

An IoT Ground Station: Mechanics, Control, Antenna, and Reception from a LoRa Satellite Network

Juvenal Villanueva-Maldonado , José Luis Alvarez-Flores , Marco Cardenas-Juarez, *Senior Member, IEEE* , Jorge Flores-Troncoso , and Jorge Simon 

Abstract—In this article, the design and the integral implementation of a satellite ground station connected to the Internet of Things is presented. The communication system is based on long-range wireless technology, with the objective of receiving telemetry packets from a network of low-earth orbit satellites that transmit at frequencies around 433 MHz. The design covers mechanical design aspects, the control system, the antenna system, and the receiver. The ground station is oriented with respect to the elevation and azimuth coordinates obtained from a web page. This web page contains a console that shows the telemetry packets that have been received, as well as the satellite from which they came. The ground station is a low-cost proposal since commercial ground stations could be purchased at prices much higher than 2 orders of magnitude. All these aspects implied in this easy-to-replicate ground station are especially relevant in educational terms and for amateur radio enthusiasts.

Index Terms—Internet of Things ground station, mechanics, control, antenna, LoRa satellites.

I. INTRODUCCIÓN

Desde principios del siglo XXI, las comunicaciones satelitales han experimentado una evolución significativa gracias a un concepto innovador conocido como *CubeSat*. El *CubeSat* es un estándar de satélites pequeños implementado por primera vez entre la Universidad Politécnica de California y la Universidad de Stanford en 1999 en Estados Unidos, el cual ha revolucionado la forma en que se desarrollan y operan los satélites de comunicaciones. La arquitectura estándar de este tipo de satélites corresponde a una estructura en forma de cubo de $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, con un peso que está entre 1 y $1,33\text{ kg}$ y que puede ser implementada de forma modular en 1U (1 unidad) hasta 24U (24 unidades) según [1] y [2]. Los primeros *CubeSats* fueron lanzados en 2003, siendo para 2008 un total de 75 dispositivos de este tipo los que habían sido puestos en órbita. Es importante resaltar que para abril de 2022 ya existían 5465 satélites *CubeSat* operativos en el espacio, de los cuales 3434 eran de Estados Unidos, 541 de China, 172 de Rusia y 1319 del resto del mundo. Así mismo, 3616 satélites de este tipo (62%) han sido diseñados con el propósito de implementar comunicaciones espacio-Tierra

Villanueva-Maldonado J., Flores-Troncoso J. and Simón J. are with Posgrado en Ingeniería para la Innovación Tecnológica, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas Francisco García Salinas

Alvarez-Flores J.L. is with Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad de Colima

Cardenas-Juarez M. is with Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

TABLA I
ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN
SATELITAL

Segmento Espacial	Segmento Terrestre
- Computadora a bordo (OBC)	- Sistema de Antenas
- Comunicación y Manejo de Datos (TT&C)	- Transmisores y Receptores
- Sistema de Energía (EPS)	- Procesador de Banda Base
- Control de Actitud (ADCS)	- Interfaz con la Red Terrestre)
- Propulsión	- Sistema de Supervisión y Mando
- Carga Útil o Misión	- Servo Mecanismos
- Estructura	- Sistema de Control
	- Software para predecir la posición orbital del satélite.
	- Sistema de Energía

según se puede apreciar en los informes de [3].

En la tabla I I, se pueden observar algunos de los principales componentes de un sistema satelital tanto para los segmentos espacial como terrestre. El segmento espacial esta compuesto por toda la arquitectura física del dispositivo en el espacio que incluye la carga útil, las comunicaciones y energía, entre otros [4]. Mientras que segmento terrestre (estación terrena), es toda la infraestructura que se encuentra en Tierra y son las instalaciones físicas desde donde se realizan las comunicaciones y el control con el segmento espacial. Este segmento incluye comunicaciones de subida (*uplink*) o de bajada (*downlink*), el control de la misión y el procesamiento de los datos recibidos [5].

Las estaciones terrenas existen de varios tipos y tamaños dependiendo de su uso. Se pueden mencionar las de control de misión, las de recepción de datos, las de seguimiento y control, las móviles y las fijas. Cada una de ellas tiene propósitos diferentes, sin embargo tienen en común que todas son instalaciones en tierra e incluyen tecnologías para poder mantener un control y transferencia de datos entre el segmento terrestre y el espacial. Las estaciones terrenas para los *CubeSats*, comunmente trabajan en las bandas VHF (very high frequencies), UHF (ultra high frequencies) y S, [6] y cuentan principalmente con elementos electrónicos como antenas, dispositivos transmisores y receptores de radiofrecuencia, moduladores y demoduladores; cuentan también con sistemas mecánicos y de control para direccionar las comunicaciones con el satélite y con conexión a redes de área amplia y redes de área local para la transferencia de

datos e información hacia la nube, [7] y [8].

El costo de un estación terrena regularmente no permite que universidades públicas en Latinoamérica puedan adquirirlas e integrarlas a sus laboratorios, razón por la cual el sector espacial no ha crecido lo suficiente, lo cual es una clara desventaja ante países con mayor desarrollo espacial como los Estados Unidos, China, Japón, entre otros.

En la literatura podemos encontrar reportadas diversas estaciones terrenas, los cuales se enfocan en resolver un problema en específico, como en [7], donde se enfocan en el desarrollo del software para generar los ángulos para las antenas y la corrección del efecto doppler y hacen uso de equipo existente, así como de antenas comerciales. En [9] presentan únicamente la filosofía de diseño para una estación terrena con antenas para las bandas UHF, VHF y S, mientras que en [10] se enfocan en rehabilitar una estación terrena y a desarrollar el software para el control de seguimiento satelital basado en estándares y lineamientos internacionales, de manera que operadores externos puedan acceder de forma remota. En [11] presentan un algoritmo para el control de seguimiento satelital que permite orientar las antenas que se encuentran en un satélite a bordo. Su objetivo es orientar la antena hacia la estación terrena siguiendo una dirección de referencia que está determinada por la geometría entre el satélite y la estación.

Con base en lo anterior, se presenta el diseño y la construcción integral de una estación terrena fácil de ser replicada con sistema de seguimiento satelital, la cual permite direccionar de manera controlada tres antenas (bandas VHF, UHF y S). La estación terrena propuesta tiene un bajo costo comparado con el de estaciones terrenas comerciales que pueden de ser de más de 2 órdenes de magnitud [6]. Así mismo, se muestra una comparativa de respuesta sobre la implementación de tres controladores clásicos. La estación terrena se probó para recepción de paquetes de telemetría en UHF provenientes de satélites Long Range (LoRa) tipo *CubeSat*, esto como parte de la red de estaciones terrenas *TinyGS*, lo que lo hace una estación terrena IoT (Internet of Things) [12].

El presente trabajo está organizado de la siguiente forma: en la Sección II se indica la metodología empleada para el desarrollo e implementación de la estación terrena, mientras que en la Sección III se presentan los resultados obtenidos. Finalmente en la Sección IV se muestran algunas conclusiones y discusiones.

II. ARQUITECTURA Y METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la arquitectura del sistema que se realizó para diseñar y construir la estación terrena con sistema de seguimiento satelital de bajo costo. El trabajo se dividió en cuatro módulos: Sistema mecánico, Sistema de control, Sistema de Antenas y Sistema de recepción LoRa IoT, módulos que pueden ser observados en la Fig. 1. El sistema mecánico tiene la función de sostener, soportar y direccionar las antenas. El sistema de control es el que

regula los movimientos de las articulaciones del sistema mecánico para direccionar las antenas, mientras que las antenas son los dispositivos que permiten recibir paquetes de telemetría en el segmento terrestre desde el segmento espacial. Finalmente, el sistema LoRa procesa la información durante la comunicación de *downlink*. Cada módulo se desarrolló y probó experimentalmente en forma individual y posteriormente se realizó la integración de la estación terrena para realizar las pruebas finales.

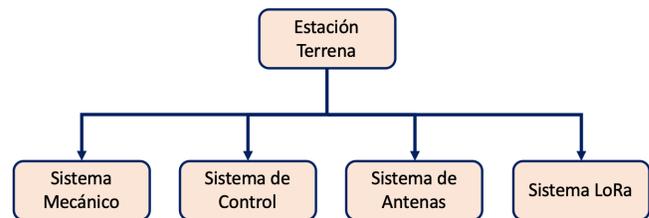


Fig. 1. Arquitectura de la estación terrena.

II-A. Sistema Mecánico: Diseño y Modelado

El movimiento del sistema mecánico para orientar la antena hacia el satélite es con base en los ángulos de vista, es decir, los ángulos de azimut y elevación. En la Fig. 2, se aprecia una antena de una estación terrena que apunta en dirección a la ubicación del satélite considerando los ángulos referidos.

Por lo anterior, para el diseño mecánico se consideraron estos dos movimientos, estableciéndose como prioritarias por medio de una lluvia de ideas (método *brainstorming*), otras características, como lo son: a) capacidad para soportar tres antenas (un plato parabólico y dos de tipo Yagi), b) que sea un diseño simple y con facilidad de reemplazar piezas, c) que sea un sistema capaz de seguir trayectorias satelitales, d) que utilice una plataforma de ubicación de satélites de acceso libre, e) que sea de bajo costo y f) que sea fácil de replicar [13] [14].

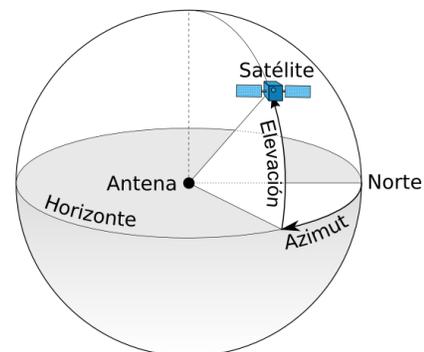


Fig. 2. Ángulos para orientación de la antena para recepción de paquetes de telemetría desde el satélite: azimut y elevación.

Para el sistema mecánico, los movimientos de azimut y elevación se consideraron independientes uno con respecto al otro, lo cual simplificó el diseño y el modelado para un sistema de dos grados de libertad. En las articulaciones

se utilizaron motores a pasos conectados a una transmisión de 1:100, lo que permite tener desplazamientos con mayor precisión y aumentar el torque. En la Fig. 3¹, se muestra el diseño del sistema que cuenta con un soporte central para colocar la antena de tipo plato parabólico (para banda S) de hasta 3 metros de diámetro, mientras que en los brazos (extremos) se pueden sujetar las antenas Yagi (para las bandas VHF y UHF).

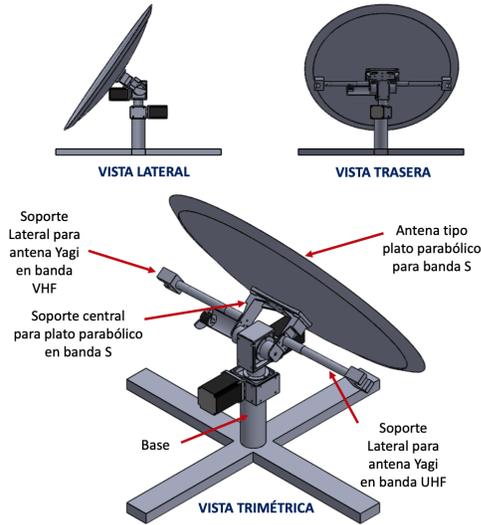


Fig. 3. Diseño estructural del servo mecanismo.

El modelado del sistema se presenta por medio de funciones de transferencia para cada articulación, esto al considerar independientes los movimientos de azimut y de elevación, por lo que se obtuvo la respuesta de movimiento para cada uno de ellos, los cuales mostraron comportamiento amortiguado, mismos que pueden ser observados en la Fig. 4. Las formas de la respuestas sugieren el comportamiento de un sistema de primer orden, de este modo las funciones se expresan de la siguiente manera:

- Ángulo de azimut

$$G_{Azim}(s) = \frac{0,0282}{s + 0,0282} \quad (1)$$

- Ángulo de elevación.

$$G_{Elev}(s) = \frac{0,05516}{s + 0,056} \quad (2)$$

Así mismo, en la Fig. 4, se observa la respuesta teórica aproximada (TF) por las ecuaciones (1) y (2), para el ángulo de azimut y de elevación, respectivamente.

II-B. Sistema de Control

Para diseñar el sistema de control se implementaron tres tipos de controladores clásicos: Proporcional (P), Proporcional

Integral (PI) y Proporcional Integral Derivativo (PID), esto con el fin de comparar desempeño. La Fig. 5 muestra el esquema del control implementado, donde la referencia (azimut y elevación) son los datos obtenidos mediante el software de acceso libre, [15], o bien de [12] para el posicionamiento satelital. Las herramientas descritas en [15] y en [12] permiten seleccionar el satélite deseado, pues entregan la información de la trayectoria del satélite y sus correspondientes ángulos de azimut y elevación en determinado lapso de tiempo. Éstos se comparan con las lecturas de los sensores de azimut y elevación, y de esta manera se obtiene la señal de error $E(s)$, la cual se ingresa al controlador para obtener la señal de control $U(s)$, señal de modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés).

Para sintonizar el controlador, se considera la representación general de un sistema de primero orden y el control PID dados por las ecuaciones (3) y (4), respectivamente, [16].

$$G(s) = \frac{b}{s + a} \quad (3)$$

$$G_c(s) = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \quad (4)$$

donde K_p, K_I, K_D son las ganancias del Proporcional, Integral y Derivativo, respectivamente.

La función de transferencia del sistema en lazo cerrado se obtiene a través de [17]:

$$G_{LC}(s) = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (5)$$

de manera que al sustituir las ecuaciones (3) y (4) en (5), tenemos que, [17] [16]

$$G_{LC}(s) = \frac{(K_D s^2 + K_P s + K_I)}{(K_D + 1/a)s^2 + (K_P + b/a)s + K_I} \quad (6)$$

Finalmente, las ganancias para el control PID, para cada articulación, quedan como se muestra en la Tabla II.

TABLA II
GANANCIAS DE SINTONIZACIÓN DEL PID

Ángulo de Ázimuth	Ángulo de Elevación
$K_p = 8$	$K_p = 8$
$K_I = 0,2$	$K_I = 0,5$
$K_D = 0,5$	$K_D = 0,005$

II-C. Sistema de Antena Terrena en Banda UHF

La antena utilizada es una antena direccional del tipo *turnstile* sintonizada para trabajar a 433 MHz, la cual es una frecuencia utilizada en los subsistemas de telemetría, rastreo y control de satelitales (TT&C, por sus siglas en inglés), que en este caso opera con tecnología de transmisión inalámbrica LoRa, [18]. La antena *turnstile* se encuentra en modo recepción y esta compuesta por 3 pares de dipolos cruzados a 90 ° entre sí: 2 dipolos cruzados alimentados, 2 dipolos cruzados directores y 2 dipolos cruzados reflectores. Este arreglo de 3

¹Planos: <https://drive.google.com/drive/folders/1RCT0YP7UMrIp5qx9Z6ZbLGavZcFqDqvn?usp=sharing>

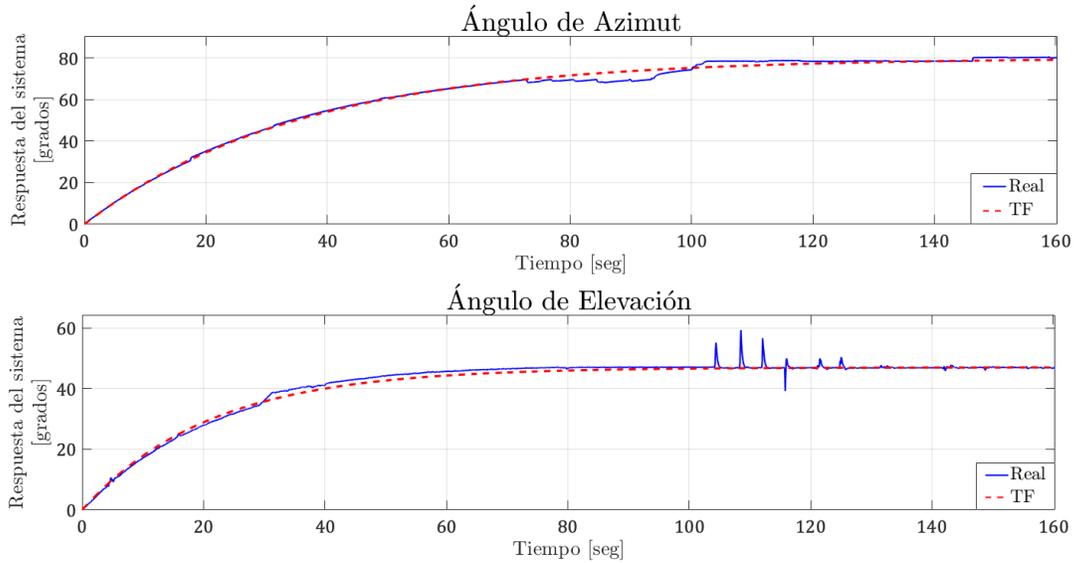


Fig. 4. Señales de respuesta del sistema.

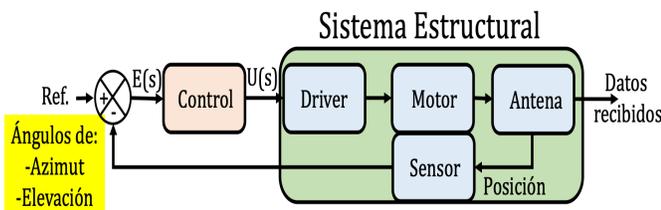


Fig. 5. Esquema del sistema de control.

pares de dipolos la hace más directiva y de mayor ganancia comparada con una antena que solo incluyera el par de dipolos alimentados. Los 6 dipolos son dipolos de media longitud de onda, es decir miden 34.64 cm cada uno de extremo a extremo. En la parte de dipolos alimentados, los dos dipolos cruzados se encuentran interconectados a través de un arreglo de líneas de transmisión coaxiales RG58 y RG59 para producir polarización circular en la recepción (ver Fig. 6), esto con el fin de disminuir las pérdidas por desajuste de polarización en el downlink [19], ya que algunos satélites no cuentan con control de actitud que controla la orientación del satélite y en consecuencia la de la antena transmisora de telemetría a bordo, [20]. La antena fue fabricada usando materiales metálicos (varillas roscadas, tuercas y arandelas) y plásticos (cajas y tubos para instalaciones eléctricas) de bajo costo. Así mismo, se le instaló a la entrada un conector de radiofrecuencia hembra tipo N de impedancia característica de 50 Ω, al cual posteriormente se le acopló un adaptador coaxial de tipo N macho a tipo SMA (SubMiniature version A) hembra, también de 50 Ω para coincidir con el tipo de conector en el receptor LoRa. En la Fig. 7, se puede observar la antena en color verde montada sobre el mecanismo de la estación terrena. Como se mencionó anteriormente, la estructura mecánica de la estación terrena está diseñada para soportar 3 antenas: una tipo parabólica para la banda S (2 a 4 GHz) y dos tipo Yagi, una para la banda VHF (145 MHz) y

otra para UHF (433 MHz). En este caso se efectuó recepción montando solo la antena en UHF (433 MHz) para probar que el direccionamiento en azimut y elevación se llevan a cabo de manera correcta. Los direccionamientos en las otras bandas (VHF y S), se pueden llevar a cabo de la misma manera y de manera simultánea ya que la parte mecánica está diseñada para soportar las 3 antenas.

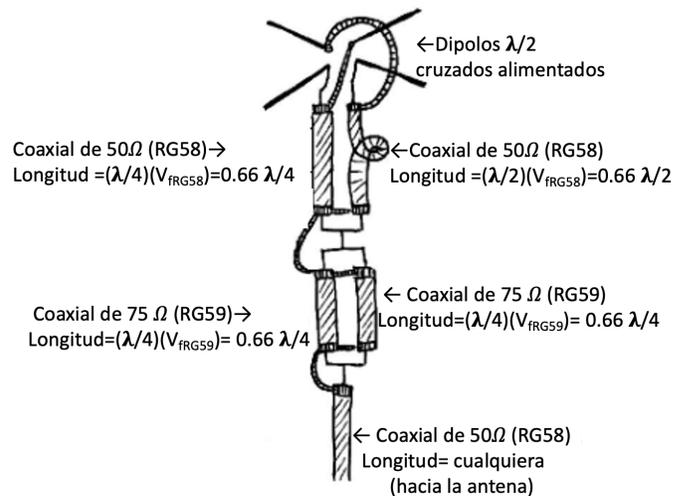


Fig. 6. Interconexión dipolos y líneas de transmisión coaxiales para producir polarización circular.

II-D. Sistema de Recepción LoRa

El sistema de recepción está basado en la tarjeta de desarrollo LILYGO TTGO LoRa32 433 MHz V1.6.1, la cual incluye principalmente un chip ESP32 y un módulo LoRa32 a 433 MHz, [21] y [22]. El sistema de recepción satelital LoRa se conecta a una red de área local wifi para

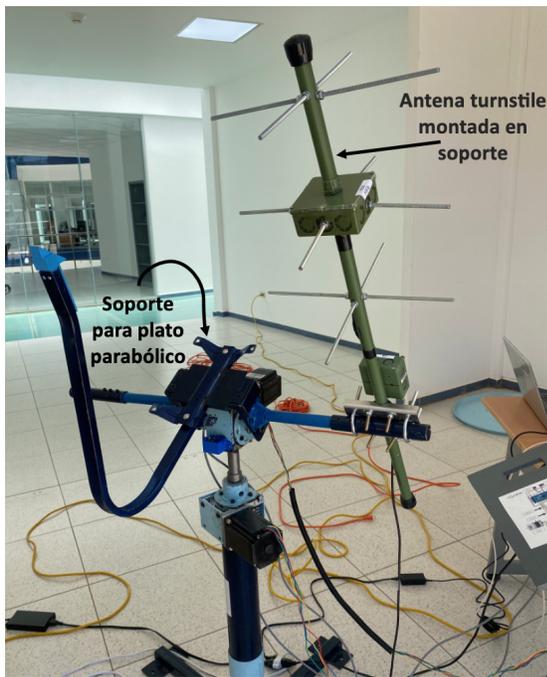


Fig. 7. Antena *turnstile* montada sobre la estación terrena.

ser controlado y monitoreado desde internet a través de una página web que incluye una consola del sistema de recepción y su ubicación para saber los satélites a los cuales se puede conectar. Los satélites con los cuales el sistema de recepción referido se conecta siguen una órbita LEO a más de 400 Km de altura y pertenecen a la red *TinyGs*, [12]. La conexión implica la recepción de paquetes de telemetría, lo cual es llevado a cabo mediante la orientación del sistema de antena utilizando la estación terrena que incluye sistema mecánico y sistema de control que seleccionan ángulo de azimut y elevación. El sistema de recepción cuenta con un puerto SMA (SubMiniature version A) hembra de 50Ω el cual se acopla al cable RG58 que viene de la antena (ver parte inferior de Fig. 6). Así mismo, el sistema de recepción se encuentra conectado a una batería recargable mediante un puerto USB (universal serial bus) de carga. La Fig. 8, muestra el sistema de recepción satelital LoRa. En gris se observa la carcasa del receptor, el cual es acoplado a la antena (color verde) a través de líneas de transmisión coaxiales, mientras que en rojo se observa la batería recargable.

III. RESULTADOS

III-A. Pruebas de Desempeño del Sistema Mecánico

El sistema mecánico se construyó con acero *cold rolled* (estirado en frío); para ello se utilizó tubo cuadrado de 1.5 pulgadas en la base del suelo, tubo redondo de 3 pulgadas como poste y de 1.5 pulgadas en los brazos, como se observa en la Fig. 9. Es importante resaltar que se realizaron una serie de corridas en las pruebas para diferentes valores de azimut y elevación, con el objetivo de comprobar la funcionalidad y exactitud, donde se observó que el sistema presentaba en ambas articulaciones un comportamiento

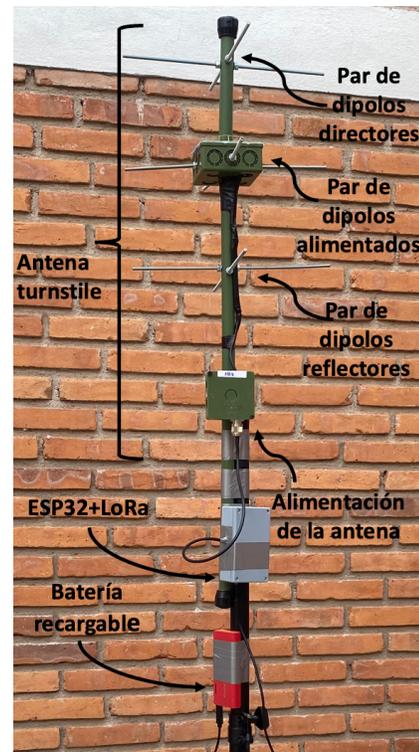


Fig. 8. Sistema de recepción LoRa a 433 Mhz.

amortiguado como se muestra en la Fig. 10, permitiendo modelar los movimientos por medio del método de la función de transferencia (ver Sección II-A).



Fig. 9. Sistema Mecánico con seguimiento satelital.

El tiempo de respuesta que presentó el sistema para azimut fue de 145s para alcanzar un desplazamiento de 80° , mientras que en elevación le toman 80 s para 50° que presentó un error de 1° (ver Fig. 10). Estos tiempos de respuesta se pueden considerar cortos, pero para el caso de las comunicaciones satelitales, los tiempos en línea de vista que presentan los satélites con las estaciones terrenas

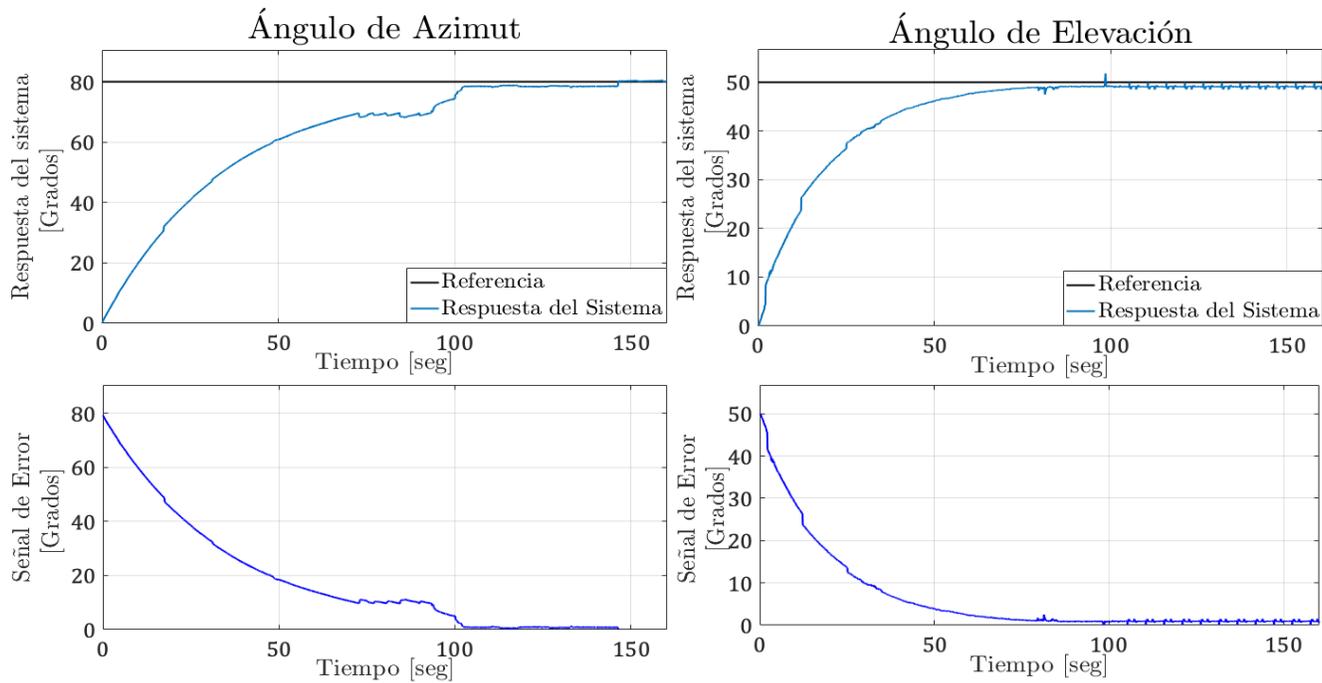


Fig. 10. Respuesta experimental del sistema mecánico en Lazo Cerrado.

son más cortos al seguir una trayectoria. De esta manera, el objetivo de controlador es disminuir esos tiempos de respuesta.

III-B. Pruebas de Desempeño del Sistema de Control.

El objetivo de aplicar un control al sistema es disminuir el tiempo de respuesta y eliminar el error que se presenta en el estado permanente. Es por ello, que se presenta la comparativa de respuesta en el sistema aplicando 3 tipos de controladores clásicos, como son: P, PI y PID.

En la Fig. 11 y la Fig. 12, se muestra el resultado del sistema controlado para los ángulos de azimut y elevación respectivamente. Siendo la línea negra la que indica el valor de referencia, la línea azul se refiere a la respuesta del sistema en lazo cerrado sin control, mientras que las líneas de color magenta, amarilla y rojo corresponden a los controladores P, PI y PID, respectivamente.

La Fig. 11a, muestra la respuesta del sistema del ángulo de azimut y de los tres controladores. La respuesta de los controles P, PI y PID se perciben como líneas rectas en comparación a la respuesta del sistema. Así también, estos cumplen con el objetivo de reducir el tiempo de respuesta donde las respuestas del control P y PI se perciben iguales y que reducen el tiempo de respuesta un 73 %, mientras que el control PID lo reduce un 78 %. En lo que respecta a elevación (ver Fig. 12a), las respuestas para el control P, PI y PID se consideran iguales que reducen en un 75 % el tiempo de respuesta del sistema. De este modo, se puede considerar que el PID presenta un mejor desempeño en un 5 % para azimut, mientras que en elevación no existe diferencia.

En la Fig. 11b y Fig. 12b, se contempla la transición del error de azimut y elevación, respectivamente. Se observa en ambas articulaciones que no se presenta error permanente. Finalmente, se analizan las señales de control ($u(t)$); para azimut la Fig. 11c, muestra una diferencia entre el control P y PI, donde la línea amarilla permanece más tiempo al máximo, aproximadamente 35s, mientras que la línea magenta permanece solo 23s, esta diferencia se percibe en la curva del error de ambas señales donde se aprecia como la línea amarilla converge antes a cero. La respuesta del control PID se presenta con la línea roja, que como se observa al inicio presenta un tiempo de respuesta similar a los otros dos controles y a los 10s muestra un relativamente pequeño brinco que permite al sistema responder con mayor velocidad y menor tiempo de respuesta, siendo este de 35s. Para el caso del movimiento de elevación, del comparativo de los resultados de los controladores podemos decir que no hay diferencia considerable como se observa en la Fig. 12c, la cual muestra al control P con una señal de control con una transición más prolongada y un amortiguamiento suave al final, en comparación con el PI y el PID, mientras que para estos, se percibe un cambio drástico en la señal de control mostrando oscilación a partir de los 23s aproximadamente.

III-C. Pruebas de Desempeño del Sistema de Antena Terrena Satelital en Banda UHF

Como ya se mencionó en la Sección II.C, el sistema de antena es de tipo *turnstile*, diseñado para operar óptimamente a 433 MHz, que es una frecuencia utilizada para enlaces downlink de telemetría en satélites pequeños, donde es deseable que en la recepción se tenga de polarización circular. La antena tiene una ganancia máxima relativamente

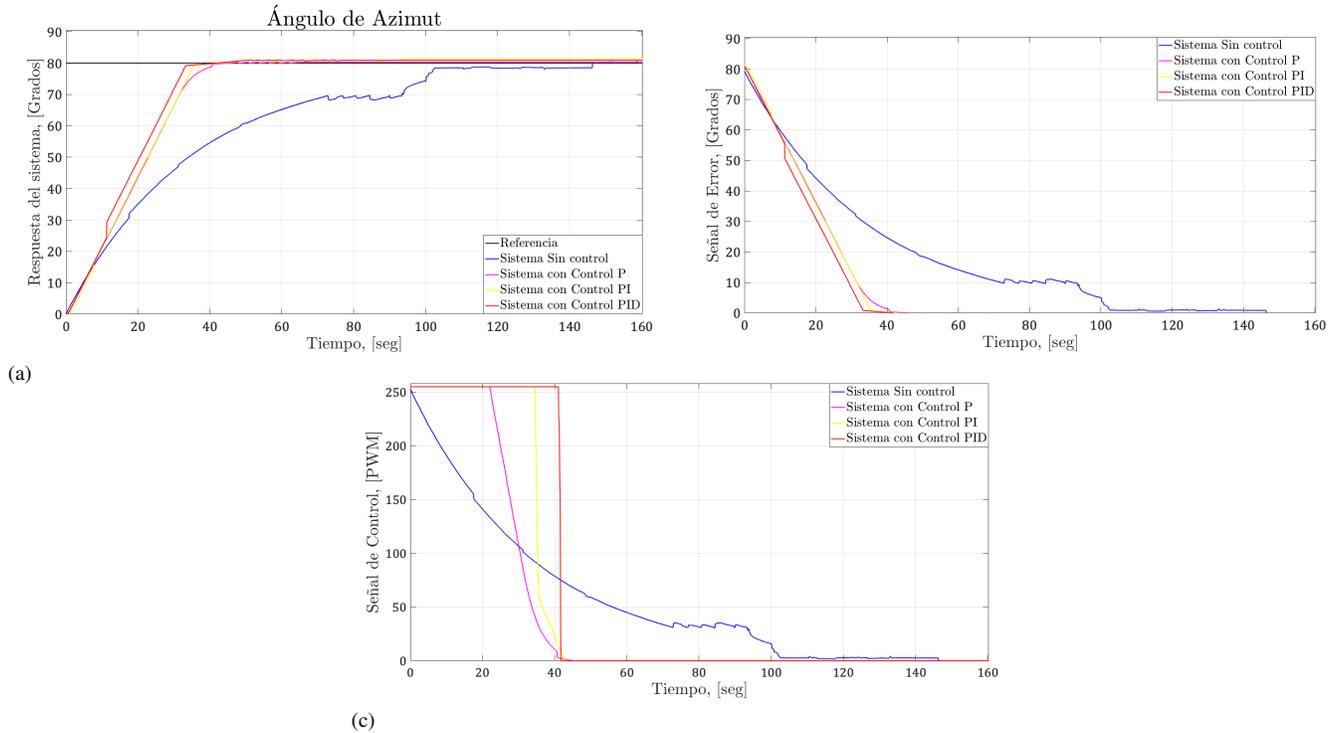


Fig. 11. Respuesta del control P, PI y PID para Azimut.

aceptable para la aplicación, la cual ronda los 5.27 dBi, valor que se obtuvo mediante simulación utilizando el software libre 4NEC2. La Fig. 13, muestra el patrón de radiación de ganancia total simulado en el plano XY, donde se observa la estructura de dipolos cruzados sobrepuesta. El valor de ganancia total máximo obtenido es relativamente aceptable, ya que típicamente antenas Yagi lineales de 3 elementos (que son con las que se podría comparar) poseen ganancias de alrededor de 6.4 dBi [23]. En lo que respecta su parámetro S (coeficiente de reflexión), éste fue medido en el laboratorio, mostrando un valor aceptable a 433 MHz de -12.92 dB, lo que implica relativamente bajas pérdidas por reflexión y la hace una antena idónea para recepción satelital terrena en UHF. La Fig. 14, muestra la gráfica del parámetro S_{11} (coeficiente de reflexión) en dB de la antena medido mediante un analizador de microondas portátil.

Para complementar el análisis de la antena propuesta, también se midieron utilizando el mismo analizador de microondas portátil otros 2 parámetros de interés como lo son el VSWR (voltage standing wave ratio), que nos muestra el impacto de las ondas estacionarias formadas por el inevitable desacoplamiento de impedancia y la carta de Smith que nos muestra la impedancia compleja (resistencia y reactancia de la antena). Ambos parámetros fueron obtenidos a la frecuencia de interés para downlink de señales de telemetría satelital que es 433 MHz. La Fig. 15 y la Fig. 16 muestran el VSWR y la Carta de Smith respectivamente, donde se puede observar que el VSWR es de 1.533 y la impedancia es de $73,48 - j10,49\Omega$, valores que son relativamente aceptables en termino prácticos. Así mismo, se se puede observar que la antena tiene una

parte real de $73,48\Omega$ y una parte reactiva de $-j10,49\Omega$ que representa un comportamiento capacitivo de $35,03pF$.

En lo que respecta a la polarización de la antena que en este caso es circular y de la cual fue explicada su obtención en la sección II.C, también fue verificada mediante simulación en el software libre 4NEC2, obteniéndose una razón axial ≈ 1 , es decir 0 dB que corresponde a polarización circular. Finalmente, es importante resumir que el análisis de la antena en lo que a S_{11} , VWSR e impedancia se refiere, fue llevado a cabo de manera experimental, mientras que el análisis de patrón de radiación se llevo a cabo mediante simulación por no contarse con una cámara anecoica y por tratarse de una propuesta de bajo costo, ya que los costos por uso de una cámara anecoica son relativamente altos.

III-D. Pruebas del Sistema de Recepción LoRa

La antena se orientó en ángulo de elevación y de azimut utilizando el sistema mecánico y de control diseñado (estación terrena) con el fin de conectarse a satélites pertenecientes a la red *TinyGs* a través del sistema de recepción LoRa. Mediante la página web de *TinyGs* y considerando la ubicación del sistema de recepción se conocen las coordenadas de orientación y la hora en que el satélite pasará, esto permite bajar paquetes de telemetría. La Fig. 17, muestra una captura de pantalla de la consola del sistema de recepción donde se pueden observar los paquetes descargados, mientras que la Fig. 18, muestra el despliegue de satélites próximos a pasar y su correspondientes coordenadas de elevación y azimut para conectarse con ellos. De la Fig. 19, se puede observar un

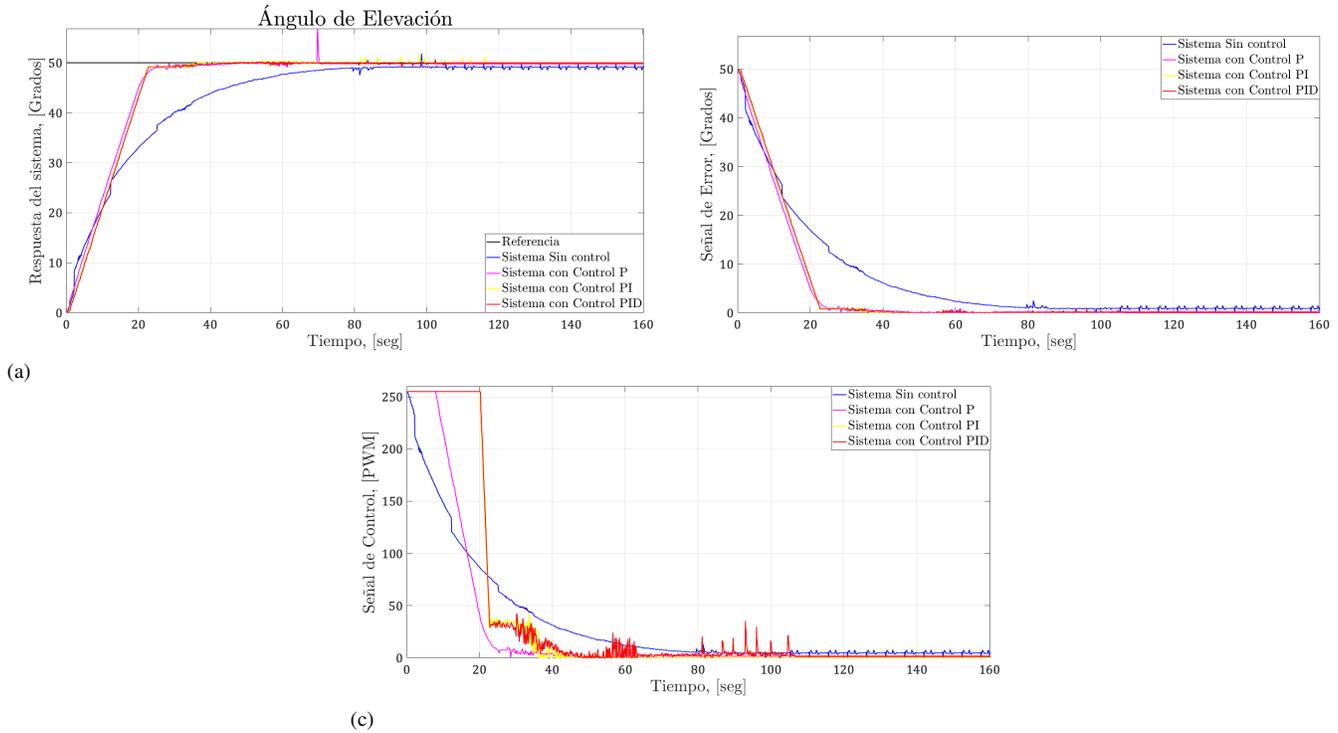


Fig. 12. Respuesta del control P, PI y PID para Elevación.

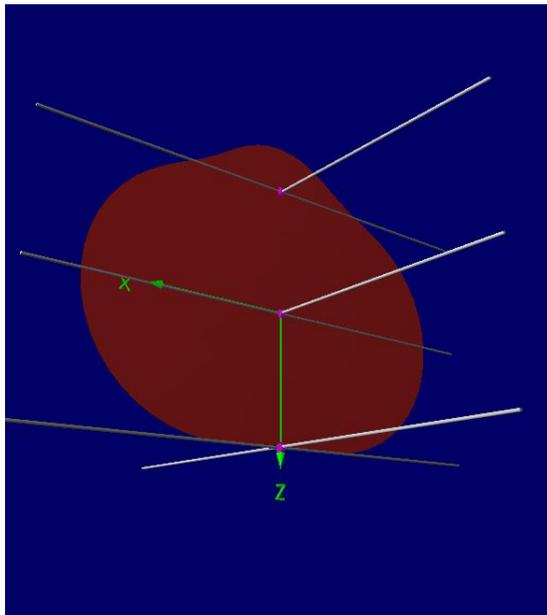


Fig. 13. Simulación de patrón de radiación de ganancia total en el plano XY a 433 MHz.

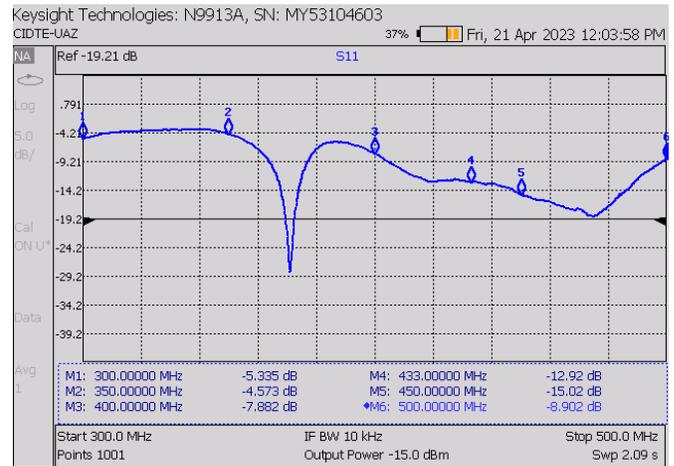


Fig. 14. Parámetro S_{11} medido en dB de la antena *turnstile* a 433 MHz.

IV. CONCLUSIONES

El presente trabajo contempla el diseño e implementación de una estación terrena IoT para fines didácticos o de radioafición. La propuesta contempla el diseño mecánico y el sistema de control, así como el sistema de antena y el sistema de recepción LoRa que se conecta con una red de satélites LEO de los cuales se pueden descargar paquetes de telemetría. La intención de este desarrollo es contar con infraestructura propia de bajo costo en materia de estaciones terrenas que permita disminuir la brecha de dependencia tecnológica, ya que este tipo de sistemas son relativamente costosos. Este proyecto multidisciplinario donde

mapa con la ubicación de la estación terrena en México y la ubicación que los satélites tuvieron cuando estaban orbitando cerca y disponibles para conexión. Las imágenes de la Fig. 17, Fig. 18 y Fig. 19 fueron obtenidas de internet, lo que hace a la estación terrena IoT (Internet of Things).

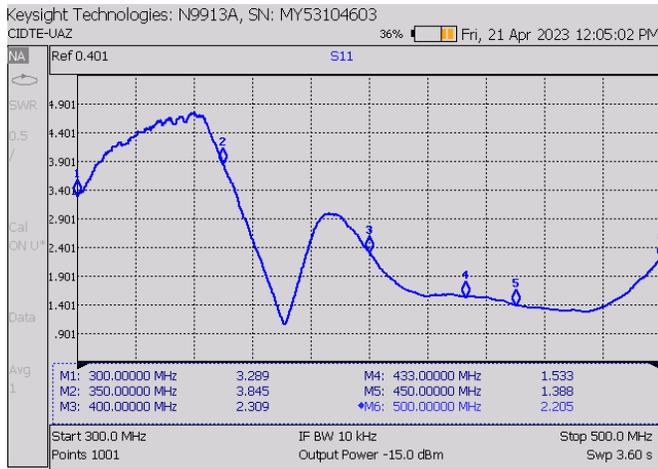


Fig. 15. Parámetro $VSWR$ medido sin unidades de la antena *turnstile* a 433 MHz.

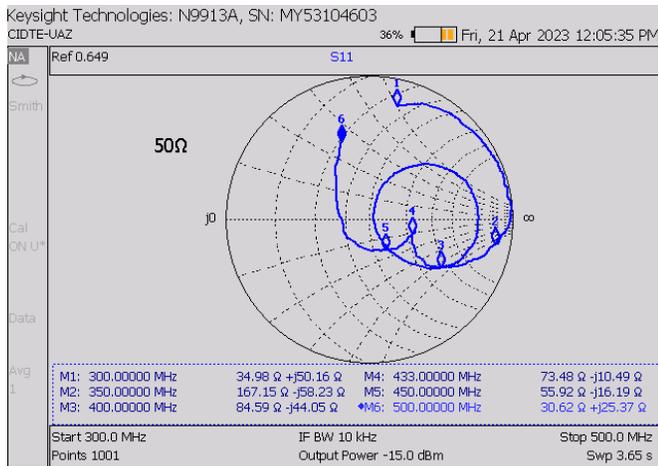


Fig. 16. Carta de Smith medida de la antena *turnstile* a 433 MHz.

se ven implicados especialistas en diseño mecánico, control, telecomunicaciones y antenas, fue diseñado e implementado con éxito, permitiendo la recepción de señales de telemetría satelitales eficientemente. La estación terrena cuenta con un sistema de recepción IoT conectado a internet, lo que permite saber las coordenadas de los satélites próximos a estar disponibles para conexión, así como llevar a cabo monitoreo de las conexiones con satélites y de los paquetes de telemetría descargados. Es importante destacar que en este trabajo se diseñó una antena de bajo costo de polarización circular en banda UHF, que en conjunto con el sistema de control para direccionamiento, garantizan bajas pérdidas en la recepción, especialmente aquellas por desajuste de polarización, ya que algunos satélites no cuenta con control de actitud y la polarización lineal de la antena transmisora de telemetría en el segmento espacial puede estar variando, lo que orilla a tener antena de polarización circular en la recepción terrestre. En lo referente al sistema de control implementado, se puede concluir que el control PID mostró un mejor comportamiento en ambas articulaciones, esto en comparación con los otros controles analizados.

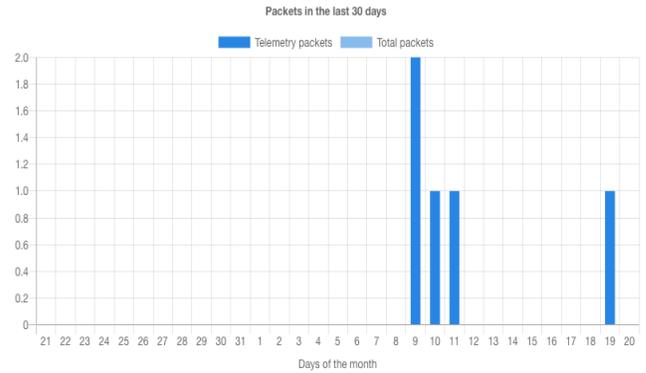


Fig. 17. Consola del sistema de recepción LoRa que muestra los paquetes recibidos.

Ground station					
Position					
Name	Latitude	Longitude			
Ground station	22.16°	-100.91°			
Passes					
Name	Countdown	Start	End	EI	Az
GaoFen-19	00:01:02:38	19.06 18:37:04	18:49:39	35°	74.89°
GaoFen-19	00:02:39:58	19.06 20:14:24	20:24:44	12°	264.47°
ThingSat	00:03:39:42	19.06 21:14:08	21:20:58	5°	70.35°
Gossamer	00:04:32:59	19.06 22:00:00	22:19:05	47°	77.80°

Fig. 18. Satélites con los cuales se conecta el sistema de recepción LoRa y sus correspondientes coordenadas de elevación y azimut.

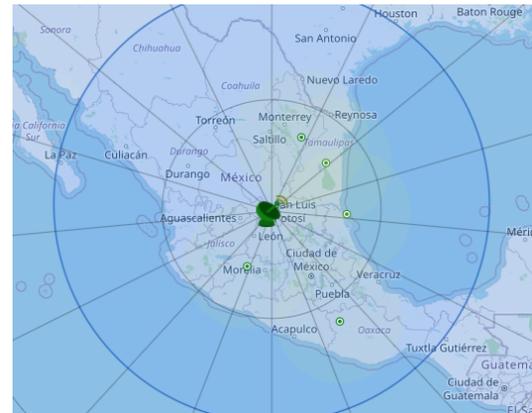


Fig. 19. Mapa de México con la ubicación que tuvieron los satélites con los cuales se ha establecido conexión y de los que se han descargado paquetes de telemetría.

La estación terrena implementada que es fácil de replicar, es considerada de bajo costo, ya que sin contar ni la infraestructura utilizada ni el capital humano, el costo de los materiales fue de poco menos de 2000 dólares estadounidenses, es decir una diferencia de más de 2 órdenes de magnitud en precio comparando con los costos de estaciones terrenas comerciales.

Finalmente, podemos decir que este trabajo presenta un enfoque global para la construcción de una estación terrena, incluyendo el diseño del sistema mecánico, el sistema de control, la recepción LoRa IoT y el sistema de antena, que comparándolo con la literatura, donde solo se enfocan en resolver una sola sección de la estación terrena, este es más integral. Sin embargo, nuestro sistema de control presenta una desventaja, ya que no cuenta con la compensación del efecto Doppler, al solo estar utilizando un control clásico. Esto da pauta para tener trabajos a futuro por desarrollar.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado tanto por el Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías, (CONAHCYT), del Gobierno Federal de México a través del programa de Investigadoras e Investigadores por México mediante el Proyecto 3066, como por la Universidad Autónoma de Zacatecas Francisco García Salinas a través de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica. Así mismo se agradece al Centro Regional de Desarrollo Espacial en el Estado de Zacatecas (CREDES) de la Agencia Espacial Mexicana (AEM) y a la Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y la Tecnología (CIACYT) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) por las facilidades otorgadas en el uso de su infraestructura de medición de radiofrecuencia y microondas de alto desempeño.

REFERENCIAS

- [1] W. Lan, "Cubesat design specification rev. 13 the cubesat program, cal poly slo cubesat design specification (cds) rev 13 document classification x public domain itar controlled internal only," 2005.
- [2] CalPoly, "6u cubesat design specification rev. 1.0 the cubesat program, cal poly slo 6u cubesat design specification revision 1.0 (cp-6ucds-1.0) document classification x public domain 6u cubesat design specification rev. 1.0 the cubesat program, cal poly slo chang," 2005.
- [3] UCS, "Ucs satellite database," 1 2023.
- [4] H. Ali, A. Ali, M. R. Mughal, L. Reyneri, C. Sansoe, and J. Praks, "Modular design of rf front end for a nanosatellite communication subsystem tile using low-cost commercial components," *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2019, 2019.
- [5] R. N. Vela and S. L. Ayala, *Comunicaciones por satélites*. Thompson, 1 ed., 2015.
- [6] IsisGS, "Isis ground station," 2023.
- [7] M. Elfvelin, "Design and development of the space campus ground station for small satellites." url<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1646645/FULLTEXT01.pdf>, 2022.
- [8] J. Orduy-Rodríguez, I. Rodríguez-Barón, and C. Cubillos-Chaparro, "Diseño de una estación terrena sdr para satélites de órbita baja," *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 19, no. 2, pp. 41–49, 2019.
- [9] J. E. E. Díaz and A. A. R. Hernández, "Methodology to implement a satellite ground university station," *2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, vol. 2015, 2015.
- [10] M. Y. Öztürk and Çağatay Yavuzylmaz, "On-board orientation control of a steerable antenna for ground station tracking on leo satellites," *2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST)*, vol. 2023, 2023.
- [11] M. Fischer and A. L. Scholtz, "Design of a multi-mission satellite ground station for education and research," *2010 Second International Conference on Advances in Satellite and Space Communications*, vol. 2010, 2010.
- [12] TinyGS, "Tinys," 2023.
- [13] J. E. y. M. L. Espinoza Díaz, *Implementación de estación terrena para seguimiento a picosatélites de órbita LEO*. Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2012.

- [14] J. L. García García, *Diseño de una estación terrena y propuesta de sistema de telemetría y comando alterno para un satélite de órbita baja*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- [15] Orbitron, "Orbitron-satellite tracking system," 2023.
- [16] R. S. Burns, *Advanced Control Engineering*. Butterworth-Heinemann, 1 ed., 2001.
- [17] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*. Wiley, 7 ed., 2010.
- [18] A. Modenini and B. Ripani, "A tutorial on the tracking, telemetry, and command (tt&c) for space missions," pp. 1–30, 2022.
- [19] alijca.space, "How to build a turnstile antenna," 2023.
- [20] X. L. Shan, Yihe and S. Li, "Design and simulation of satellite attitude control algorithm based on pid," *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 1–8, 2022.
- [21] LILYGO, "Lilygo ttgo lora32 433 mhz v1.6.1," 2023.
- [22] ESP32, "Esp32," 2023.
- [23] KN9B, "Kn9b yagi antenna calculator," 2023.



Juvenal Villanueva-Maldonado nació en la Ciudad de México, México. Ingeniero Mecánico Electricista (Área Eléctrica Electrónica) de la Facultad de Estudios Superiores Aragón. Obtuvo el grado de Maestro y Doctor en Ingeniería Eléctrica (Disciplina en Control) en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Actualmente es Investigador del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) comisionado a la Universidad Autónoma de Zacatecas Francisco García Salinas, (UAZ). Sus intereses de investigación son la robótica móvil, control y automatización de procesos, planificación de trayectorias, modelado de sistemas dinámicos y diseño electrónico para aplicaciones de instrumentación espacial, biomédicas e internet de las cosas. Actualmente es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) del CONAHCYT nivel I. E-mail: juvenal.villanueva@uaz.edu.mx



alvarez.jose@ucon.mx

José Luis Alvarez-Flores obtuvo su grado de Maestría en Computación de la Universidad de Colima, México, en el año 2006 y el grado de Doctor en Ingeniería Aplicada por parte de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México. Desde el año de 2006 a la fecha, se ha venido desempeñando como profesor asistente en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad de Colima, impartiendo varias cátedras. Su área de interés son las radiofrecuencias y las antenas. Es miembro de SNI de CONAHCYT nivel C. E-mail:



Marco Cardenas-Juarez (SM'16) recibió el grado de Ingeniero Electrónico de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), México, en 2002, el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica (opción Telecomunicaciones) del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), campus Monterrey, México, en 2004, y el grado de Doctor en Ingeniería Electrónica y Eléctrica de la Universidad de Leeds, Reino Unido, en 2012. Desde 2003, ha sido profesor en diferentes universidades públicas y privadas de México.

En 2013, fue Investigador Postdoctoral Asociado del Laboratorio Franco-Mexicano de Informática y Automática del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), México. Desde 2014 es Profesor Asociado de la Facultad de Ciencias de la UASLP, donde es Jefe del Departamento de Tecnologías de la Información y Comunicaciones. Sus intereses de investigación incluyen el Internet de las Cosas, el procesamiento de señales y las aplicaciones de la inteligencia artificial para comunicaciones inalámbricas. Es miembro del SNI del CONAHCYT nivel I. E-mail: marco.cardenas@uaslp.mx



Jorge Flores-Troncoso es Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por la Universidad Autónoma de Zacatecas en 1992. Posteriormente, en 2000 y 2010 obtuvo su Maestría y Doctorado en Electrónica y Telecomunicaciones por el CICESE, respectivamente. Actualmente es Docente-Investigador de Tiempo Completo en la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas Francisco García Salinas, (UAZ). Sus principales intereses son las comunicaciones satelitales, comunicaciones inalámbricas, geolocalización

de recursos y diseño de comunicaciones digitales embebidas. Actualmente es miembro del SNI del CONAHCYT nivel I. E-mail: jflorest@uaz.edu.mx



Jorge Simon es Ingeniero Electrónico por la Facultad de Ciencias (2001), Maestro en Ingeniería Eléctrica por la Facultad de Ingeniería (2005) y Doctor en Ciencias Aplicadas por Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (2010) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Laboró como de asignatura de 2006 a 2010 y como profesor de tiempo completo de 2010 a 2014 para la Universidad Politécnica de San Luis Potosí. Actualmente es Investigador por México del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías

(CONAHCYT) comisionado a la Universidad Autónoma de Zacatecas. Sus áreas de interés son antenas, comunicaciones inalámbricas, comunicaciones espaciales, recolección de energía de RF, propagación de ondas electromagnéticas, sensores en microondas y el IoT. Actualmente es miembro del SNI del CONAHCYT nivel I. E-mail: jsimonro@conahcyt.mx