



Tipo de artículo: Artículos originales
Temática: Tecnologías de la información y las comunicaciones
Recibido: 10/08/2023 | Aceptado: 05/11/2023 | Publicado: 30/03/2024

Identificadores persistentes:
DOI: 10.48168/innosoft.s15.a116
ARK: ark:/42411/s15/a116
PURL: 42411/s15/a116

Diseño, Construcción y Pruebas de una Estación Terrena de Bajo Costo para CubeSat con Tecnología IoT-LoRa

Design, Construction and Testing of a Low Cost Ground Station for CubeSat with IoT-LoRa Technology

Gary Fernando Flores Cadena ¹ [0000-0003-3815-7866], Pablo Anibal Lupera Morillo ² [0000-0002-0416-4980], Darwin Antonio Mena ³ [0000-0003-1186-4448], David Benalcazar Rojas ⁴ [0000-0001-5174-9482], Henry Paul Llumiquinga Loya⁵, Santiago Sandobalin Guaman⁶, Ericson Daniel Lopez Izurieta⁷

¹ Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. gary.flores@epn.edu.ec

² Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. pablo.lupera@epn.edu.ec

³ Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. darwin.mena@epn.edu.ec

⁴ Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. david.benalcazar@epn.edu.ec

⁵ Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. henry.llumiquinga@epn.edu.ec

⁶ Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. santiago.sandobaling@epn.edu.ec

⁷ Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. ericsson.lopez@epn.edu.ec

* Autor para correspondencia: gary.flores@epn.edu.ec

Resumen

En esta investigación se presenta el diseño y construcción de una estación terrena de bajo costo, compuestas por una antena Yagi, Amplificador de bajo ruido (LNA) y un nodo receptor LoRa que permite recepción de señales de CubeSats basadas en tecnología LoRa, para lo cual se emplearon conceptos de diseño general de antenas y amplificadores electrónicos y se comprobó el diseño mediante pruebas de laboratorio de características eléctricas, radiación de señal y respuesta en frecuencia con lo que se pudo recibir datos de telemetría de los satélites CubeSat LoRa

Palabras clave: bajo costo, estación terrena LoRa, CubeSat, recepción LoRa, satelital.

Abstract

This research article presents the design and construction of a low-cost ground station, consisting of a Yagi antenna, Low Noise Amplifier (LNA), and a LoRa receiver node, enabling the reception of CubeSat signals utilizing LoRa technology. The design incorporates general antenna and electronic amplifier design concepts and was validated through laboratory tests assessing electrical characteristics, signal radiation, and frequency response. This setup successfully received telemetry data from LoRa-based CubeSat satellites.

Keywords: *CubeSat, low cost, LoRa ground station, LoRa reception, satellite*

Introducción

Los últimos avances en materia espacial y satelital emplean nuevas plataformas de comunicación [1], permitiendo que satélites investigativos y de desarrollo, como son los CUBESAT y los PICOSAT, usen dichas plataformas de largo alcance y empleadas en internet de las cosas (IOT). Una de estas plataformas es Lo-Ra cuyo nombre significa cobertura de largo alcance (LONg RANge) y que es un estándar de red inalámbrica basado en la modulación de espectro ensanchado de CHIRP (Compressed High Intensity Radar Pulse) en una señal cuya frecuencia aumenta o disminuye con el tiempo [2].

En la actualidad varios desarrollos espaciales hacen uso de estas tecnologías, uno de los más recientes es el ideado por Julián Fernández, un adolescente que propuso la idea de enviar un PicoSat de 250 gramos que emplea la tecnología LoRa y de código abierto, para lograr comunicaciones con satélites pequeños de experimentación. Para ello creó la empresa FOSSAAT [3] y con el apoyo de start ups y crowdfunding, permitió poner en el espacio a FossaSat-1, el 12 de junio de 2019, el primer satélite LoRa basado en el estándar PocketQube para CubeSat que tienen un tamaño de 5x5x5cm. Ésta primera experiencia permitió que miles de datos de telemetría sean recibidos por estaciones terrenas en muchas partes del planeta [4]. Se ha constatado en investigaciones previas sobre comunicaciones satelitales [5] que la utilización de componentes económicos, previamente validados en entornos de laboratorio y posteriormente implementados en la recepción de señales satelitales, ha arrojado resultados sumamente efectivos. Basándonos en estas premisas,

se ha concebido un sistema que reúna tanto las especificaciones requeridas para la recepción de datos LoRa como la ventaja de emplear componentes de bajo costo.

En la actualidad existen varios satélites LoRa que se encuentran rotando a la tierra en una órbita baja LEO (acrónimo del inglés Low Earth Orbit) donde sus distancias oscilan cerca de los 400 km. [6] y sus tiempos de rotación por los polos es cercana a los 92 minutos, por lo que diariamente se pueden obtener varios pases sobre la estación terrena instalada en tierra, sin embargo, no todos los pases tienen las mejores características para poder recibir los datos, por lo que se limita a uno o dos pases diarios del satélite que permiten recibir correctamente los datos. Para poder captar a esos satélites, una de las cosas a tomar en cuenta es saber los pases del satélite con sus horarios exactos para apuntar las antenas directivas y con ello captar los datos que se transmiten desde más de 400 km de distancia. Adicionalmente la señal a recibir suele ser muy débil debido a las atenuaciones atmosféricas, las pérdidas por distancia, zona de Fresnel y apuntamiento. Para lograr que estos paquetes LoRa sean recibidos con éxito en tierra se requiere de una estación terrena [7] [8]receptora, que cuente con un sintonizador que procese las señales con protocolo LoRa y además de un amplificador de bajo ruido (LNA) conectado a una antena de alta ganancia, que esté diseñada para trabajar a la frecuencia de transmisión del satélite receptado.

En el presente estudio se propone el diseño, construcción y pruebas de una estación terrena para CubeSat que apliquen tecnología IoT- LoRa con dispositivos de bajo costo, por cuanto cada vez son más instituciones de estudio e investigación al igual que universidades las que requieren contar con estaciones terrenas para CubeSat.

La estación consta de un módulo LoRa de desarrollo que posee un procesador ESP32[9] con varios pines de entrada y salida multipropósito y cuyo precio no supera los 45 USD, de igual manera se emplea un LNA[10] de diseño propio y cuyo costo en materiales es menor a los 30 USD y se complementa con una antena tipo Yagi diseñada específicamente para trabajar a las frecuencias de los CubeSat con tecnología LoRa y que es de construcción propia, hecha con tubos de aluminio y materiales comunes

Materiales y métodos

El presente estudio se empleó el diseño electrónico al igual que el diseño y simulación de antenas, también con los diseños planteados se hizo las pruebas de laboratorio y en campo para determinar el acertado desempeño de la estación terrena LoRa, con lo que se puede construir la primera estación terrena para CubeSat-LoRa de Ecuador.

Para entender la manera como se envían las señales desde estos satélites LoRa, es necesario definir de que se trata el protocolo LoRa.

LoRa, que se aplica a comunicaciones con Largo Alcance emplea un tipo de modulación en radiofrecuencia patentado por Semtech [6][10], que, por emplear una modulación de espectro ensanchado, permite atravesar obstáculos y que en transmisiones abiertas ofrece grandes coberturas por su mayor sensibilidad de recepción con niveles muy bajos de señal [2] que entre sus principales características se encuentran:

- Alta tolerancia a las interferencias
- Alta sensibilidad para recibir datos (-168dB)
- Basado en modulación chirp
- Bajo consumo para nodos, hasta 10 años con una batería
- Largo alcance, 10 a 20 km para enlaces en tierra
- Baja transferencia de datos (hasta 255 bytes)
- Conexión punto a punto
- Frecuencias de trabajo: 915MHz- América, 868MHz – Europa, 433MHz - Asia (en el caso de los CubeSat es la frecuencia más empleada).

Todo esto hace a la tecnología LoRa ideal para conexiones a grandes distancias y para redes de IoT que se pueden utilizar en ciudades inteligentes, lugares con poca cobertura celular o redes privadas de sensores o actuadores.

LoRaWAN es protocolo de red que usa la tecnología LoRa, para redes de baja potencia y área amplia, LPWAN (Low Power Wide Area Network) empleado para comunicar y administrar dispositivos LoRa con uso del internet [11]. El protocolo LoRa-WAN se emplean dispositivos denominados gateways y nodos:

Los gateways con sus antenas son los encargados de recibir y enviar información a los nodos y a su vez permitir la comunicación en la nube o internet.

Nodos o dispositivos: son los elementos finales que envían y reciben información hacia el Gateway haciendo uso de la antena [12].

Con la comunión de gateways y nodos sumados al uso de internet se tiene un sistema que ofrece muchas prestaciones y aplicaciones, así como bondades en comunicación a grandes distancias, con bajo consumo en energía y con niveles de señal muy pequeños [12].

Uso Del Protocolo Lora En Picosatélites

En las comunicaciones CubeSat se envían de pequeños volúmenes de información y se requiere que se puedan recibir y decodificar cuando las señales presenten niveles muy bajos, por lo que se emplea LoRa[4],[1] y de acuerdo a los primeros resultados obtenidos en recepción a nivel mundial, se han logrado comunicaciones exitosas.

Con el primer lanzamiento de un Picosatélite LoRa en el 2019, varios investigadores entusiastas se organizaron para recibir esos datos, y crearon la plataforma TinyGS, que es una red abierta de estaciones terrestres distribuidas por todo el mundo para recibir y operar satélites LoRa, sondas meteorológicas y otros objetos voladores.

Inicialmente TinyGS nació bajo el nombre ESP32 Fossa Groundstation, desarrollado con la finalidad de recibir las señales para el satélite FossaSAT-1 LoRa, en noviembre del 2019. Actualmente, la red está abierta a cualquier satélite LoRa y también para otros objetos voladores que transmitan con una modulación en radio como FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa y OOK. con lo que el proyecto pasó a llamarse TinyGS.

La plataforma TinyGS cuenta, a octubre del 2023, con 4391 miembros de los cuales existen 1377 estaciones activas alrededor del mundo. La plataforma cuenta con una página web donde se muestran las estaciones terrenas y sus ubicaciones en el mapa, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Mapa de estaciones satelitales LoRa a nivel mundial a octubre 2023 (TinyGS)

Componentes del sistema receptor LoRa

El sistema de recepción como indica el diagrama de la Figura 2, está formado por una antena de recepción direccional y de alta ganancia, un amplificador de bajo ruido LNA, un nodo LoRa que en esta investigación emplea el microprocesador ESP32 y que a través de su conexión WIFI sube los datos usando el internet, hacia la plataforma de TinyGS.

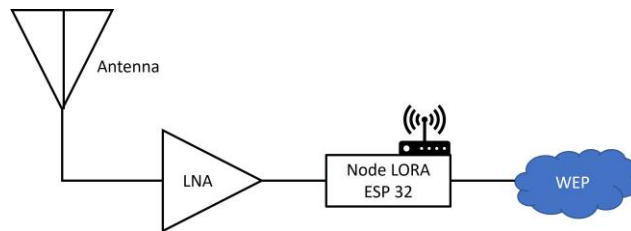


Figure 2. Diagrama de elementos necesarios en la Estación Terrena LoRa.

Para determinar la ubicación de los diferentes satélites LoRa con sus efemérides en tiempo real y las predicciones de los futuros pases con las mejores características para recepción de señal con sus ángulos de elevación, azimut y distancias, se hace uso de predicciones online como del sitio web <https://www.n2yo.com>, donde se puede obtener los datos del satélite LoRa de interés, en tiempo real, el tracking y la predicción de los mejores pases indicando el nivel de señal esperada, como se muestra en el ejemplo de la Figura 3 para el satélite LoRa ruso, llamado NORBI.

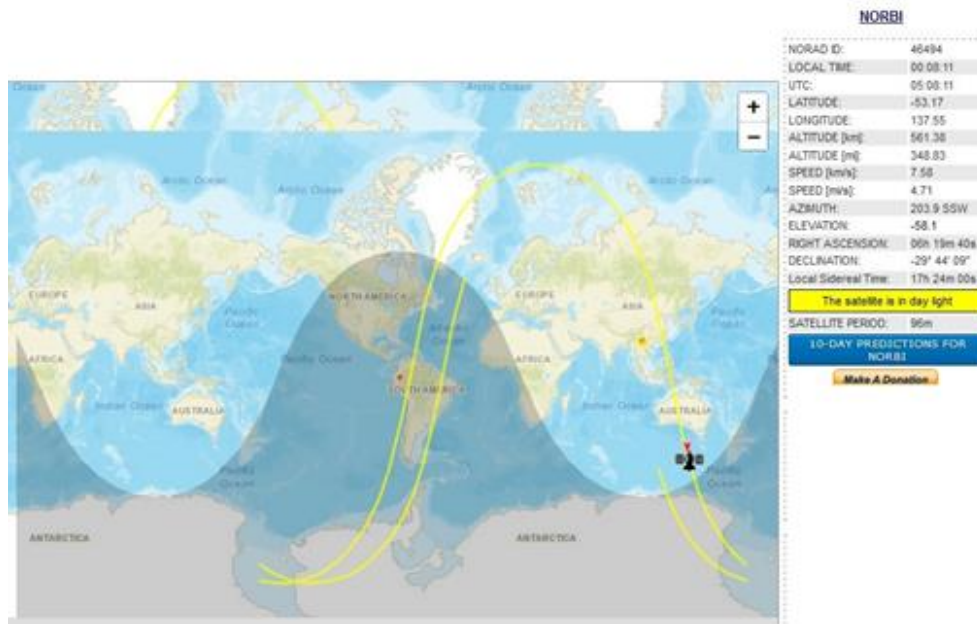


Figura 3. Tracking Sat. NORBI de www.n2yo.com

Se realizó un análisis de varios satélites LoRa activos desde su fecha de lanzamiento, la potencia con la que transmiten sus señales a tierra y la frecuencia que emplean para transmitir los datos en los canales LoRa, tal como se indica en la Tabla 1 de resumen.

Tabla 1. Satélites LoRa, frecuencias y Potencias de Downlink (obtenidos de la plataforma TinyGS)

<i>Fecha de lanzamiento</i>	<i>Satélites LoRa</i>		
	<i>Nombre del Satélite</i>	<i>Frecuencia (MHz)</i>	<i>Potencia (mW)</i>
27-09-2020	NORBY	436.703	2000
22-04-2021	FEES	437.2	500
13-01-2022	SATLLA-2B	437.25	63
13-01-2022	FossaSat-2E2	401.7	158

Se pudo determinar que el satélite con mayor potencia de transmisión es el satélite Ruso NORBI, que la mayoría del tiempo transmite con una señal de 2000 mW y a veces eleva su potencia hasta a los 7000 mW, según se publica en la plataforma TinyGS.

Antena Yagi en la Banda de los 430 Mhz

Para garantizar que las señales enviadas por los satélites LoRa sean captadas, se propuso el diseño de una antena Yagi [14] directiva, que es la antena que posee mejores características directivas que una dipolo o cuarto de lambda, que ayude a captar estas señales muy débiles provenientes del espacio desde el CubeSat y que a su vez tenga una gran ganancia. La antena Yagi [14][15] propuesta y diseñada, está compuesta por 5 directores y posee una ganancia teórica de 16.8 dBi. Está sintonizada a la frecuencia central de 436.7 MHz y presenta una impedancia de 50 Ohms [15]. Esta frecuencia coincide con la de transmisión del satélite ruso NORBI, que ostenta la mayor potencia de emisión entre los satélites activos. Esta elección asegura la recepción efectiva al orientar la antena hacia el satélite que emite la señal más robusta. La antena se simuló en el software MMANA-GAL, para obtener los datos teóricos y optimizados con los que se la construyó. Posteriormente se hizo las pruebas en el laboratorio de Alta Frecuencia de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, con el equipo analizador de redes de marca KEYSIGHT modelo N9916A, de donde se obtuvieron los resultados descritos en la Tabla 2.

Tabla 2. Magnitudes de la Antena Yagi diseñada a las frecuencias de transmisión de varios CubeSat-LoRa.

<i>FRECUENCIA [MHz]</i>	<i>PARÁMETRO</i>	<i>SIMULADO</i>	<i>MEDIDO</i>
436.703	R [Ohms]	43.71	53.3
	ROE (a 50 Ohms)	1.18	2.1
437.2	R [Ohms]	43.96	51.5
	ROE (a 50 Ohms)	1.16	1.79
401.7	R [Ohms]	29.01	30.6
	ROE (a 50 Ohms)	3.8	1.86

Los diagramas de radiación obtenidos mediante la simulación ofrecen una visualización clara de los lóbulos y las pautas de radiación correspondientes a los cortes realizados en los planos horizontal y vertical. Estos aspectos se detallan en

la Figura 4. En lo que respecta al campo lejano de la antenna, se destacan las características más óptimas en términos de directividad y ganancia para la aplicación diseñada.

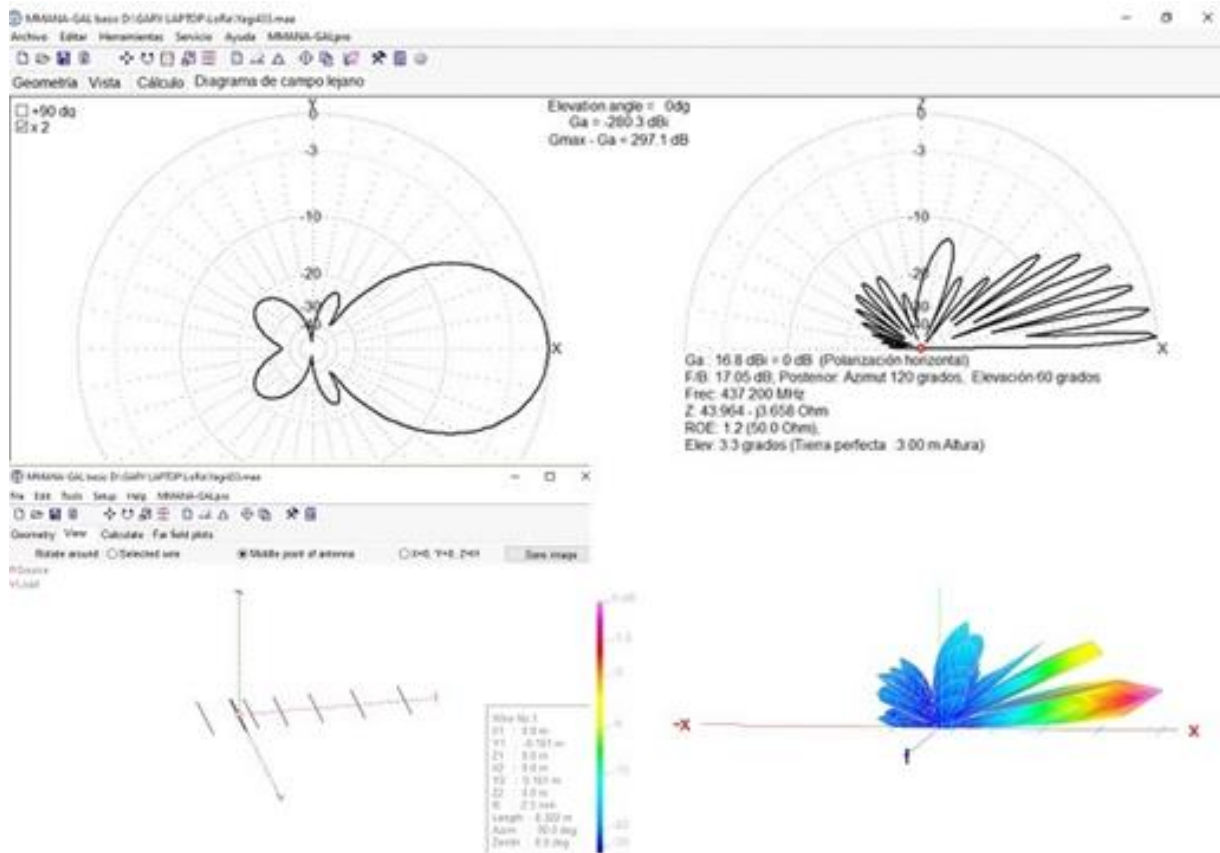


Figure 4. Diagrama de radiación de la antenna Yagi diseñada y simulada

Amplificador de Bajo Ruido LNA

Para garantizar que la débil señal que envían los CubeSat LoRa sea receptada correctamente, se requiere un amplificador de bajo ruido (LNA), para alcanzar los niveles mínimos que permitan decodificar las señales. Estos amplificadores de bajo ruido (LNA) están disponibles en versiones comerciales que prometen amplificaciones superiores a los 23 dB. Sin embargo, la calidad y el ancho de banda no están garantizados en dichas versiones, y además, se debe considerar el costo adicional relacionado con la importación. Adicionalmente, si se opta por un LNA de una marca comercialmente reconocida, el precio se incrementa aún más. Dado que el objetivo del proyecto era desarrollar un sistema de bajo costo,

se tomó la decisión de diseñar el circuito por completo en lugar de utilizar componentes comerciales. Como elemento principal del circuito LNA se empleó el chip amplificador PSA4-5043+ del fabricante Mini-circuits, que posee excelentes características para las frecuencias de trabajo en la banda de los 400 a 500 MHz [10]. Con una Ultra Low Noise Figure 0.65 dB, Gain 22.1 dB, trabajando a +5V tiene un consumo de corriente de 56mA.

Se añadieron al diseño del circuito LNA, un regulador de voltaje y un circuito BIAS-TEE [7] así como un led indicador de polarización y los filtros de aterrizaje y pasa banda [7], el diagrama completo se muestra en la Figura 5.

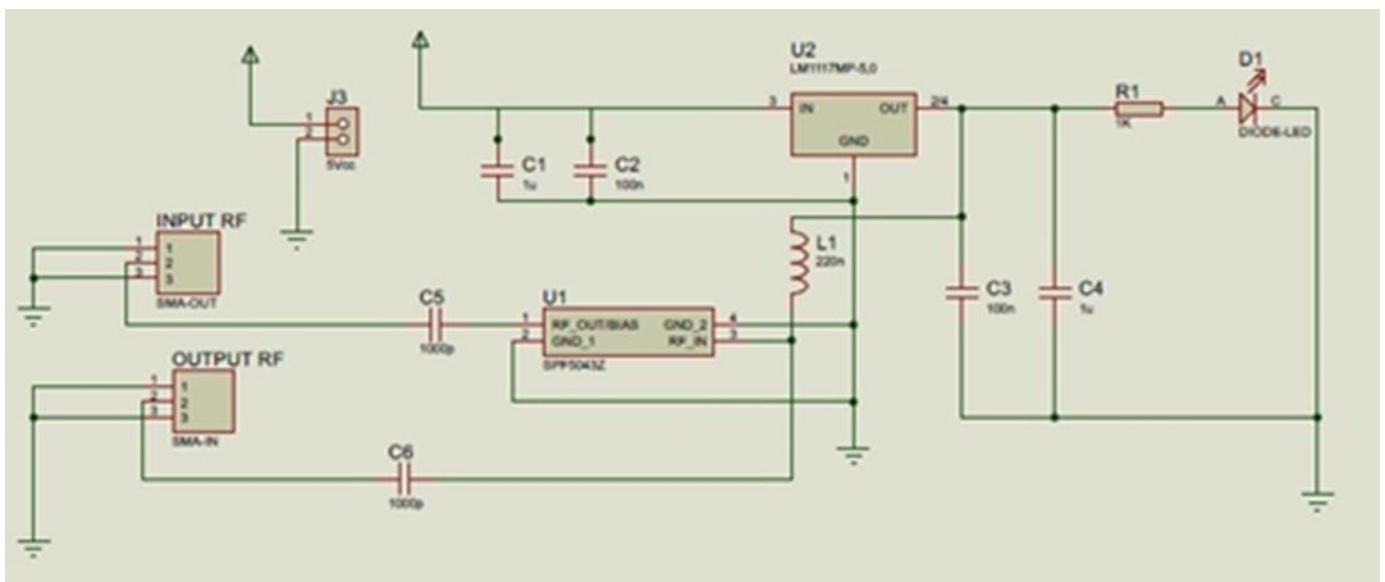


Figura 5. Circuito LNA diseñado usando el dispositivo PSA4-5043+

Nodo LoRa a 433 MHz

Se utilizó un módulo de desarrollo denominado LoRa HETEC 32 WIFI. Este módulo presenta una placa que incorpora un procesador ESP32 y una pantalla OLED de 0,96 pulga-das. Además, dispone de conectividad WiFi y un conector SMA para la antena. El módulo opera con la modulación LoRa en la banda de frecuencia de 433 MHz, tal como se señala en la Figura 6. Es importante mencionar que este módulo tiene un coste inferior a los 45 dólares estadounidenses.

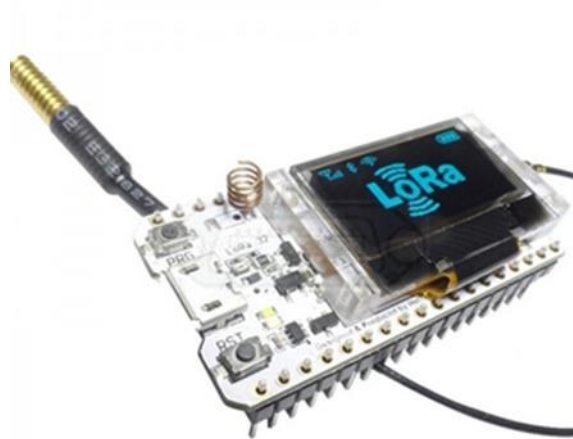


Figura 6. Módulo ESP32-OLED- LoRa.

Para habilitar el funcionamiento del dispositivo ESP32 y permitir el envío de datos a la plataforma TinyGS, se utiliza el software de código abierto disponible en el siguiente enlace: <https://github.com/G4lile0/tinyGS>. Este software proporciona la funcionalidad necesaria para que el ESP32 se integre con la plataforma TinyGS y pueda transmitir datos de manera efectiva.

Resultados y discusión

Los datos que se reciben son de telemetría de los satélites LoRa e indican la potencia de transmisión del satélite, la temperatura interna y externa del satélite en su vuelo, consumo de energía, las caras del satélite que reciben energía solar en sus paneles, número de paquetes de datos enviados, numero de resets del computador interno , entre otras cosas, los datos recibidos y decodificados de la estación terrena son mostrados en la plataforma de TinyGS, donde son graficado tal como se indica en la Figura 7.

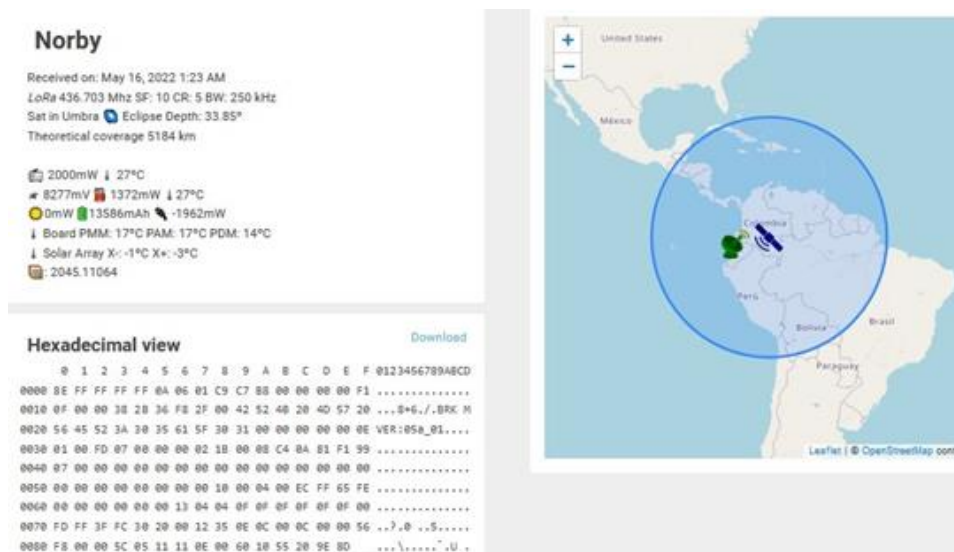


Figura 7. Ejemplo datos de telemetría recibida en la estación Terrena LoRa

La estación terrena instalada en Quito- Ecuador ha estado trabajando desde junio del 2021 y lleva 1153 paquetes recibidos de varios satélites LoRa, que se encuentra a una distancia promedio de 400 km. y se ha logrado una distancia máxima en la recepción de paquetes correctos de 1900 km y corresponde a la señal del satélite Norby cuando transmite a una potencia de 7000 mW.

Además, en el caso del satélite FossaSat-2E2, que transmite a una frecuencia de 401,7 MHz con una potencia de emisión de tan solo 158 mW. A pesar de estas cifras relativamente bajas de potencia de transmisión, se logró recibir la señal a una distancia de 804 km. Esto destaca la eficacia de la comunicación, incluso con niveles de potencia de transmisión moderados y refleja el buen desempeño de la estación terrena construida.

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede determinar que pese al bajo costo de los implementos del sistema, los resultados son bastante óptimos si los comparamos con los de sistemas profesionales que usan otras estaciones terrenas. Se pudo observar que la mayoría de las recepciones exitosas de paquetes de datos LoRa provenientes del CubeSat ocurrieron cuando estos pasaban en un ángulo de elevación relativo superaba los 20 grados con respecto a la posición de la estación terrena. Este fenómeno se debe a la geografía de la ciudad de Quito, que está rodeada de montañas. Estas

montañas limitan la recepción de señales en ángulos de elevación más bajos. La estación terrena forma parte de las 4391 estaciones instaladas mundialmente, de las cuales sólo 1377 son activas, es decir sólo el 31,4% recibe datos, por lo que hay estaciones que pese a contar con todos los equipos no han logrado recibir ningún paquete.

Hay que tomar en cuenta que varios paquetes no se han recibido correctamente, por cuanto, en esta primera parte del proyecto se diseñó una antena que no cuenta con un sistema de seguimiento automático, por lo que a futuro se planea hacer el apuntamiento automático.

La comunicación LoRa resultó ser muy efectiva en uso en satélites CubeSat, pues las distancias alcanzadas superan los 1000 km y con una potencia de transmisión que no supera los 7000 mW. Es decir, se reciben datos con un nivel de señal de -128dBm, en comparación con los sistemas de recepción satelital tradicional, sería imposible recibir una señal exitosa con esos niveles de señal

Contribución de Autoría

Gary Fernando Flores Cadena: [Conceptualización](#), [Análisis formal](#), [Investigación](#), [Software](#), [Validación](#), [Redacción - borrador original](#), [Curación de datos](#), [Escritura, revisión y edición](#). **Pablo Anibal Lupera Morillo:** [Conceptualización](#), [Análisis formal](#), [Investigación](#), [Visualización](#), [Metodología](#), [Software](#), [Validación](#), [Redacción - borrador original](#). **Darwin Antonio Mena:** [Conceptualización](#), [Investigación](#), [Visualización](#), [Metodología](#), [Software](#), [Validación](#), [Redacción - borrador original](#), [Curación de datos](#). **David Benalcazar Rojas:** [Conceptualización](#), [Análisis formal](#), [Investigación](#), [Visualización](#), [Metodología](#), [Software](#), [Validación](#), [Redacción - borrador original](#), [Curación de datos](#). **Henry Paul Llumiquinga Loya:** [Conceptualización](#), [Análisis formal](#), [Investigación](#), [Visualización](#), [Metodología](#), [Software](#), [Validación](#), [Redacción - borrador original](#), [Curación de datos](#), [Escritura, revisión y edición](#). **Henry Paul Llumiquinga Loya:** [Conceptualización](#), [Análisis formal](#), [Investigación](#), [Visualización](#), [Metodología](#), [Software](#), [Validación](#), [Redacción - borrador original](#). **Santiago Sandobalín Guaman:** [Conceptualización](#), [Análisis formal](#), [Investigación](#), [Visualización](#), [Metodología](#), [Software](#), [Validación](#), [Redacción - borrador original](#), [Curación de datos](#), [Escritura, revisión y edición](#). **Ericson Daniel Lopez Izurieta:** [Visualización](#), [Software](#), [Validación](#), [Redacción - borrador original](#), [Curación de datos](#), [Conceptualización](#), [Investigación](#), [Metodología](#), [Análisis formal](#), [Supervisión](#).

Referencias

- [1]. N. Saeed, A. Elzanaty, H. Almorad, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, “Cubesat communications: Re-cent advances and future challenges,” *IEEE Commun. Surv. & Tutorials*, vol. 22, no. 3, pp. 1839–1862, 2020.
- [2]. D. Kjendal, “LoRa-Alliance regional parameters overview,” *J. ICT Stand.*, pp. 35–46, 2021.
- [3]. P. Lepcha et al., “Assessing the Capacity and Coverage of Satellite IoT for Developing Countries Using a CubeSat,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 17, p. 8623, 2022.
- [4]. E. Bashir and M. Luštrek, “Low power LoRa transmission in low earth orbiting satellites,” *Intell. Environ.*, p. 233, 2021.
- [5]. G. Flores, E. López, L. Tituaña, and P. Lupera, “Low Cost Multiband Receiver for the Reception of Images from Meteorological Satellites and SSTV,” *Rev. Politécnica*, vol. 40, no. 2, pp. 25–30, 2018.
- [6]. M. Aref and A. Sikora, “Free space range measurements with Semtech LoRaTM technology,” in *2014 2nd international symposium on wireless systems within the conferences on intelligent data acquisition and advanced computing systems*, 2014, pp. 19–23.
- [7]. J. B. Hagen, *Radio-frequency electronics: circuits and applications*. Cambridge University Press, 2009.
- [8]. J. A. M. Lara, J. A. R. Agredo, and M. P. M. Atencia, “Sistema de monitoreo de señales en tierra usando la Estación Terrena Satelital UPTC,” *INGE CUC*, vol. 15, no. 1, pp. 36–44, 2019.
- [9]. A. Maier, A. Sharp, and Y. Vagapov, “Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things,” in *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*, 2017, pp. 143–148.
- [10]. H. Daryanavard and others, “A Low Noise Figure Rail-to-Rail Variable-Gain LNA for 900-MHz LoRa Application in 65nm CMOS Technology,” 2022.
- [11]. C. A. Trasviña-Moreno, R. Blasco, R. Casas, and A. Asensio, “A network performance analysis of LoRa modulation for LP.WAN sensor devices,” in *Ubiquitous computing and ambient intelligence*, Springer, 2016, pp. 174–181.
- [12]. M. A. Moya Quimbita, “Evaluación de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos,” 2018.
- [13]. M. A. Gaybor Murillo, M. D. Maridueña Chunga, and others, “Diseño de un sistema de adquisición de datos de una red de sensores inalámbricos que miden variables oceanográficas en el perfil costanero de Santa Elena, usando tecnología LoRa,” *Espol*, 2018.
- [14]. P. P. Vezbicke, *Yagi antenna design*, vol. 688. US Government Printing Office, 1976.
- [15]. W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson education, 2003.