

# Análisis de desempeño en redes LoRa con enlace mixto terrestre-satelital

Elizondo Carolina<sup>1</sup>, Gregorio Fernando<sup>1</sup>[0000-0002-8601-6542], and  
Schmidt Christian<sup>1</sup>[0000-0002-0890-6398]

Instituto de Inv. en Ingeniería Eléctrica “Alfredo Desages” (IIIE), UNS-CONICET.  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras (DIEC),  
Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.  
{carolina.elizondo,fernando.gregorio,cschmidt}@uns.edu.ar

**Resumen** En este trabajo se evalúa el desempeño de un sistema IoT implementado con tecnología LoRa considerando un enlace mixto terrestre-satelital. La disponibilidad de un enlace adicional en redes con elevada densidad de nodos es aprovechada para reducir los niveles de interferencia entre los nodos. Se propone maximizar la confiabilidad del enlace para redes con enlace mixto terrestres-satelital (NTN) y se cuantifica el desempeño del sistema utilizando la probabilidad de éxito de la conexión, el consumo de energía y la tasa efectiva de transmisión.

**Palabras claves:** IoT · NTN · LoRa · Optimización.

## 1. Introducción

El mundo actual esta ampliamente conectado y los datos que se recavan de todos los dispositivos interconectados son cada vez de mayores volúmenes [1] requiriendo una mayor capacidad de procesamiento de los mismos. La tecnología IoT permite que esta red de dispositivos pueda estar interconectada y procesar datos hacia un servidor.

Para lograr una buena calidad de servicio tanto en zonas urbanas como remotas surge como una alternativa factible el uso de redes no terrestres (NTN - non terrestrial networks). Estas permitirán descongestionar las redes terrestres en zonas urbanas mediante un enlace adicional que permita reducir la interferencia entre nodos [2] y prestar servicio en zonas remotas [1]. En este trabajo se evaluarán las conexiones terrestres y aéreas por separado y en conjunto para poder maximizar la calidad de conexión y el desempeño de la descarga de datos.

## 2. Modelo de Sistema

El sistema bajo estudio considera una red de sensores LORA (ID) distribuidos uniformemente en una superficie circular de 6 km<sup>2</sup> de radio, que tienen capacidad de conectarse a un gateway instalado en tierra o de utilizar un satélite del tipo LEO [3,4,5]. Los nodos tienen la capacidad de ajustar la tasa de transmisión y

tiempo de aire variando el factor de spreading (SF) el cual define la sensibilidad del receptor.

Para la asociación del SF a cada nodo se considera la varianza del ruido del receptor y con dichos datos se calcula la SNR umbral en base a cada SF y teniendo en cuenta la atenuación total por la trayectoria queda definido un SF en base la distancia de cada ID al gateway.

En la Figura 1 se ilustra la distribución para  $N = 2000$  ID donde cada zona tiene un SF asociado. EL SF además determina la duración de la transmisión, es decir el tiempo en el aire ( $TOA$ ) dado por  $T = \frac{2^{SF}}{B} (8 + \max(5 \lfloor \frac{8L-4SF+24}{4SF} \rfloor, 0))$  donde  $B$  es el ancho de banda y  $L$  es el tamaño del mensaje en bytes.

En el caso de LORA, cuando mayor es el TOA, mayor es la capacidad de solapamiento temporal entre los nodos. En el caso que dos nodos se solapen en tiempo, tengan el mismo SF y similar nivel de potencia (menor a 6dB), se genera una colisión requiriendo una retransmisión del dato.

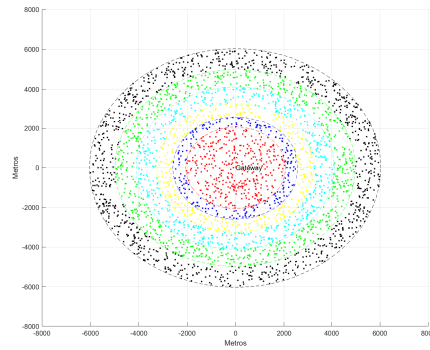


Figura 1: Distribución de usuarios con distintos factores de spreading

### 3. Optimización para maximizar éxito del enlace.

El objetivo de la optimización es maximizar la probabilidad de éxito de la comunicación. Se tendrá en cuenta la comunicación tierra-tierra ( $ID-TG$ ), donde los ID utilizarán SFk,  $k \in \{7, \dots, 12\}$  y la comunicación tierra-espacio ( $ID-L$ ), donde los ID utilizarán SFv,  $v \in \{SF_{min}, \dots, 12\}$ , donde  $SF_{min} = \{7, 9, 11\}$ .

Se asume que dentro de cada grupo de nodos con SFk,  $\eta_k$  se conectarán al satélite y el resto  $(1 - \eta_k)$  se conectarán al GW. El objetivo entonces consiste en encontrar el valor de  $\eta_k$  que maximice la probabilidad de éxito de la comunicación tanto en la conexión ID-TG como ID-L minimizando el numero de colisiones. La probabilidad de éxito dada por

$$P_{S_k} = [(1 - \eta_k)P_{S_k}^{TG} + \eta_k P_s^L] \quad (1)$$

donde  $P_{S_k}^{TG}(\eta_k) = e^{-(1-\eta_k)T_k\lambda|D_k|}$ ,  $|D_k|$  es el número de dispositivos que utilizan  $SF_k$ ,  $T_k$  es el TOA y  $\lambda$  es la velocidad a la que los ID generan datos. La

optimización se puede expresar como

$$\operatorname{argmax}_{\eta_k} P_{S_k}(\eta_k), \quad \text{sujeto a } \eta_k \in [0, 1] \quad (2)$$

El problema está sujeto a la optimización de  $P_S^L$ , expresada por:

$$P_S^L(\eta_k) = \operatorname{argmax}_{\alpha_v} \sum_{v=SF_{min}}^{12} (\alpha_v e^{-\alpha_v T_v \lambda |\Delta(\eta_k)|}) \quad (3)$$

$$\text{sujeto a } \sum_{v=SF_{min}}^{12} \alpha_v = 1, \alpha_v \in [0, 1]$$

Donde  $\alpha_v$  es la proporción de IDs con  $SF_v$ , y  $\Delta(\eta_k)$  denota la cantidad de IDs con  $SF_k$  que descargan información al LEO y la interferencia del resto de los nodos con distinto SF que también usan el enlace satelital.

**Medición de desempeño:** El consumo promedio para los IDs que utilizan el  $SF_k$  se expresa como  $\bar{E}_k = p \cdot t_k \cdot C_k \cdot D_k \cdot (1 + R_k)$  donde  $p$  es la potencia transmitida,  $t_k$  es el TOA del paquete usando el  $SF_k$ ,  $C_k = w/2^{SF_k}$  es la tasa de transmisión,  $w$  es el ancho de banda,  $D_k$  es la cantidad de nodos que utilizan el  $SF_k$ , y  $R_k$  es el número de retransmisiones (máximo 8 por paquete) definido como  $R_k = \sum_{r=1}^8 (1 - P_S(k))^r$ .

La tasa efectiva de transmisión [6],

$$EBR = \frac{BR}{R_k} \quad \text{con} \quad BR = SF_k \cdot \frac{BW}{2^{SF_k}} \cdot \frac{4}{4 + CR} \quad (4)$$

donde  $CR=4/5, 4/6, 4/7, 4/8$  es la tasa del código.

#### 4. Resultados de simulación

En esta sección se considera un escenario de simulación (realizado en Matlab) variando la densidad de nodos activos, considerando un gateway situado en tierra y un satélite del tipo LEO. Las figuras de desempeño bajo estudio son: la probabilidad de éxito de la conexión, el consumo de energía y la tasa efectiva de transmisión. La probabilidad de éxito del enlace y el consumo de energía se ilustran en la figura 2 y se observa que la utilización del satélite aumenta la calidad de la conexión particularmente cuando existe una mayor densidad de nodos y se considera  $SF_{min} = 7$ . En relación al consumo, el uso del satélite brinda los mejores resultados aunque no se aprecia dependencia con el  $SF_{min}$  elegido. La EBR se presenta en la figura 3 y en todos los casos el uso de la opción del satélite muestra resultados muy superiores.

#### 5. Conclusiones

Se analizó el desempeño de un sistema LORA considerando un enlace mixto terrestre-satelital. Se considero el consumo de energía y tasa efectiva de transmisión del sistema pudiendo cuantificar la eficiencia espectral del mismo. En un futuro, se pretende extender el trabajo para múltiples GW y satélites disponibles.

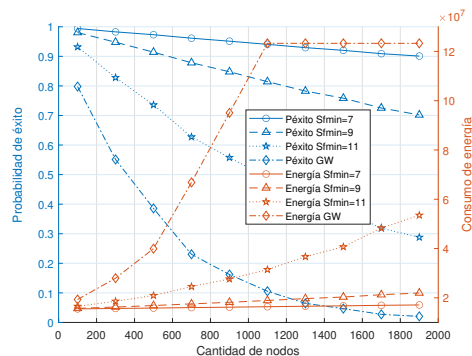


Figura 2: Probabilidad de éxito y consumo de energía.

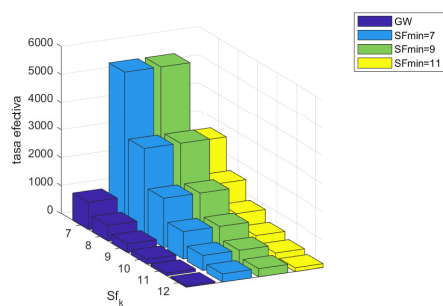


Figura 3: Tasa efectiva de transmisión.

## Referencias

1. Z. Qu, G. Zhang, H. Cao, and J. Xie, "LEO satellite constellation for internet of things," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18391–18401, 2017.
2. J. F. Schmidt, U. Schilcher, S. S. Borkotoky, and C. A. Schmidt, "Energy consumption in LoRa IoT: Benefits of adding relays to dense networks," in *2022 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pp. 1–6, 2022.
3. D. Wang, A. Traspadini, M. Giordani, M.-S. Alouini, and M. Zorzi, "On the performance of non-terrestrial networks to support the internet of things," in *2022 56th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, pp. 881–887, 2022.
4. N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp, and O. Hersent, "LoRaWAN Specification V1.0.2," standard, LoRa Alliance, 2016.
5. G. Colavolpe, T. Foggi, M. Ricciulli, Y. Zanettini, and J.-P. Mediano-Alameda, "Reception of LoRa signals from LEO satellites," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 55, no. 6, pp. 3587–3602, 2019.
6. M. Cattani, C. A. Boano, and K. Romer, "An experimental evaluation of the reliability of LoRa long-range low-power wireless communication," *MDPI Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 6, no. 2, 2017.