

Análisis de red descentralizada basada en modulación LoRa

Andrés Camilo Gonzalez¹, PhD Elvis Eduardo Gaona², MsC. Víctor Daniel Angulo²

¹, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

² Doctorado en Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

acgonzalezh@correo.udistrital.edu.co

egaona@udistrital.edu.co

vdangulom@udistrital.edu.co

Resumen: Una red inalámbrica de sensores (WSN) es un conjunto de nodos compuestos principalmente por un microcontrolador, un sensor y un dispositivo de comunicación, lo cual le permite medir variables físicas y transmitirlos hacia un punto central, esta tecnología se utiliza generalmente en grandes extensiones de terreno para monitoreo de cultivos entre otras aplicaciones, en algunos casos donde no se tiene acceso a Ethernet. En este trabajo se utiliza la modulación LoRa para establecer una red de sensores que permita al usuario obtener información de la red desde cualquier punto de esta. Teniendo en cuenta la distancia y confiabilidad en envío de paquetes.

Palabras Claves: Modulación LoRa, WSN, LPWAN

Decentralized network analysis based on LoRa modulation

Abstract. Summary: A wireless sensor network (WSN) is a set of nodes composed mainly of a microcontroller, a sensor and a communication device, which allows you to measure physical variables and transmit them to a central point, this technology is used simultaneously in large land extensions for crop monitoring among other applications, in some cases where you do not have access to Ethernet. In this work, LoRa modulation is used to establish a sensor network that allows the user to obtain information from the network from anywhere in it. Taking into account the distance and reliability in package shipments.

Keywords: LoRa Modulation, WSN, LPWAN

1 Introduction

Una red de sensores inalámbricos (WSN) es una red inalámbrica que consiste de dispositivos autónomos distribuidos espacialmente que usan sensores para monitorear cooperativamente el entorno físico o ambiental, condiciones tales como temperatura, sonido, vibración, presión, movimiento o contaminantes, en diferentes lugares. Hay muchas aplicaciones potenciales para WSN [1]. Podrían ser utilizados en aplicaciones comerciales e industriales. Aplicaciones para monitorear datos que serían difíciles o costosos de monitorear usando sensores cableados. Ellos podrían ser utilizados para monitorear situaciones en algunos entornos peligrosos, como en plantas de energía nuclear, como también en áreas silvestres, donde permanecerían en funcionamiento durante muchos años (monitoreo algunas variables ambientales) sin la necesidad de recargar / reemplazar sus fuentes de alimentación entre otras aplicaciones, entre las principales características de una red de sensores se encuentran:

- Baja transmisión de datos
- Bajo Consumo de energía
- Escalabilidad

Los nodos sensores son unidades pequeñas conformadas por microcontroladores, módulo de comunicaciones, módulo de energía, sensores y en algunos casos poseen actuadores para interactuar con el entorno, este nodo tiene como principal función recolectar y enviar los datos recolectados hacia otro punto. Estos nodos pueden estar equipados con diferentes sensores para medir diferentes variables físicas entre las cuales encontramos temperatura, humedad, presión entre otras, como también incluir actuadores para interactuar con el medio ya sea para generar alertas o activar mecanismos [2].

Para abarcar grandes extensiones de terreno se utilizan redes de baja potencia conocidas como LPWAN (Low Power Wide Area Network) que son orientadas a ocupar largas distancias operando en bandas libres ISM, son bandas de radio reservadas internacionalmente para el uso de energía de radiofrecuencia (RF) para fines industriales, científicos y médicos distintos de las telecomunicaciones, generalmente usan modulación de espectro expandido con la posibilidad de conectarse a largas distancia alcanzando los kilómetros en algunos casos.

La tecnología LPWAN está creada para máquina a máquina (M2M) e internet de las cosas (IoT), las LPWAN funcionan a un costo menor con una mayor eficiencia energética que las redes móviles tradicionales. También son capaces de soportar un mayor número de dispositivos conectados en un área más grande, LPWAN no es una tecnología única, sino un grupo de varias tecnologías de red de área amplia de baja potencia que toman muchas formas y formas [3] Las LPWAN generalmente se usan para obtener datos en grandes áreas y entregarlos a un punto central donde un usuario puede ver y

procesar para obtener la información deseada [4], una de las LPWAN más utilizado en todo el mundo es LoRaWAN y SigFox.

La modulación LoRa (Long Range) desarrollada por Semtech basada en modulación de espectro expandido y diseñado para tener coberturas hasta 40 km en entornos rurales libres de interferencias y hasta 10 km en entornos urbanos usada para la comunicación LoRaWAN que es una de las representantes de la tecnología LPWAN.

Este artículo se desarrolló un LPWAN basado en modulación LoRa, en la primera sección se muestran algunos proyectos que usaron LPWAN y sus diversas aplicaciones, en la segunda sección se hablara sobre la modulación LoRa y sus características, luego los dispositivos que se utilizaron para crear los nodos y el proceso a seguir para el establecimiento de la red que permite al usuario obtener datos desde un punto cualquiera de la red basada en una red en estrella.

2 Trabajos Relacionados

Las redes WAN de baja potencia conocidas como LPWAN son la mejor base para que las aplicaciones M2M e Internet of Things (IoT) desarrollen todo su potencial. Actualmente, ambos entornos tienen limitaciones debido a la inversión necesaria, así como a cuestiones relacionadas con la distancia de la fuente de energía. Las redes LPWAN parecen resolver estos problemas al ofrecer un bajo consumo de energía, un costo reducido y un largo alcance, estas redes hacen posible que miles de sensores recopilen y envíen datos a menor costo, mayor alcance y con una mejor duración de la batería. Otras opciones de conectividad entre sus aplicaciones encontramos:

Siendo LoRa una de las alternativas implementadas para una LPWAN en Brasil en 2017, se implementó una red de módulos de largo alcance (LoRa) para el monitoreo de la navegación [5]. El sistema tenía una baja tasa de pérdida de paquetes por debajo del 6% y un largo alcance. de más de 2 km en áreas planas, pero está influenciado por obstáculos como edificios altos y árboles, lo que lleva a una alta tasa de pérdida de paquetes de más del 34% en aquellas áreas con muchos obstáculos demostrando así que LoRa tiene buen desempeño en para el cubrimiento de áreas.

En la Universidad del Distrito, los módulos LoRa se utilizan para la comunicación entre nodos que generan una red de sensores en dos ríos para monitorear el agua tibia (EC, pH, TDS, T) [6], entre los problemas que surgen debido al acoplamiento de impedancia, también como la necesidad de antenas de alta potencia para cubrir la tierra a gran distancia

3 LoRa

LoRaWAN define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema de la red, mientras que la capa física LoRa® permite cancelar el enlace de comunicación a

largo plazo. El protocolo y la arquitectura de la red tienen la mayor influencia en la determinación de la vida útil de la batería de un nodo, la capacidad de la red, la calidad del servicio, seguridad y la variedad de aplicaciones en toda la red. [7]

LoRa es la capa física utilizada para crear enlaces de comunicaciones a larga distancia. Muchos sistemas usan modulación FSK porque es muy eficiente para baja potencia. LoRa utiliza CSS, que es una modulación que mantiene las mismas características de FSK de baja potencia, pero aumenta el rango de distancia de comunicación. Otras características de la modulación LoRa se muestran en la tabla 1.

Muchas redes desplegadas existentes utilizan una arquitectura de red en malla. En una red de malla, al final de los nodos individuales se transmitirá la información de otros nodos para aumentar el tamaño del rango de comunicación y la celda de la red. Sí, bueno, esto aumenta el alcance, pero también agrega complejidad, reduce la capacidad de la red y la duración de la batería de los nodos.

En una red en estrella es la forma más común de topología de red para nodos de punto final con restricción de potencia y es relativamente simple de implementar. Normalmente, un coordinador central o concentrador actúa como el conducto para todo el tráfico de red. Todas las transmisiones de red se enrutan a través del coordinador central.

Una topología de red en estrella ayuda a minimizar la cantidad de tráfico de red. Para una red que no está limitada por enlaces, solo 3 dispositivos y dos enlaces están involucrados en cualquier comunicación entre dos nodos. En los nodos de adición están aislados unos de otros y proporcionan facilidad para reemplazar los nodos. Centralización permite la inspección de todo el tráfico de red en un solo punto.

Una desventaja de esta topología es que la falla del coordinador deshabilitará todas las comunicaciones de red

Modulación	BW	Max Rate Bits	Comunicación	Longitud de Trama	Rango
LoRa	125 Khz	50 Kbps	Half-Duplex	12 bytes (UL)	15 Km Urban
FSK	250 Khz			8 bytes (DL)	40 Km Rural

Table 1.Descripción general de las tecnologías LPWAN: LoRa [10]

La modulación LoRa proporciona alternativas para la comunicación de espectro expandido que son de baja potencia y bajo costo en comparación con la técnica convencional de espectro expandido. La modulación LoRa utiliza la señal chirp, que es una señal con una frecuencia que varía con el tiempo [6] [8]. Al utilizar este método, se reducirá la complejidad para el lado del receptor. La señal de salida de esta modulación coincide con el ancho de banda utilizado por la señal chirp.

3.1 Características

Una modulación LoRa típica proporciona cinco parámetros de configuración: potencia de transmisión (TP), frecuencia portadora (CF), Factor de dispersión (SF), ancho de

banda (BW) y tasa de codificación (CR). Consumo de energía, rango de transmisión y resistencia al ruido está determinado por la selección de estos parámetros como se muestra en la figura 1.

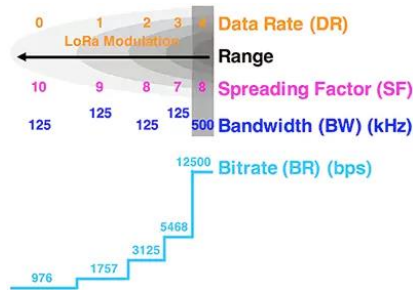


Fig. 1. Modulación LoRa en función de sus parámetros. (Fuente: Microchip Technology)

Símbolo: Como se discutió anteriormente, LoRa es una modulación de chirp de espectro extendido. Los datos transmitidos, que es un símbolo, estarán representados por una señal chirp con un rango de frecuencia de f_{min} a f_{max} . En la modulación LoRa, se puede configurar el símbolo cambiando los parámetros de Factor de dispersión(SF) y Ancho de banda. De acuerdo con [9], un símbolo tomará TS por segundo para transmitir como se muestra en la ecuación 1, que es una función del ancho de banda (BW) y el factor de dispersión (SF) se puede mostrar con:

$$T_s = 2^{SF} / BW \quad (1)$$

Factor de dispersión(SF): SF es la relación entre la velocidad de símbolo y la velocidad de chip. Un mayor factor de propagación aumenta la relación señal / ruido (SNR) y, por lo tanto, la sensibilidad y rango, pero también aumenta el tiempo de aire del paquete. El número de chips por símbolo se calcula como 2^{SF} . Por ejemplo, con un SF de 12 (SF12) se usan 4096 chips / símbolos.

Cada aumento en SF reduce a la mitad la velocidad de transmisión y, por lo tanto, duplica la duración de la transmisión y, en última instancia, el consumo de energía, el factor de dispersión se puede seleccionar de 6 a 12

Tasa de codificación(CR): La Tasa de codificación es la tasa de FEC utilizada por LoRa módem que ofrece protección contra explosiones de interferencia, y se puede configurar en 4/5, 4/6, 4/7 o 4/8. Un mayor CR Ofrece más protección, pero aumenta el tiempo en el aire.

Tiempo al aire: Una consecuencia importante del uso de un factor de dispersión más alto para LoRa es un mayor tiempo en el aire (ToA). El módulo LoRa Radio necesita más tiempo para enviar la misma cantidad de datos. Esto significa que el consumo de energía aumenta al aumentar el Factor de difusión.

Base en el espectro extendido LoRa la velocidad de bits nominal de las señales de datos como se muestra en la ecuación 2 y la velocidad de chip se puede definir como se muestra en la ecuación (3) [9]

$$R_b = SF * \left(\frac{\frac{4}{4+CR}}{\frac{2SF}{BW}} \right) \quad (2)$$

$$R_c = \frac{BW}{2^{SF}} * 2^{SF} = BW \text{ chips/sec} \quad (3)$$

4 Arquitectura de Red Basada En LoRa

En esta sección, se diseñó, implementamos y probó la red fuera de línea que puede en cualquier nodo obtener los datos de los nodos disponibles en la red, y en cualquiera de estos nodos un usuario puede obtener los datos de todos los nodos en En este caso, los datos serán el estado del nodo en la red.

4.1 Hardware Utilizado

Para la implementación de los nodos se utilizaron diferentes dispositivos y teniendo en cuenta que se utilizara solo para verificar la funcionalidad de la red, los nodos contaban con un microcontrolador, modo de comunicaciones y una batería. Como se muestran a continuación:

SX1272: Semtech SX1272 LoRa® Mbed Enabled Shield combina el transceptor de largo alcance de baja potencia Semtech SX1272 con la plataforma de dispositivos de Internet de las cosas (IoT) Armbid Mbed. El transceptor SX1272 montado en el escudo proporciona modulación LoRa de alto rendimiento, así como modulación FSK / OOK.

El SX1272 Shield mostrado en la figura 2 se controla a través del bus SPI a una velocidad máxima de 10 Mbps. También posee conexiones I2C y el UART, de modo que se pueden conectar una variedad de sensores al escudo, o permitir el control a larga distancia de ellos.

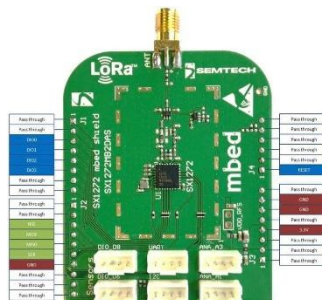


Fig. 2. Semtech SX1272 LoRa® Mbed Enabled Shield

Raspberry Pi Zero Wireless:

El Raspberry Pi Zero W que se muestra en la figura 3 extiende la familia Pi Zero. Lanzado a finales de febrero de 2017, el Pi Zero W tiene toda la funcionalidad del Pi Zero original, pero viene con conectividad adicional, que consiste en:

- LAN inalámbrica 802.11 b / g / n
- CPU de un solo núcleo de 1 GHz
- 512 MB de RAM
- Mini HDMI y Puerto USB On-The-Go
- Micro USB de alimentación
- Cabezal de 40 pines compatible con HAT
- Video compuesto y encabezados de reinicio
- Conector de cámara CSI



Fig. 3. Raspberry Pi Zero W

Para el acople del módulo SX1272 y el microcontrolador raspberry pi se requirió un puente de para el acople de estos, y controlado por medio de la librería arduPi, en la figura 4 se observa la implementación física del nodo con excepción de la fuente de poder.



Fig. 4. Nodo de red (SX1272+Raspberry pi + Puente)

4.2 Arquitectura de red

La figura 5 muestra esquemáticamente la red inalámbrica construida para los experimentos donde cada nodo posee los elementos descritos anteriormente, en el lado izquierdo de la imagen se muestra un estado de la red en la cual el nodo maestro (M) en el primer instante se encarga de establecer una comunicación con el primer nodo esclavo, posteriormente este regresa la información que tenga disponible para enviar al nodo maestro, cuando M recibe la información del primer nodo S termina esta comunicación y pasa a preguntar al siguiente nodo en la red.

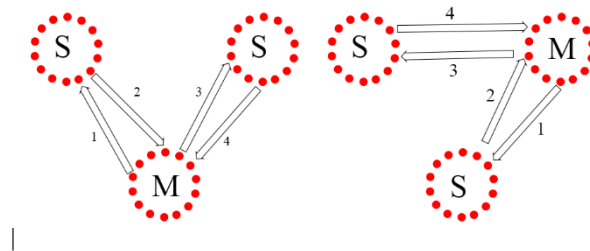


Fig. 5. Comunicación entre nodos para la red.

En el lado derecho de la imagen se observa un segundo estado cuando M recibe información de un nodo S que requiere el control de la red y este nuevo nodo M comienza a preguntar a los nodos que tenga en su registro sobre la información que dispongan.

En base a que la modulación LoRa está diseñada para enviar poca información a largas distancias se planteó esta forma ya que en caso de tener más nodos y que desde un punto de la red se quiere la información, pero no se tenga acceso a ethernet facilitaría obtener la información desde un punto.

4.3 Diseño e Implementación

Se propone que cada nodo de la red pueda ser un punto central que designe desde qué nodo desea solicitar la información mediante sondeo, pregunte a todos los nodos que se han establecido para los datos en ellos, y al final de la lista de nodos, después de que el nodo termine de sondear la red, pase el control de la red a otro nodo que esté disponible.

La topología de la red se basará en la comunicación M2M donde el nodo central se encargará de gestionar las comunicaciones de la red, generando así una red como se muestra en la figura 4, para hacer la red utilizamos el módulo SX1272, se realizó mediante un puente, que permite la conexión con raspberry pi zero, ya que el módulo SX1272 tiene conexiones I2C y SPI entre otros pines para comunicación no hay problema para conectar otros dispositivos.

Ya que la raspberry pi zero w trae incorporado un módulo lan inalámbrica se diseñó una interfaz gráfica basad en Django ya que es un framework libre, para operar y coordinar el funcionamiento de la red del cual se tiene acceso por medio de un Punto de acceso wifi creado por la raspberry, donde se podrá establecer el nodo maestro de esta y ver los datos proporcionados por los diversos nodos en la figura 5 se presenta la interfaz gráfica, donde se observa los nodos en la red y su estado, también posee un botón donde se puede definir que el nodo presente sea el punto central de la red.

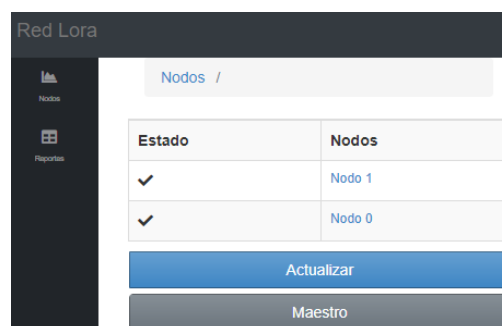


Fig. 6. Interfaz Grafica

Para establecer la comunicación entre los nodos por medio de la librería diseñada para el módulo SX1272 se estableció una frecuencia de portadora de 915 Mhz, un BW de 500 KHz, para lo comunicación al momento de que el nodo M realiza pregunta sobre disponibilidad de información espera recibir una confirmación por medio de un ACK que verifica la existencia del nodo, posteriormente el nodo S envía la información y el nodo maestro confirma el recibir la información por medio de un ACK, la información que se envió correspondía al esto del nodo siendo paquetes enviados, paquetes recibidos y tiempos de envío de los paquetes, el nodo M recibe esta información y lo guarda en un archivo correspondiente al nodo, el terreno en el que se ubicaron los nodos para las pruebas es un terreno rural.

Se plantearon dos tipos de experimentos en los cuales se diseñaron para ir rotando entre los dos de los tres nodos disponibles en la red de manera autónomo simulando la interacción de un usuario sobre los nodos, para el presente se realizaron variación sobre las distancias del entre los nodos, para lo cual se establecieron dos nodos fijos y uno variable como se ilustra en la figura 7-a sobre el terreno y en la figura 7-b las distancias aproximadas. En donde el nodo 1 y 2 se establecieron a una distancia de 100m verticalmente y para el nodo 3 se usaron dos ubicaciones una a 200 m aproximadamente de los nodos 1 y 2, una segunda posición 200 m después de este punto, con una distancia total de 400 m respecto a los nodos 1 y 2 y se realizó al cambio de nodo maestro entre los nodos 1 y 3 como también variaciones en SF entre 7 y 9.

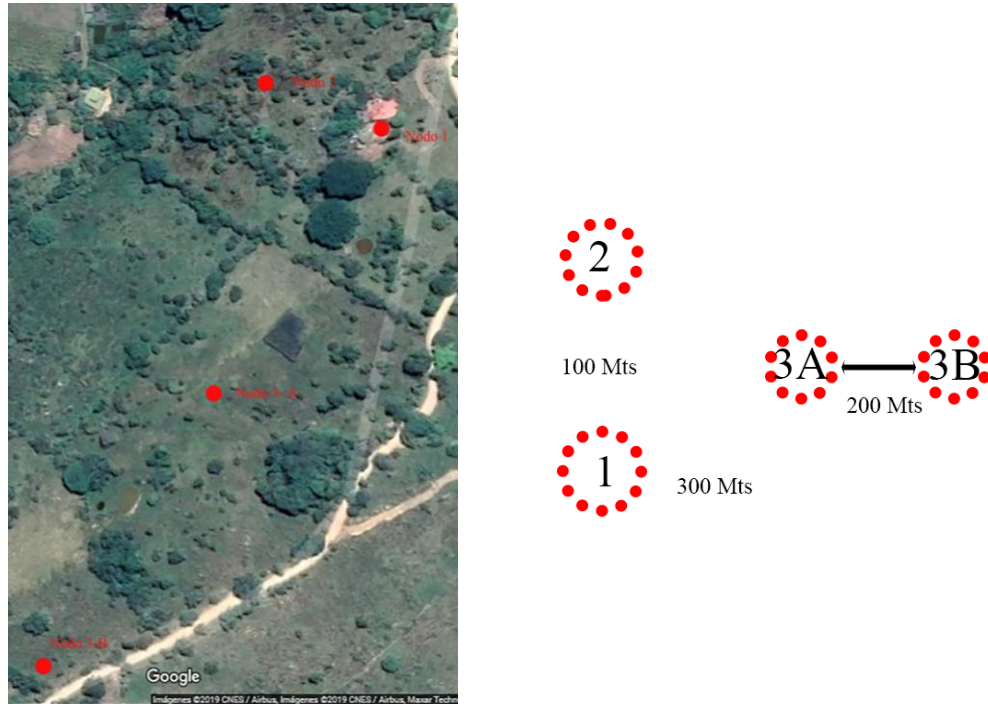


Fig. 7. A) Ubicación Geográfica B) Distancia aproximada entre nodos

4.4 Resultados

Para los resultados presentados se tuvieron se incluyeron los tiempos transmitidos, el tiempo para el envío de paquetes entre el nodo maestro y esclavo, y el tiempo empleado por el nodo maestro para recorrer los otros nodos todos los nodos de la red, se tomó la cantidad de paquetes como la cantidad de veces que un nodo maestro logro establecer comunicación con un nodo esclavo y la cantidad de paquetes perdidos cuando el nodo esclavo no retorna la información propia de nodo.

En las tablas 1 y 2 se presenta los datos obtenido con un SF de 7 y 9 donde se relacionan los tiempos y cantidad de paquetes manejados por los nodos, con una distancia el nodo 3 de 200 m, como se observa en las tablas 1 y 2 la comunicación entre los nodos 1 y 2 separados por 100 m no presentan problemas al momento de la transmisión de paquetes, y los tiempos de transmisión dese el momento que se establece la comunicación desde el nodo 1 hasta que finaliza con la comunicación con el nodo 2 permanece en un intervalo entre 2.132 segundos y 2.129 segundos sin presentarse perdida en los paquetes transmitidos.

	N1- N2		N1-N3		N3-N1		N3-N2	
SF	7	9	7	9	7	9	7	9

Distancia(M)	100		200		200		232	
Promedio Paquete (S)	2.121	2.132	2.350	2.352	2.355	2.352	2.352	2.355
Max Paquete (S)	2.209	2.209	2.355	2.357	2.359	2.356	2.357	2.360
Min Paquete (S)	2.092	2.092	2.348	2.348	2.347	2.348	2.348	2.347
Núm. paquetes	50	50	50	50	50	50	50	50
Núm. Paquetes Perdidos	0	0	1	2	3	2	2	3

Table 2. Resultados con distancia 1 (200 m)

	N1- N2		N1-N3		N3-N1		N3-N2	
SF	7	9	7	9	7	9	7	9
Distancia(M)	100		400		400		412	
Promedio Paquete (S)	2.132	2.129	2.341	2.390	2.495	2.494	2.497	2.489
Max Paquete (S)	2.211	2.209	2.401	2.404	2.497	2.499	2.508	2.496
Min Paquete (S)	2.101	2.092	2.487	2.348	2.484	2.480	2.488	2.486
Núm. paquetes	50	50	50	50	50	50	50	50
Núm. Paquetes Perdidos	0	0	2	4	3	4	1	3

Table 3. Resultados con distancia 2 (400 m)

Los tiempos para el envío de paquetes no presentan grandes variaciones al momento de generar cambios en el SF manteniendo una diferencia menor a 1 % en los tiempos, una situación similar ocurre con una distancia de 400 m donde no se presenta diferencia considerable donde no hay grandes diferencias de tiempos al realizar variación sobre SF, los tiempos que tomo el nodo maestro para recorrer los otros nodos de la red es de aproximadamente 4.49 segundos y 4.626 segundos, las variaciones en los tiempos para el envío de paquetes se ven afectados principalmente por árboles que se encuentran en el terreno, la pérdida de paquetes es menor a un 10 % de los paquetes enviados presentándose mayormente con la distancia del nodo 3 a 400 m, por la interferencia de los árboles y las altas temperaturas cercanas a los 30°C, que afecta el rendimiento general de los dispositivos.

5 Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se muestra el diseño y desarrollo de una red basada en modulación LoRa, en la cual es posible obtener datos desde cualquier punto de la red, donde el usuario los requiera, uno de las principales desventajas al implementar este tipo de red son los tiempos requeridos para recolectar la información, ya que esta aumentaría a mitad que se agregan nodos a la red.

Al implementar esta arquitectura facilitaría el acceso a la información de la red en caso de que esta se encuentre en puntos de difícil acceso y sin ethernet permitiendo tomar decisiones en base a información sin depender de un acceso a ethernet.

Por último, e plantearía a futura realizar la implementación completa de una red LoRaWAN buscando la forma de realizar la misma arquitectura de red basados en CSMA / CSMA-CA

References

1. J. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102–114, 2002.
2. Sohraby, Kazem, Daniel Minoli, and Taieb Znati. *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*. John Wiley & Sons, 2007. Author, F., Author, S., Author, T.: Book title. 2nd edn. Publisher, Location (1999).
3. Krupka, L., Vojtech, L., & Neruda, M. (2016, December). The issue of LPWAN technology coexistence in IoT environment. In 2016 17th International Conference on Mechatronics-Mechatronika (ME) (pp. 1-8). IEEE.
4. Pham, C., Ferrero, F., Diop, M., Lizzi, L., Dieng, O., & Thiaré, O. (2017, June). Low-cost antenna technology for LPWAN IoT in rural applications. In 2017 7th IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI) (pp. 121-126). IEEE.
5. Lingling Li, Jiuchun Ren, and Qian Zhu. On the application of lora lpwan technology in sailing monitoring system. In 2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), pages 77–80. IEEE, 2017.
6. Ordoñez, B., & Yamiith, C. (2017). Implementación de una Red de Sensores Inalámbricos LPWAN Mediante Módulos LoRa para el Monitoreo de la Calidad del Agua en 2 Ríos.
7. Lora Alliance. A technical overview of LoRa and LoRaWAN, tomado de <https://www.lora-alliance.org/portals/0/documents/whitepapers/lorawan101.pdf>. (November):1–20, 2015.
8. Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, and Fernand Meyer. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT express*, 5(1):1–7, 2019.
9. Smetch.: LoRa™ Modulation Basics, Application Note. (May):1–26, 2015
10. cooking-hacks., A.A. (2014). Extreme Range Links: LoRa 868 / 900MHz SX1272 LoRa module for Arduino Waspote and Raspberry Pi [Internet]. Retrieved from <https://www.cooking-hacks.com/documentation/tutorials/extreme-range-lora-sx1272-module-shield-arduino-raspberry-pi-intel-galileo>