DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 12 No. Especial 4 (2024) 199-204

# Prototipo de satélite CanSat: Un enfoque interdisciplinario en educación STEM
# CanSat satellite prototype: An interdisciplinary approach in STEM education

R. León-Paredes [a], I. Sánchez-Cornejo [a] J. R. Cárdenas-Valdez [b] A. Calvillo-Téllez [c,*]

[a] *Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, 07738, CDMX, México*
[b] *Academia de Biomédica, Tecnológico Nacional de México Tijuana, 22435, Tijuana, Baja California, México.*
[c] *Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital, Instituto Politécnico Nacional, 22435, Tijuana, Baja California, México.*

**Resumen**

Se aborda la solución a una problemática, auxiliada por la educación interdisciplinaria de establecer las comunicaciones de un satélite con una estación terrena, se requiere de habilidades tanto duras como blandas. Estas habilidades permiten brindar soluciones enmarcadas en la ciencia espacial y la ingeniería de comunicaciones, apoyadas por la tecnología de sistemas embebidos. Logrando dar certidumbre al enlace satelital, mediante la estimando matemáticamente la viabilidad de la cobertura de comunicaciones. El análisis de la educación interdisciplinaria integra conocimientos obtenidos de la práctica para resolver problemas complejos, tales como las comunicaciones satelitales. Se evaluaron las tecnologías LoRa y ZigBee 1 para la comunicación de un CanSat, un prototipo de satélite en miniatura utilizado en misiones científicas y tecnológicas. En el campo de la ciencia y la ingeniería aeroespacial. Como resultado, LoRa (Long Range) logra un mayor rango de transmisión en comparación con ZigBee 1, siendo ideal para aplicaciones que requieren comunicación a larga distancia, mientras que ZigBee es adecuado para distancias cortas en entornos interiores.

*Palabras Clave:* STEM, CanSat, LoRa, ZigBee 1.

**Abstract**

The solution to a problem is addressed, aided by interdisciplinary education, to establish communications between a satellite and an earth station; both hard and soft skills are required. These skills allow us to provide solutions framed in space science and communications engineering, supported by embedded systems technology. Managing to provide certainty to the satellite link, by mathematically estimating the viability of communications coverage. The analysis of interdisciplinary education integrates knowledge obtained from practice to solve complex problems, such as satellite communications. LoRa and ZigBee 1 technologies were evaluated for the communication of a CanSat, a miniature satellite prototype used in scientific and technological missions. In the field of aerospace science and engineering. As a result, LoRa (Long Range) achieves a greater transmission range compared to ZigBee 1, making it ideal for applications that require long-distance communication, while ZigBee 1 is suitable for short distances in indoor environments.

*Keywords:* STEM, CanSat, LoRa, ZigBee 1.

## 1. Introducción

El proyecto CanSat se centra en el desarrollo de un prototipo de bajo costo de un satélite en miniatura, con las mismas problemáticas y retos de uno a escala mayor, pero igualmente con el objetivo de proporcionar una experiencia educativa interdisciplinaria en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) (Contente, 2022), (Buitrago, 2019). Con este enfoque hoy día se presentan nuevos retos a los que hay que plantear soluciones (Arruabarrena, 2020). Estas plataformas educativas permiten formar nuevos cuadros a la vez induce a los estudiantes a aplicar conceptos teóricos en un contexto práctico y real, fortaleciendo sus competencias educativas que desafían y retan su saber técnico (Sánchez, 2019). Desarrollar un picosatélite bajo los estándares CanSat ofrece un acceso recurrente y relativamente económico al espacio (Vázquez, 2024), (Chun, 2023). Estos picosatélites, que generalmente pesan menos de 1/2 kilo, realizan funciones semejantes a los de mayor tamaño a los satélites tradicionales donde las comunicaciones siguen siendo objeto de estudio

*Autor para la correspondencia: acalvillo@ipn.mx
**Correo electrónico**: rulix1999@gmail.com, (Raúl León-Paredes), irvyncornejo@gmail.com, (Irvyn Sanchez-Cornejo), jose.cardenas@tectijuana.edu.mx. (José Ricardo Cárdenas-Valdez) acalvillo@ipn.mx, (Andrés Calvillo-Téllez).

**Historial del manuscrito:** recibido el 30/06/2024, última versión-revisada recibida el 09/10/2024, aceptado el 07/10/2024, publicado el 30/11/2024. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial4.13347

debido a sus limitaciones de potencia, consumo de energía y alcance de la señal, condición que atrae la atención en la comunidad científica y académica (Curzi,2020), (Colin, 2017). Los picosatélites permiten la experimentación espacial a nivel global, democratizando el acceso al espacio, al conocimiento y el buen empleo de la tecnología (Briseño, 2022). La tendencia de lanzamiento de estos satélites está creciendo exponencialmente, facilitando el conocimiento y realizando investigación científica a través de plataformas educativas probadas por prototipos de bajo costo (Çabuloğlu, 2011).

Estos proyectos sirven para desarrolla y poner a prueba los conocimientos y las habilidades blandas y duras como base tecnológica para abordar el diseño y desarrollo de futuros satélites de mayores características y aplicaciones, con mayores capacidades para monitoreo satelital y experimentos científicos complejos (Cadena, 2024), (Bonilla, 2017). El mercado emergente de los picosatélites considera una diversidad de tecnologías para los subsistemas de comunicaciones satélites, entre otros LoRa y ZigBee 1 (Guaman, 2024), (Aden, 2019), (Beltrán, 2023), (Faber, 2020), (Rodríguez, 2017).

Estos proyectos deben cubrir especificaciones en términos de espacio y peso, con pruebas previas de funcionalidad y de que el CanSat esté listo previo a su lanzamiento (Buitrago, 2019).

La visión de estas pruebas es de tener cualidades en integración de la tecnología, en un prototipado que valide los saberes necesarios en la disciplina de la industria aeroespacial, potenciando así la próxima fase de un ensamble de un prototipo de mayores exigencias, en la carrera.

Es un sistema compacto y eficiente para experimentos en misiones cortas, simulando un satélite real a pequeña escala.

- En la Figura 1 se muestran los componentes de un satélite CanSat como lo son:
- Carga útil: Es el equipo o experimento que se quiere probar o llevar a cabo durante el vuelo. Puede ser un sensor, una cámara o cualquier otro dispositivo.
- Los Sensores, que recogen datos del entorno, como, posición en tres ejes, aceleración, temperatura, presión, etc., para enviarlos a la computadora de vuelo.
- GPS, ayuda a rastrear la geoposición y trayectoria del CanSat durante el vuelo.
- Módulo de comunicaciones, envía los datos recolectados por los sensores a la estación de control en tierra. Computadora de vuelo, es el cerebro del CanSat, donde se procesan los datos y se controlan las operaciones de los sensores y comunicaciones.
- Estructura o fuselaje, es el cuerpo que protege y da forma al CanSat. Puede estar hecho de materiales ligeros como aluminio o plástico.
- Interruptor, enciende o apaga el sistema del CanSat antes del lanzamiento.

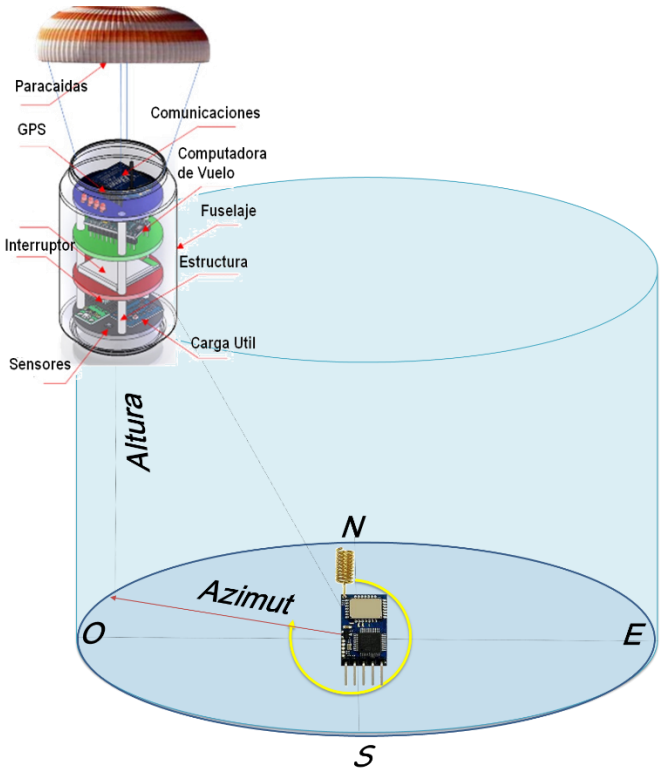


Figura 1: Cobertura Radioenlace LoRa.

## 2. Desarrollo

La elección de la tecnología de comunicación empleada en el CanSat depende en gran medida de las especificaciones de la misión. Si la misión requiere comunicación de largo alcance con bajo consumo de energía, LoRa sería la opción más adecuada (Dunford, 2022), (Haxhibeqiri, 2018). Para misiones que necesitan una alta tasa de transmisión de datos en distancias cortas, Bluetooth 1.0 o Wi-Fi IEEE802.11g es la más apropiada, ZigBee 1 sería ideal para configuraciones de corto alcance con bajo consumo de energía (Ali, 2019). Evaluar cuidadosamente los requisitos y las características de cada tecnología te permitirá tomar la mejor decisión para tu CanSat (Shilpa, 2021).

La elección de la tecnología de comunicación apropiada para el CanSat es fundamental para el éxito de la misión. Para ello se debe evaluar las opciones disponibles y elegir una tecnología sobre otra, considerando ZigBee 1, LoRa, Bluetooth 1.0 y Wi-Fi IEEE802.11g.

Definición de los Requisitos de la Misión:

- Determinar la distancia máxima entre el CanSat y la estación en tierra.
- Evaluar la cantidad de datos que se necesitan transmitir y la velocidad requerida.
- Considerar la energía disponible y el consumo de cada tecnología.
- Evaluar el entorno de operación para posibles interferencias y compatibilidad de frecuencias.

*2.1. Características más importantes de las Tecnologías:*

ZigBee 1:

- Distancia: Alcance de hasta 100 metros en entornos abiertos.
- Tasa de Transmisión: Aproximadamente 250 kbps.
- Consumo de Energía: Bajo consumo de energía, adecuado para aplicaciones de baja potencia.
- Interferencias: Puede ser sensible a interferencias en entornos densamente poblados.

LoRa:

- Distancia: Alcance de hasta 15 km en entornos rurales y 5 km en áreas urbanas.
- Tasa de Transmisión: 0.3 kbps a 50 kbps.
- Consumo de Energía: Muy bajo consumo de energía, ideal para aplicaciones de larga duración.
- Interferencias: Buena resistencia a interferencias, opera en bandas ISM (Industrial, Scientific, and Medical).

Bluetooth 1.0:

- • Distancia: Alcance de hasta 100 metros (Bluetooth 5.0).
- • Tasa de Transmisión: Hasta 2 Mbps.
- • Consumo de Energía: Bajo consumo de energía, especialmente en modo Bluetooth Low Energy (BLE).
- • Interferencias: Susceptible a interferencias de otros dispositivos Bluetooth 1.0 y Wi-Fi IEEE802.11g.

Wi-Fi IEEE802.11g:

- Distancia: Alcance de hasta 100 metros en entornos abiertos.
- Tasa de Transmisión: Hasta 22 Mbps (IEEE802.11g) o más.
- Consumo de Energía: Alto consumo de energía.
- Interferencias: Alta susceptibilidad a interferencias en entornos densamente poblados.

*2.2. Elección de los parámetros de las Tecnologías:*

La elección de una tecnología sobre otra, lo define la misión. Donde cada tecnología posee características particulares que al conocerlas se puede decidir por la más apropiada.

En la ingeniería de sistemas espaciales, la selección de la tecnología de comunicación para un CanSat es un paso crucial que influye en el éxito de la misión. Dependiendo de las necesidades específicas de la misión, se tienen diferentes tecnologías de comunicación como LoRa, ZigBee 1, Bluetooth 1.0 y Wi-Fi IEEE802.11g las cuales son evaluadas para determinar su idoneidad. La idoneidad requiere de la definición de los parámetros de la misión. La elección de la tecnología de comunicación se define el rango o alcance de Comunicación, para determinar la distancia máxima entre el CanSat y la estación terrena (Maldonado, 2017). La tasa de transmisión de datos, que requiere la carga útil para transmitir. Así como el entorno operacional como topografía y clima, para evaluar el desempeño del CanSat e identificar posibles interferencias y la compatibilidad de frecuencias.

En la Tabla 1 se presentan las características más importantes de cada tecnología.

Tabla 1: Tecnologías de comunicaciones, ventajas y desventajas.

| Tecnología | Ventajas | Desventajas: |
|---|---|---|
| Bluetooth 1.0 | Bajo consumo de energía, Alta tasa de transmisión de datos en distancias cortas | Alcance limitado, Sensible a interferencias |
| Wi-Fi IEEE802.11g | Alta tasa de transmisión de datos, | Alto consumo de energía, Sensible a interferencias. |
| ZigBee 1 | Bajo consumo de energía Adecuado para distancias cortas sensible a interferencias | Limitado alcance sensible a interferencias |
| LoRa | Largo alcance Bajo consumo de energia Inmune a interferencias. | Baja tasa de transmisión de datos Mayor latencia |

El factor más importante de las telecomunicaciones del CanSat es estimar los parámetros relevantes en el cálculo del presupuesto de comunicaciones. El alcance de la cobertura, la elección de la tecnología de comunicación empleada en el CanSat depende en gran medida de las especificaciones de la misión. Si la misión requiere comunicación de largo alcance con bajo consumo de energía, LoRa sería la opción más adecuada.

Para calcular el nivel de recepción de la señal de comunicaciones, podemos utilizar la pérdida por propagación en el espacio libre (PPEL). La fórmula 1 del PPEL es:

$$PPEL_{(dB)} = 20logd_{(m)} + 20logf_{(Hz)} + 20log\left(\frac{4\pi}{c}\right), \quad (1)$$

donde: $d$ es la distancia entre el transmisor y el receptor (en metros), $f$ la frecuencia de la señal (en Hz) y $c$ la velocidad de la luz (aproximadamente 3 × 1 0 8 m/s).

$$PPEL_{(dB)} = 20logd_{(km)} + 20logf_{(MHz)} + 32.4dB, \quad (2)$$

donde $d$ es la distancia entre el transmisor y el receptor (en km) y $f$ la frecuencia de la señal (en Mega Hertz).

$$MD_{(dB)} = 30log d_{(km)} + 20log\left(6ABf_{(GHz)}\right) - 10log(1-R) - 70_{(dB)}, \quad (3)$$

donde $MD$ es el margen de desvanecimiento por clima y topografía, $d$ la distancia entre las antenas (en km), $f$ la frecuencia de operación, $R$ la confiabilidad (con *(1-R)* nominal 0.999998), $A$ el factor topográfico (1 propagación en zona plana, 0.5 terreno promedio y 0.25 terreno montañoso), $B$ el factor climático establecido en las peores condiciones meteorológicas hasta buen clima (clima despejado 25°C, 1 buenas condiciones todo el año, 0.5 zonas cálidas y húmedas, 0.25 zonas montañosas y secas).

Tabla 2: parámetros de Tecnologías de comunicaciones.

| Tecnología | Frecuencia | Alcance | Tx Potencia | Sensibilidad |
|---|---|---|---|---|
| Bluetooth 1.0 | 2.4GHz | 10 m | 2.5 mW | -90 dBm |
| Wi-Fi IEEE802.11g | 2.4GHz | 50 m | 80 mW | -85 dBm |
| 3G | 2.1GHz | 5 km | 5000 mW | -100 dBm |
| ZigBee 1 | 2.1GHz | 5 km | 20 mW | -100 dBm |
| LoRa | 915MHz | 2-5 km<br>5-15 km<br>> 15 km | 20 mW | -130 dBm |

Tabla 3: Factores de Propagación para LoRa.

| Tecnología | Perdidas por propagación en el espacio libre | Margen de cobertura | Nivel de Recepción de la señal |
|---|---|---|---|
| Bluetooth 1.0 | 60.05 dB | 63.93 dB | -26.07 dB |
| Wi-Fi IEEE802.11g | 74.03 dB | 60.01 dB | -24.99 dB |
| 3G | 112.87 dB | 54.12 dB | -45.88 dBm |
| ZigBee 1 | 114.03 dB | 28.98 dB | -71.02 dBm |
| LoRa | 105.65 dB | 54.12dB | -45.88 dBm |

$$P_{Rx(dBm)} = P_{Tx(dBm)} + G_{Tx(dB)} + G_{Rx(dB)} - PPEL_{(dB)} - MD_{(dB),} \quad (4)$$

donde $\boldsymbol{P_{Rx}}$es la potencia incidente en el receptor, $\boldsymbol{P_{Tx}}$ la potencia transmitida, $\boldsymbol{G_{Tx}}$ la ganancia antena transmisor nominalmente 3dB, $\boldsymbol{G_{Rx}}$ la ganancia antena receptor nominalmente 3dB, $\boldsymbol{PPEL}$ las pérdidas debidas al canal de propagación, ya sea calculadas a través de una amplia gama de canales modelos o de datos empíricos y $MD$ el margen de desvanecimiento, nuevamente calculado o a partir de datos empíricos (Semtech, 2015).

$$M_{(dB)} = P_{Rx(dBm)} - S_{Rx(dBm)}, \quad (5)$$

donde $M$ es el margen de operación, $\boldsymbol{P_{Rx}}$ la potencia incidente en el receptor y $\boldsymbol{S_{Rx}}$ la sensibilidad del receptor.

Tabla 4: Factores de dispersión, ancho de banda y tasa de transmisión para LoRa.

| Factor de dispersión | Ancho de banda | Tasa de transmisión (kbits/s) |
|---|---|---|
| 7 | 125 | 5.5 |
| 7 | 250 | 10.9 |
| 7 | 500 | 21.9 |

Tabla 5: Tecnología de comunicación, alcance y potencia.

| Factor de Dispersión | Sensibilidad del receptor para ancho de banda fijado en 125 kHz |
|---|---|
| SF7 | -123 dBm |
| SF8 | -126 dBm |
| SF9 | -129 dBm |
| SF10 | -132 dBm |
| SF11 | -134.5 dBm |
| SF12 | -137 dBm |

## 3. Resultados

La elección de la tecnología obedeció a un factor importante, la misión requería de una comunicación de un kilómetro, y una teletransmisión a tasa baja, para los parámetros de la carga útil de los sensores. Por lo que los cálculos que resultaron de la cobertura de radioenlace LoRa se muestran en la Tabla 6.

La Figura 2 muestra los datos de telemetría, del censor de aceleramiento, así como el de posición en tres dimensiones, X, Y y Z.

La Figura 3 Representa la estación terrena, con la interfaz visual que muestra los parámetros adquiridos de la carga útil, los cuales corresponden a la misión establecida previa al diseño, junto al CanSat, en la rutina de prueba de todos los sistemas que constituyen al satélite.

Estos datos son esenciales para verificar el cumplimiento de los objetivos de la misión y asegurar la integridad y funcionalidad de los sistemas a bordo.

En la rutina de pruebas, el CanSat es sometido a una serie de evaluaciones exhaustivas para asegurar que todos sus subsistemas funcionen correctamente antes del lanzamiento. Estas pruebas incluyen: Verificación de Sensores: Asegurando que los sensores de temperatura, presión, humedad, acelerómetros y giroscopios operen dentro de los parámetros esperados. Pruebas de Comunicación: Evaluando la capacidad del sistema de comunicación para transmitir datos de manera efectiva a la estación terrena. Pruebas de Energía: Confirmando que el subsistema de alimentación pueda suministrar energía de manera estable a todos los componentes durante la duración de la misión. Pruebas de Integridad Estructural: Garantizando que la estructura del CanSat pueda soportar las condiciones de lanzamiento y operación.

Tabla 6: Presupuesto del Radioenlace LoRa.

| Región | América |
|---|---|
| Banda de frecuencia | 902-928 MHz |
| Canales | 64 + 8 + 8 |
| Canal BW subida | 125/500 kHz |
| Canal BW bajada | 500 kHz |
| Potencia de TX subida | +20 dBm nominal (+30 dBm Norma) |
| Potencia TX bajada | +27 dBm |
| SF subida | 7-10 |
| Tasa de Tx | 980 bps – 21.9 kbps |
| Presupuesto enlace ascendente | 154 dB |
| Presupuesto enlace descendente | 157 dB |
| Perdidas por propagación en el espacio libre a 1 km y frecuencia de 915 MHz | 91.66dB |
| Potencia de Recepción | 65.66dBm |
| Margen | 88.34dB |

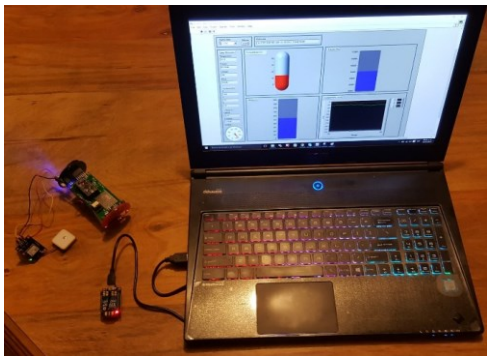

Figura 2: Prueba de funcionalidad y telemetría entre CanSat y la Estación terrena con desplegado de datos de la carga útil en la interfaz visual.

## 4. Conclusiones

La elección de la tecnología de comunicación para un CanSat depende de los requisitos específicos de la misión. Si la misión requiere comunicación de largo alcance con bajo consumo de energía, LoRa sería la opción más adecuada. Para misiones que necesitan una alta tasa de transmisión de datos en distancias cortas, Bluetooth 1.0 o Wi-Fi IEEE802.11g podrían ser más apropiados. ZigBee 1 sería ideal para configuraciones de red de malla de corto alcance con bajo consumo de energía. Evaluar cuidadosamente los requisitos y las características de cada tecnología permite tomar la mejor decisión para tu CanSat.

Figura 3: Lanzamiento de Satélites CanSat con Hexacoptero de la UABC.

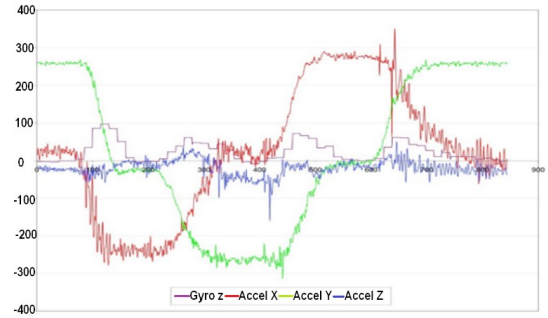


Figura 4: Telemetría espacial en los ejes x, Y y Z, recuperada por la Cobertura Radioenlace LoRa.

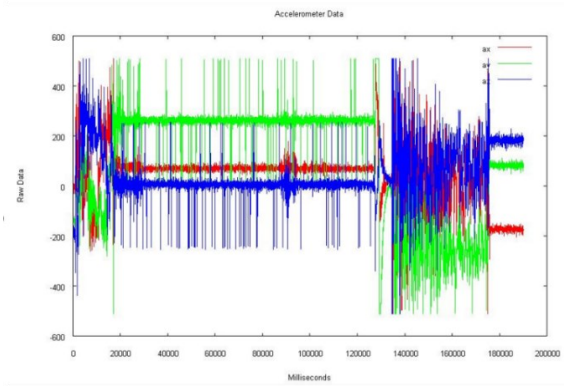


Figura 5: Telemetría de aceleración recuperada por la Cobertura Radioenlace LoRa.

La modulación LoRa (Long Range) desarrollada por Semtech resulta ser es una alternativa robusta en cuanto a comunicaciones de satélites CanSat, sobre todo cuando no hay obstáculos y se presenta una claridad de línea de vista entre la estación terrena y el CanSat, resulta apropiada en el establecimiento de telemetría y comunicaciones realizadas con dispositivos de bajo costo y bajo consumo de energía. Se considera que lo relevante de LoRa en comparación con ZigBee resulta ser su modulación de espectro extendido, debido a que se logra una cobertura mayor a ZigBee 1. Puede cubrir distancias de varios kilómetros en condiciones ideales, lo que lo hace esencial en comunicaciones satélites con telemetría de baja tasa de transmisión.

Mientras que ZigBee 1 tiene un alcance limitado, resulta conveniente si aumenta la tasa de datos y si la cobertura es corta.

La modulación LoRa al emplear la técnica de expansión de espectro mediante señales de chirrido, permite una mayor inmunidad al ruido y una mejor capacidad condiciones climáticas y topográficas severas. Aunque ZigBee 1 también emplea la técnica de espectro ensanchado, pierde efectividad en condiciones adversas, debido a su sensibilidad, se cae la comunicación.

La estación terrena, junto con su interfaz visual, es una herramienta vital para la gestión y supervisión de las misiones CanSat. Las rutinas de prueba detalladas aseguran que todos los sistemas del satélite funcionen correctamente, minimizando el riesgo de fallos durante la misión real. Esta preparación meticulosa y la capacidad de monitoreo en tiempo real son fundamentales para el éxito de las misiones educativas y de investigación en el ámbito aeroespacial.

En la implementación de sistemas de comunicación para CanSat, la evaluación e idoneidad de las tecnologías de comunicación la comunicación operando en la tecnología LoRa, para el rango máximo, resulta ser la solución óptima

para comunicaciones de largo alcance y manteniendo un bajo consumo de energía y robustez en entornos severos de condiciones climáticas y topográficas. Una evaluación exhaustiva del presupuesto de enlace es, por lo tanto, es la piedra angular sobre la cual se construye la efectividad del sistema de comunicación en cualquier misión de CanSat.

Finalmente podemos concluir que si en la comunicación se emplea Wi-Fi IEEE802.11g es importante destacar que, al utilizar una antena directiva con una ganancia de 34 dBi en la estación terrena, se incrementa notablemente la cobertura del enlace de comunicaciones. Esto permite mejorar de manera significativa tanto el alcance como la tasa de transmisión de datos, lo cual es especialmente relevante para aplicaciones de carga útil que involucren cámaras espectrográficas o sistemas de alta demanda de ancho de banda.

Este aumento en la eficiencia del enlace implica, además, la necesidad de recalcular la capacidad de la batería del satélite para asegurar que pueda soportar la mayor carga energética asociada a la transmisión de datos en experimentos de esta naturaleza.

## Agradecimientos

Agradecimientos a la SIP, PIFI, COFAA.

## Referencias

Aden Hassan, A., & Karlsson Källqvist, R. (2019). Evaluating LoRa physical as a radio link technology for use in a remote-controlled electric switch system for a network bridge radio-node.

Ali, A. I., Partal, S. Z., Kepke, S., & Partal, H. P. (2019, June). ZigBee and LoRa based wireless sensors for smart environment and IoT applications. In 2019 1st global power, Energy and Communication Conference (GPECOM) (pp. 19-23). IEEE.

Arruabarrena, M., Báez, L., Fernández, A., Lammers, M., Marengo, E., Medel, R., ... & Vicente, A. (2020). Minisatélite cansat aplicado al aprendizaje basado en problemas en diversos contextos educativos. Online]. Disponible en: https://www. researchgate. net/profile/Marcos-Requena-Arellano/publication/344359099_MINISATELITE_CANSAT_APLICADO_AL_APRENDIZAJE_BASADO_EN_PROBLEMAS_EN_DIVERSOS_CONTEXTOS_EDUCATIVOS/links/5f6be03c458515b7cf496bd6/MINISATELITE-CANSAT-APLICADO-AL-APRENDIZAJE.

Beltrán Florido, Á. (2023). Exploración del canal de radio inalámbrico a través de la tecnología LoRa.

Briceño Mero, C. M., & Flores Suarez, C. R. (2022). Diseño e implementación de un prototipo nanosatélite tipo CANSAT con posicionamiento GPS para experimentos en caída libre (Bachelor's thesis).

Buitrago, P., Briñez, R. C., Tejada, J. C., Marmolejo, P., & Jaramillo, O. A. (2019). Diseño de un CanSat para medición de variables ambientales. Publicaciones e Investigación, 13(2), 31-40.

Çabuloğlu, C., Aykiş, H., Yapacak, R., Çalişkan, E., Ağirbaş, Ö., Abur, Ş & Çelebı, M. (2011, June). Mission Analysis and Planning of a CANSAT. In Proceedings of 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies-RAST2011 (pp. 794-799). IEEE.

Cadena, G. F. F., Morillo, P. A. L., Mena, D. A., Rojas, D. B., Loya, H. P. L., Guaman, S. S., & Izurieta, E. D. L. (2024). Diseño, Construcción y Pruebas de una Estación Terrena de Bajo Costo para CubeSat con Tecnología IoT-LoRa. Innovación y Software, 5(1), 6-19.

Chun, C., Tanveer, M. H., & Chakravarty, S. (2023). The CanSat Compendium: A Review of Scientific CanSats. Machines, 11(7), 675.

Colin, A. (2017). A pico-satellite assembled and tested during the 6th CanSat Leader Training Program. Journal of applied research and technology, 15(1), 83-91.

Contente, J., & Galvão, C. (2022). STEM education and problem-solving in space science: A case study with CanSat. Education Sciences, 12(4), 251.

Curzi, G., Modenini, D., & Tortora, P. (2020). Large constellations of small satellites: A survey of near future challenges and missions. Aerospace, 7(9), 133.

Davarian, F., Babuscia, A., Baker, J., Hodges, R., Landau, D., Lau, C. W., ... & Kuroda, V. (2020). Improving small satellite communications in deep space—a review of the existing systems and technologies with recommendations for improvement. part I: Direct to earth links and smallsat telecommunications equipment. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 35(7), 8-25.

Dunford Pabst, A. K. (2022). Development and testing of LoRa Technology for satellite communications.

Elchin, M. (2013). Long-range communication framework for autonomous UAVs. University of Ottawa (Canada).

Faber, M. J. (2020). Performance Evaluation of the LoRa Wide Area Network Technology.

Haxhibeqiri, J., De Poorter, E., Moerman, I., & Hoebeke, J. (2018). A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application. Sensors, 18(11), 3995.

Kamruzzaman, M. M. (2022). Key technologies, applications and trends of internet of things for energy-efficient 6G wireless communication in smart cities. Energies, 15(15), 5608.

Mahmoud, M. S., & Mohamad, A. A. (2016). A study of efficient power consumption wireless communication techniques/modules for internet of things (IoT) applications.

Maldonado, J. V., Flores, J. L. A., Juárez, M. C., Troncoso, J. F., & Rodríguez, J. S. (2023). An IoT Ground Station: Mechanics, Control, Antenna, and Reception from a LoRa Satellite Network. IEEE Latin America Transactions, 21(12), 1337-1347.

Rodríguez Munca, J. D. (2017). Dispositivo LoRa de comunicación a largo alcance y bajo consumo energético para aplicaciones del ámbito del desarrollo (Doctoral dissertation, CITDH).

Sánchez-Texis, F., Ibarra-Bonilla, M. N., & Reyes-Castillo, I (2019). Educational pico-satellite CanSat developed on an ARM-CortexM4 and FPGA platforms.

Semtech Corporation (2015) AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics

Shilpa, B., Radha, R., & Movva, P. (2021). Comparative analysis of wireless communication technologies for IoT applications. In Artificial Intelligence and Technologies: Select Proceedings of ICRTAC-AIT 2020 (pp. 383-394). Singapore: Springer Singapore.

Vázquez-Ortiz, R., Aboytes-Hernández, Á. I., & Ortíz-Olvera, A. A. (2024). Diseño y construcción de un satélite enlatado. Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, 12(Especial2), 34-39.