS-PATH el satélite NO-104 responde al **PSAT2,ARISS** [60].

6.3.1. Resultados obtenidos de las mediciones con el Segmento espacial: PSAT2 NO-104

Los resultados esperados al utilizar el NO-104 son la posibilidad de enviar y recibir radiopaquetes desde la estación (AEP-UNA) a la estación (CITEC-FIUNA) que se encuentre fuera del rango de alcance por vías terrestres de la primera. Tiene la característica de emitir las señales 8W con modulación AFSK [60].

• Software de seguimiento: Look4Sat App

La pasada tuvo una característica de máxima elevación de 72°, dirección Oeste-Este. Se observó que en los 10 minutos de observación se recibieron hasta 4 veces las señales APRS en la estación CITEC-FIUNA provenientes de la estación bajo prueba (AEP-UNA). Por lo tanto, resultando en un transmisión satisfactoria al satélite entre los ángulos 30° y 90°.

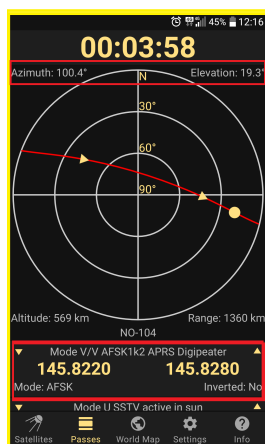


Fig. 42: Software de seguimiento Look4Sat App para el seguimiento con vista de radar durante la pasada del NO-104. **Fuente:** [74].

• Transmisión de señales AFSK/APRS desde la estación bajo prueba

Las configuraciones pertinentes desde el software UISS como se observa en la figura 43 son (1) Indicativo Origen (ZP6XSM), (2) APRS PATH (ARISS,PSAT2), (3) Indicativo destino (ZP1XSN) y (4) el mensaje (73 from AEP GS).

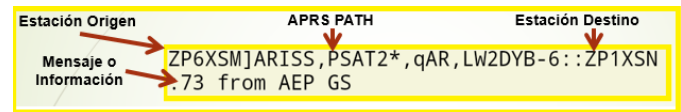


Fig. 43: Mensaje APRS transmitida desde la estación bajo prueba ZP6XSM (AEP-UNA) hacia el NO-104 con el software UISS. **Fuente:** [72].

• Recepción de señales AFSK/APRS con la estación CITEC-FIUNA

Para la comprobación de la transmisión exitosa e integridad del mensaje, la señal fue decodificada mediante la KENWOOD TH-D74 [79] con TNC Interno y función APRS incorporada. Los resultados se observa en la figura 44.

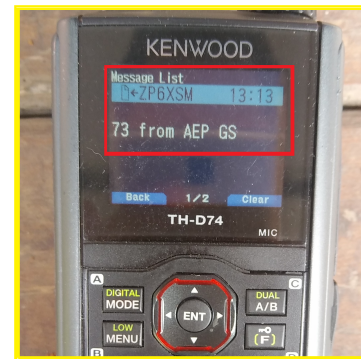


Fig. 44: Mensaje APRS recibido en la estación ZP1XSN a través del NO-104 desde la estación bajo prueba ZP6XSM. **Fuente:** Elaboración propia.

6.3.2. Resultados obtenidos de las mediciones con el Segmento espacial: Estación Espacial Internacional (ISS)

• Recepción de señales APRS en la estación bajo prueba desde la ISS

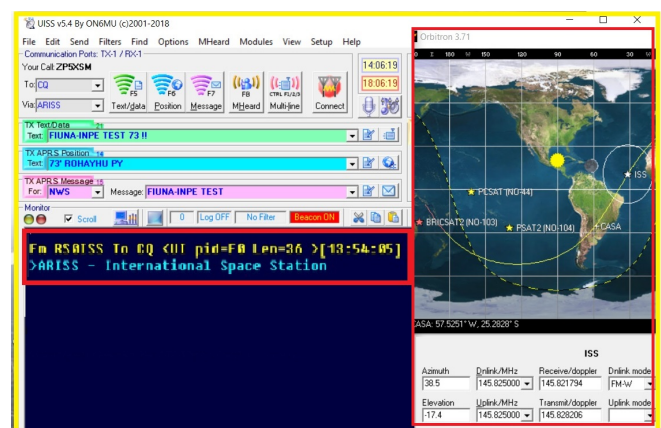


Fig. 45: Mensaje APRS recibida en ZP6XSM desde la ISS. **Fuente:** [72].

7. ANÁLISIS FINANCIERO

Los dos prototipos de segmento terrestres que cumplen con las necesidades del sistema propuesto son presentados en las tablas 3 y 4.

TABLA 3: Costo de implementación del segmento terrestre Downlink UHF basada en SDR.

Segmento Terrestre UHF basado en SDR	
Ítems y Dispositivos	Precio (Guaraníes)
Unidad de Antena	
QFH/Vertical 70cm	Gs. 350.000
Unidad de Amplificación Front-End	
Hiletgo LNA 0.1 a 2000MHz Ganancia: 30dB / NF: 2dB	Gs. 110.000
Unidad de Radio Definida por Software	
Noolec NE-SDR Smartee V4 Chip Basado en RTL2832U	Gs. 250.000
Unidad de control y visualización de datos	
Opción 1.1: Notebook (Windows OS), Intel Core i3 3.0 GHz / 4GB DDR4	Gs. 3.500.000
Opción 1.2: Kit Raspberry Pi 3B+	Gs. 900.000
Unidades Extras	
Conectores y Cables Coaxiales	Gs. 450.000
Otros elementos prescindibles	Gs. 200.000
Costo de Implementación Total Opción 1.1 con Windows OS:	Gs. 4.920.000
Costo de Implementación Opción 1.2 con Raspberry PI OS:	Gs. 2.320.000

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 4: Costo de implementación para Segmento Terrestre VHF APRS.

Segmento Terrestre VHF Semiduplex APRS	
Ítems y Dispositivos	Precio (Guaraníes)
Unidad de Antena	
Eggbeater VHF M2Inc	Gs. 2.500.000
Unidad de Transceiver/Radio	
Baofeng UV-5R	Gs. 350.000
Unidad de TNC	
EASY-DIGI Interface	Gs. 100.000
Unidad de control y visualización de datos	
Opción 2.1: Notebook (Windows OS) Intel Core i3 3.0 GHz / 4GB DDR4	Gs. 3.500.000
Opción 2.2: Kit Raspberry Pi 3B+	Gs. 900.000
Unidades Extras	
Conectores y Cables Coaxiales	Gs. 450.000
Otros elementos prescindibles (Cables de Audio y multipares)	Gs. 200.000
Autorización y arancel para licencia radioaficionado CONATEL (Año: 2022)	Gs. 170.000
Costo de Implementación Total Opción 2.1 con Windows OS:	Gs. 7.270.000
Costo de Implementación Opción 2.2 con Raspberry Pi OS:	Gs. 4.670.000

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 3 describe la estimación de costos de los componentes de hardware/software utilizados en el desarrollo del segmento terrestre UHF basado en SDR sin necesidad de autorización de licencia.

La tabla 4 describe la estimación de costos de los componentes de hardware/software utilizados en el desarrollo del segmento terrestre con autorización de licencia.

7.1. Resultados obtenidos del segmento terrestre de la Agencia Espacial del Paraguay para el GuaraniSat-1.

Atendiendo a que uno de los objetivos del trabajo es la colaboración con personal técnico de la Agencia Espacial del Paraguay para la implementación de una estación terrena a ser utilizada con el GuaraniSat-1. Se dará a conocer algunos los resultados obtenidos. El proyecto Paraguay al Espacio con el diseño del segmento terrestre representó una formación de capacidades en diversas áreas para los diferentes profesionales ingenieros de la AEP, FP-UNA y FIUNA.

El diseño de la estación terrestre para el GuaraniSat-1 permitió al autor de este trabajo poner en práctica conceptos teóricos y prácticos desarrollados durante la carrera, relacionados a circuitos, modulación, antenas, propagación, procesamiento digital de señales, comunicaciones con satélites, protocolos de comunicación, conceptos físicos y gestión de proyectos.



Fig. 46: Fase de montaje de los sistemas del GS-UNA. Fuente: AEP [13].



Fig. 47: Predio de instalación de la Estación Terrestre (GS) AEP-UNA con el sistema completamente instalado y configurado. Fuente: AEP [13].

8. CONCLUSIÓN

Se ha desarrollado un sistema de telecomunicación de bajo costo capaz de transmitir y recibir señales para el

enlace con satélites en órbita terrestre baja, identificando las características y efectos del medio de propagación en las señales radioeléctricas para el seguimiento de satélites LEO mediante las Recomendaciones de la UIT-R P.618-13. Las principales contribuciones y conclusiones se resumen a continuación:

1. El presente trabajo final de grado consistió en el diseño y la implementación dos modelos de segmento terrestre. El primero está basado en SDR en la banda UHF para recibir señales de telemetría en modulación CW de manera exitosa con los nanosatélites Raavana-1 y Maya-3. Este prototipo también puede recibir señales con modulaciones FM, DSB, LSB, USB de distintos CubeSats a los sometidos bajo prueba en este TFG.
2. El segundo prototipo permite la transmisión y recepción de señales APRS en la banda VHF. Se logró demostrar su eficacia para la implementación en segmentos terrestres sin rotadores en misiones de nanosatélites tipo Store&Forward y comunicaciones de emergencia con la Estación Espacial Internacional y el nanosatélite NO-104.
3. Las señales de telemetría y paquetes de radio decodificados validaron los presupuestos de enlace calculados, demostrando el rendimiento de los modelos propuestos en condiciones de funcionamiento reales típicas en los satélites bajo prueba. Se utilizaron dispositivos de Radio Definida por Software, antenas con diseños simples y otros dispositivos COTS para mantener los costos bajos.
4. Ambos prototipos demuestran que mediante la recepción de señales de telemetría y transmisión de radiopaquetes, los mismos serían propicios en la implementación de programas didácticos para demostrar el funcionamiento de los diversos subsistemas de los nanosatélites. Esto permitiría enseñar y motivar a los estudiantes de la secundaria a estudiar carreras de ingeniería, telecomunicaciones, y otras áreas afines.
5. Parte del TFG también ha permitido colaborar en la implementación de la estación terrena de la AEP. La misma cuenta con un sistema de altas prestaciones para garantizar el cumplimiento de los objetivos del programa Paraguay al Espacio, nuestro primer satélite, el GuaraniSat-1 y los que vienen a continuación.

9. TRABAJOS FUTUROS

De los elementos estudiados durante el desarrollo de este TFG, se desprenden los posibles trabajos futuros:

1. Evaluar el desempeño de antenas con patrones omnidireccionales en segmentos terrestres y su eficacia para la comunicación con satélites LEO.
2. Diseñar e implementar un sistema de seguimiento automático de antenas direccionales de bajo costo para satélites LEO.
3. Realizar un estudio y análisis para la implementación de sistemas de antenas en array y en arreglo de fase para el seguimiento de satélites LEO.

4. Diseñar e implementar prototipos de segmentos terrestres para satélites LEO a bajo costo para las bandas de frecuencia L (1.2 GHz), S (2.4 GHz) y C (5.8 GHz).
5. Realizar un estudio y análisis sobre dispositivos SDR autómatas con implementación de Inteligencia artificial (IA) para el reconocimiento de señales.
6. Diseñar e implementar prototipos para subsistemas de comunicaciones de satélites LEO en las bandas de frecuencia del servicio de radioaficionado por satélite.

10. REFERENCIAS

- [1] S. ©. Alta velocidad, baja latencia. [En línea]. Disponible: <https://www.starlink.com/> [Fecha de consulta: feb 2022]
- [2] OneWeb. Experience the oneweb difference. [En línea]. Disponible: <https://oneweb.net/our-network/experience-oneweb> [Fecha de consulta: apr 2022]
- [3] Amazon. Project kuiper. [En línea]. Disponible: <https://www.amazon.jobs/en/teams/projectkuiper> [Fecha de consulta: apr 2022]
- [4] ESA'S ANNUAL SPACE ENVIRONMENT REPORT, ESA Space Debris Office Std., Rev. 6.0, apr 2022. [En línea]. Disponible: https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space.Environment.Report.latest.pdf
- [5] A. Space. Productos de segmento terreno para pequeños satélites. [En línea]. Disponible: <https://alen.space/es/segmento-terreno-para-pequenos-satelites/> [Fecha de consulta: apr 2022]
- [6] "Proyecto Darti, La enfermedad de chagas y la priorización de la investigación para controlar el vector de la enfermedad," 2016.
- [7] ISISPACE. Ground stations. [En línea]. Disponible: <https://www.isispace.nl/product-category/ground-stations/> [Fecha de consulta: apr 2022]
- [8] C. Velasco y C. Tipantúña, "Meteorological picture reception system using software defined radio (sdr)," 10 2017, pp. 1–6.
- [9] A. Quiroz Olivares, N. I. Vargas-Cuentas, G. Zarate Segura, y A. Roman-Gonzalez, "Low-cost and portable ground station for the reception of noaa satellite images," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 10, 01 2019.
- [10] *Servicio Web para satélites meteorológicos NOAA basado en receptor SDR*, 2017.
- [11] Funcube. The funcube project. [En línea]. Disponible: <http://funcube.org.uk/> [Fecha de consulta: jun 2021]
- [12] SatNOGS. Rotator v3. [En línea]. Disponible: https://wiki.satnogs.org/SatNOGS_Rotator_v3 [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [13] Web Agencia Espacial del Paraguay. El Primer Satélite Paraguayo. [En línea]. Disponible: <https://www.aep.gov.py/index.php/proyectos/guaranisat-1> (2022)
- [14] U. I. D. TELECOMUNICACIONES, "Uit-t rec. j.142 (05/2000)," in *Métodos para la medición de parámetros en la transmisión de señales de televisión digital por cable*, ser. SERIE J: TRANSMISIÓN DE SEÑALES RADIOFÓNICAS, DE TELEVISIÓN Y DE OTRAS SEÑALES MULTIMEDIOS, vol. RECOMENDACIONES UIT-T DE LA SERIE J, 2000.
- [15] A. Ghasemi, A. Abedi, y F. Ghasemi, *Propagation Engineering in Radio Links Design*, 07 2013.
- [16] R. N. Vela, *Comunicaciones por satélite*. Thomson, 2003.
- [17] U.-R. S. de Radiocomunicaciones de la UIT., *Recomendación UIT-R P.618-13*, serie p - propagación de las ondas radioeléctricas. ed., Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)., dec 2017, datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio.
- [18] NASA. What is the international space station? [En línea]. Disponible: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-the-iss-58.html> [Fecha de consulta: nov 2020]
- [19] V. Dascal y P. Dolea, *Low-cost SDR-based ground receiving station for LEO satellite operations*, Std., 10 2013.
- [20] L. del Molino EA3OG, *Polarización giratoria o circular, SINTONÍA FINA Conceptos claros con EA3OG*, Sección Española de la IARU Std., jan 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.ure.es/descargas/?categoria=revista-ure-anos-completos&su=1&orderby=nombre&order=desc>
- [21] P. Szabó, K. Gombíková, M. Ferencová, y M. Kosuda, "Keplerian orbit and satellite skcube," 09 2019, pp. 174–179.
- [22] U.-R. S. de Radiocomunicaciones de la UIT., *Recomendación UIT-R P.372-15*, serie p - propagación de las ondas radioeléctricas. ed., Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)., sep 2021, ruido radioeléctrico.

- [23] R. Martínez y S. Coca, "Diseño preliminar de una estación terrena basada en software radio para aplicaciones docentes," 01 2008.
- [24] C. N. D. TELECOMUNICACIONES. Conatel. [En línea]. Disponible: <https://www.conatel.gov.py/conatel/> [Fecha de consulta: may 2022]
- [25] V. P. Dascal, P. Dolea, T. Palade, y O. Cristea, *ASPECTS OF A LOW-COST GROUND STATION DEVELOPMENT FOR GENSO NETWORK*, Std., 1996.
- [26] R. A. de Carvalho; Jaime Estela; Martin Langer, *Nanosatellites: Space and Ground Technologies, Operations and Economics*. John Wiley & Sons, 2020.
- [27] P. K. R. Bernard Sklar, *Digital Communications. Fundamentals and Applications*, 2nd ed. Pearson, 2014.
- [28] B. . Project. Link budget. [En línea]. Disponible: <https://birds3.birds-project.com/outreach/document/amateur/> [Fecha de consulta: apr 2022]
- [29] B. P. WEBSITE. Link budget. [En línea]. Disponible: <https://birds4.birds-project.com/document/power-budget> [Fecha de consulta: apr 2022]
- [30] STAMINA4SPACE. Maya-3 & maya-4. [En línea]. Disponible: <https://stamina4space.upd.edu.ph/satellites-page/maya-3and4/> [Fecha de consulta: apr 2022]
- [31] K. Project. Link budget. [En línea]. Disponible: <https://kitsat.net/kitsune/amateur-radio/> [Fecha de consulta: apr 2022]
- [32] amsat.org. Tools for spacecraft and communication design. [En línea]. Disponible: <http://www.amsatuk.me.uk/iaru/spreadsheet.htm> [Fecha de consulta: apr 2022]
- [33] W.-V. Jan A. King. Amsat iaru link model rev2.5.5.xls. [En línea]. Disponible: <http://www.amsatuk.me.uk/iaru/spreadsheet.htm> [Fecha de consulta: mar 2022] AMSAT-UK.
- [34] B. Bruninga. Antennas for aprs satellite igates. [En línea]. Disponible: <http://www.aprs.org/aprs-satellite-igate-antennas.html> [Fecha de consulta: apr 2022]
- [35] W. Bob Bruninga. Automatic packet reporting system. [En línea]. Disponible: <http://www.aprs.org/> [Fecha de consulta: apr 2022]
- [36] Jenkins, C.-O. Calvo-Alvarado, C.-G. Jiménez, y Valverde, "Project irazu: Advances of a store & forward cubesat mission for environmental monitoring of costa rica," 09 2017.
- [37] B. P. WEBSITE. Communication plan. [En línea]. Disponible: <https://birds4.birds-project.com/document/communication-plan> [Fecha de consulta: feb 2022]
- [38] M. ANTENNA. "144bd852, 435bd852," Laboratorio de Transmisión y Accesos Inalámbricos - FIUNA, Hoja de datos, 2022.
- [39] C.-E. Lesanu, A. Done, A.-M. Căilean, y A. Graur, "Vertical polarized antennas for low-vhf radio meteor detection," in *2018 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, 2018, pp. 93–98.
- [40] H. PACKARD. Ina-02184 ina-02186. [En línea]. Disponible: <https://www.qsl.net/n9zia/metricom/ina02184.pdf> [Fecha de consulta: may 2022]
- [41] nooelec. Nooelec nesdr smart v4 sdr. [En línea]. Disponible: <https://www.noelec.com/store/sdr/sdr-receivers/nesdr-smart-sdr.html> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [42] DatasheetMeta.com. Realtek rtl2832u - the mystery chip at the heart of rtl-sdr. [En línea]. Disponible: <http://www.datasheetcafe.com/wp-content/uploads/2015/09/RTL2832U.pdf> [Fecha de consulta: may 2022]
- [43] R. Yagoub, M. Benaissa, y B. Benadda, "Nearby carrier detection based on low cost rtl-sdr front end," *Wireless Personal Communications*, vol. 108, 10 2019.
- [44] C. de Youtube: Unión de Radioaficionados Españoles. Aproximación a la radio definida por software (sdr). [En línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=z1ZPnD6vKhA&t=843s> [Fecha de consulta: aug 2021] Canal de Youtube: Unión de Radioaficionados Españoles.
- [45] I. Alberto di Bene. High definition software defined radio (hdsdr). [En línea]. Disponible: <http://www.hdsdr.de/index.html> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [46] Osmocom. rtl-sdr. [En línea]. Disponible: <https://osmocom.org/projects/rtl-sdr/wiki/Rtl-sdr> [Fecha de consulta: may 2022]
- [47] DK1TB. Satpc32. [En línea]. Disponible: <http://www.dk1tb.de/indexeng.htm> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [48] S. Stoff. Orbitron. [En línea]. Disponible: <http://www.stoff.pl/> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [49] I. Afreet Software. Cw skimmer 2.1 - multi-channel cw decoder and analyzer. [En línea]. Disponible: <http://www.dxatlas.com/cwskimmer/> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [50] WD6CNF. Cw decoder program. [En línea]. Disponible: <https://on7kec.be/?p=3128> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [51] V.-A. Software. Vb-cable virtual audio device. [En línea]. Disponible: <https://vb-audio.com/Cable/> [Fecha de consulta: may 2022]
- [52] K. I. of Technology. Amateur radio operators. [En línea]. Disponible: <https://birds3.birds-project.com/outreach/document/> [Fecha de consulta: Nov 2020]
- [53] RTL-SDR.COM. Quick start guide. [En línea]. Disponible: <https://www.rtl-sdr.com/rtl-sdr-quick-start-guide/> [Fecha de consulta: may 2022]
- [54] G. Simon Brown. System requirements. [En línea]. Disponible: <https://www.sdr-radio.com/computer> [Fecha de consulta: may 2022]
- [55] S. S. D. R. Receiver. What pc specs do i need to run sdruno and my rsp? [En línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=TfKdJH11OAQ> [Fecha de consulta: may 2022]
- [56] R. Pi. Products for home. [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.com/products/> [Fecha de consulta: may 2022]
- [57] N. Oceanic y A. Administration. User's guide for building and operating environmental satellite receiving stations. [En línea]. Disponible: https://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/pubs/Users_Guide-Building_Receive_Stations_March_2009.pdf [Fecha de consulta: Nov 2020]
- [58] A.-U. . R. A. S. Corporation. Overview of the prism ham radio service - image credit university of tokyo. [En línea]. Disponible: <https://amsat-uk.org/overview-of-the-prism-ham-radio-service-image-credit-university-of-tokyo/> [Fecha de consulta: oct 2021]
- [59] A. R. on the International Space Station ARISS. Current status of iss stations. [En línea]. Disponible: <https://www.ariss.org/current-status-of-iss-stations.html> [Fecha de consulta: feb 2022]
- [60] W. Bob Bruninga. Aprs satellite traffic and reporting system. [En línea]. Disponible: <http://www.aprs.org/astars.html> [Fecha de consulta: may 2022]
- [61] . T. J. Beech. W. Nielsen D. E., *AX.25 Link Access Protocol Amateur Packet Radio*, American Radio Relay League (ARRL) Std., Rev. 2.2, 1998. [En línea]. Disponible: <https://www.tapr.org/pdf/AX25.2.2.pdf>
- [62] M. J. S. Arce, "Diseño de un entorno de pruebas para un sistema comunicaciones embarcado en satélite," 2016.
- [63] I. M2 Antenna Systems. Eb-144/rk-2m, 135-150 mhz. [En línea]. Disponible: <https://www.m2inc.com/FGEB144RK2M> [Fecha de consulta: may 2022]
- [64] T. M. Systems. Lmr@-400. [En línea]. Disponible: https://www.timesmicrowave.com/Products/Cables/LMR_%C2%AE_High_Performance_Standard_LMR%C2%AE/LMR%C2%AE-400/ [Fecha de consulta: may 2022]
- [65] NanoRFE. About nanovna v2. [En línea]. Disponible: <https://nanorfe.com/nanovna-v2.html> [Fecha de consulta: may 2022]
- [66] Rowetel. Fsk over fm. [En línea]. Disponible: <http://www.rowetel.com/?p=3799> [Fecha de consulta: may 2022]
- [67] B. TECH. Baofeng uv-5r. [En línea]. Disponible: <https://baofengtech.com/product/uv-5r/> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [68] D. B. A. D. Kingston KD7DK. Aprs - direwolf - xastir. [En línea]. Disponible: <https://www.seapac.org/workshop-presentations.files/SEA-PAC2017-RPi-workshop,session-2,APRS-direwolf-xastir.pdf> [Fecha de consulta: apr 2022]
- [69] KF5INZ. Easy digi uv-5r interface for laptops and desktops. [En línea]. Disponible: <https://www.ebay.com/itm/323006664493> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [70] wb2osz. Decoded information from radio emissions for windows or linux fans - direwolf. [En línea]. Disponible: <https://github.com/wb2osz/direwolf> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [71] U. SoundModem. The software packet-radio tnc. [En línea]. Disponible: <http://uz7.ho.ua/packetradio.htm> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [72] ON6MU. Uiss. [En línea]. Disponible: <https://www.qsl.net/on6mu/uiss.htm> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [73] A. Csete. gpredict. [En línea]. Disponible: <http://gpredict.oz9aec.net/> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [74] A. Bishop. Look4sat: Satellite tracker. [En línea]. Disponible: <https://github.com/rt-bishop/Look4Sat> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [75] RigExpert. Antenna analyzers. [En línea]. Disponible: <https://rigexpert.com/products/antenna-analyzers/> [Fecha de consulta: may 2022]
- [76] T. Chieh-Ping. Morse code agent pro. [En línea]. Disponible: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.erdat.sai.morsecodeagentpro&hl=es.PY&gl=US> [Fecha de consulta: Abril 2022]
- [77] G. Inc. Google earth. [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/intl/es/earth/> [Fecha de consulta: may 2022]
- [78] L. Arrow Antenna. 146/437-10wbp. [En línea]. Disponible: <https://www.arrowantennas.com/arrowii/146-437.html> [Fecha de consulta: may 2022]
- [79] K. USA. Th-d74a. [En línea]. Disponible: <https://www.kenwood.com/usa/com/amateur/th-d74a/> [Fecha de consulta: Abril 2022]