

Journal of Engineering Research

Acceptance date: 31/01/2025

DISEÑO DE UN PROTOCOLO PARA UNA RED MESH MULTIVARIABLE BASADO EN SISTEMAS LORA

Fernando Ríos Cortés

TecNM Orizaba

Mario A. García Martínez

TecNM Orizaba

Víctor Hugo Pérez Concha

TecNM Orizaba

Fernando Vera Monterrosas

TecNM Orizaba

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: En este artículo se presenta el diseño de un protocolo optimizado para una red MESH multivariable basada en sistemas LoRa, orientada al monitoreo de parámetros eléctricos y factores químicos del agua extraída de pozos artesianos en tiempo real, con aplicaciones en infraestructuras críticas. El protocolo desarrollado gestiona eficientemente la transmisión de datos a través de una red MESH, donde cada nodo puede retransmitir la información de otros nodos, garantizando una cobertura extendida y robusta, incluso en entornos remotos o de difícil acceso. Se implementaron estrategias de enrutamiento dinámico y priorización de datos, lo que permite reducir la latencia y minimizar la pérdida de paquetes, mejorando la fiabilidad de la red frente a protocolos de comunicación estándar como Zigbee y Wi-Fi. El artículo describe el diseño del protocolo, la configuración de la red MESH y las pruebas de campo realizadas. Los resultados obtenidos demuestran que el protocolo propuesto es capaz de gestionar simultáneamente múltiples variables sin degradar significativamente la eficiencia de la red, alcanzando un balance óptimo entre bajo consumo de energía y largo alcance de transmisión, características esenciales en aplicaciones IoT.

Palabras-claves: Protocolo, LoRa, Mesh, Red multivariable.

INTRODUCCIÓN

La IoT ha revolucionado la forma en que interactuamos con el mundo que nos rodea, permitiendo la recopilación y transmisión de datos desde una variedad de sensores y dispositivos en tiempo real (Ashton, 2009). Una de las tecnologías que ha emergido como una solución viable para la conectividad de dispositivos IoT en redes de largo alcance es la topología MESH utilizando dispositivos LoRa (Augustin et al., 2016).

El diseño y desarrollo de una red de tipo MESH requirió de protocolos de comunicación inalámbrica diseñados específicamente para satisfacer las necesidades de un ambiente urbano con obstáculos de todo tipo, ofreciendo una combinación única de alcance extendido, bajo consumo de energía y capacidad de penetración en estructuras densas (Centenaro et al., 2016). Sin embargo, la eficacia de una red MESH depende en gran medida de la optimización de los protocolos de transferencia de información utilizados. Los retos de la administración de la energía, la capacidad de la red y la seguridad de los datos transmitidos requieren una atención especial en el diseño de estos protocolos (Adelantado et al., 2017).

Es precisamente en este contexto que se enfoca el presente artículo. El propósito de este trabajo es presentar el diseño del protocolo que se desarrolló para enfrentar los desafíos asociados con la transferencia de información en una red MESH. Nuestro enfoque se centra en optimizar la eficiencia, la confiabilidad y la seguridad de la comunicación en este entorno, con el objetivo de maximizar la utilidad de la IoT en diversas aplicaciones. A lo largo de este artículo, se detallarán los elementos clave de nuestro protocolo, desde la estructura de los mensajes hasta la gestión de la red y la seguridad de los datos.

METODOLOGÍA

En la figura 1 se muestra un diagrama conceptual del diseño e implantación del protocolo dentro de una red LoRa con características MESH. La red es parte de un sistema integral que permite el sensado, la transmisión de variables y la presentación de resultados en una aplicación WEB. Como puede observarse, el diseño está basado en tres niveles o jerarquías de nodos a nivel hardware-software, los cuales se describen a continuación:

A. Nodos primarios o de adquisición de datos: la cual está conformada por los sensores, y la primera capa de la red LoRa la cual está conformada por los nodos de transmisión primarios, los cuales recaban, procesan y normalizan dicha información a cierto nivel. En este nivel se establece el primer protocolo de comunicación, al cual llamaremos **Protocolo Base o Protocolo de Adquisición**.

B. Nodos secundarios o repetidores/ruteadores: Los nodos secundarios actúan como puntos intermedios en la red, retransmitiendo los paquetes de datos que reciben de otros nodos, ya sea desde los nodos sensores (nodos primarios) o desde otros repetidores. Este proceso permite extender el rango de comunicación más allá de la capacidad de un nodo individual, característica fundamental en redes MESH que cubren grandes áreas o zonas de difícil acceso. El resultado es una arquitectura de tipo **multihop**, la cual permite que en nuestra red LoRa MESH, los datos pueden “saltar” a través de varios nodos secundarios antes de llegar al nodo principal o gateway. Esto significa que los nodos secundarios no solo capturan la información para uso propio, sino que la retransmiten a otros nodos de la red. Esto permite un **enrutamiento dinámico**, pues a medida que la red cambia (debido a la movilidad de los nodos, la interferencia de la señal, o la adición/eliminación de nodos), los nodos secundarios pueden cambiar dinámicamente la ruta de los paquetes.

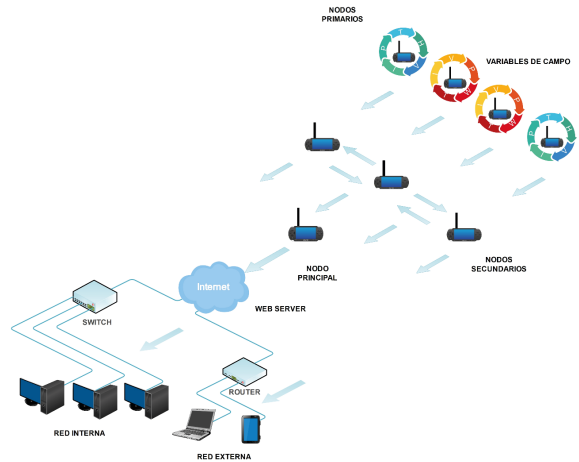


Figura 1. Diseño de la red MESH mediante dispositivos LoRa

Esto asegura que, incluso si un nodo falla, el sistema encontrará una nueva ruta para enviar los datos, manteniendo la red operativa y robusta. En este nivel o jerarquía se construye un protocolo dinámico, al cual se le llamo **Protocolo multihop o Protocolo de Red**.

C. Nodo Coordinador o Principal (Gateway): El nodo coordinador, también conocido como Gateway en redes LoRa, es el punto de convergencia de toda la información que recopilan los nodos secundarios y primarios. Las funciones del nodo principal o Gateway en esta red se describen a continuación

- **Receptor de Datos Agregados:** El nodo coordinador recibe datos (mediciones de corriente, voltaje, parámetros de calidad del agua, entre otros). desde múltiples nodos secundarios.
- **Interfaz con Sistemas Externos:** Actúa como un puente entre la red LoRa MESH y otros sistemas, al utilizar una conexión Wi-Fi, para enviar la información recolectada a servidores en la nube, bases de datos o plataformas de monitoreo IoT en tiempo real.

- **Gestión del Tráfico de la Red:** Aunque no participa directamente en el enrutamiento de datos dentro de la red MESH, el nodo gateway puede gestionar aspectos como el registro de otros nodos, asignación de direcciones y monitoreo de la integridad de la red (por ejemplo, detectando nodos inactivos o problemas de conectividad).

- **Almacenamiento Temporal (Buffering):** Si el enlace externo (Internet o red local) se interrumpe, el gateway puede almacenar temporalmente los datos en un búfer hasta que la conexión se restablezca, evitando la pérdida de información.

- **Acknowledge (ACK).** El nodo coordinador envía confirmaciones de recepción (ACK) a los nodos secundarios para asegurar que los datos han llegado correctamente. Si un nodo secundario no recibe el ACK, puede intentar retransmitir los datos.

En este nivel o jerarquía se construye un protocolo **inmerso dentro del protocolo general TCP/IP**, al cual se le llamó **Protocolo de aplicación**.

Los elementos clave considerados para las tramas de información en la red MESH multivariable basada en LoRa son los siguientes:

PROTOCOLO BASE O PROTOCOLO DE ADQUISICIÓN (NODOS PRIMARIOS)

Este protocolo es la capa más cercana a los sensores. Los nodos primarios son responsables de adquirir los datos de los sensores, procesarlos y normalizarlos para que puedan ser transmitidos de manera eficiente a través de la red. Esta primera capa asegura que la información se filtre y estructure antes de su envío para optimizar el ancho de banda. En la tabla 1 se muestra la estructura de la trama de Adquisición.

En la figura 2. Se muestra un ejemplo de cómo se va conformando la trama de adquisición iniciando con el protocolo base.

PROTOCOLO MULTIHOP O PROTOCOLO DE RED (NODOS SECUNDARIOS O REPETIDORES)

Este protocolo se implementa en los nodos secundarios de la red, quienes retransmiten los paquetes que reciben.

Estos nodos permiten que los datos “salten” entre diferentes nodos para extender el rango de la red. Los nodos secundarios aplican enrutamiento dinámico para adaptar las rutas según las condiciones de la red. En la tabla 2 se muestra la estructura de la trama Multihop.

En la figura 3 se muestra un ejemplo de cómo se va conformando la trama para el protocolo de la Red.

PROTOCOLO DE APLICACIÓN (NODO COORDINADOR O GATEWAY)

En el Gateway, los datos se recogen de los nodos secundarios para ser enviados a la nube o a un servidor local. Este protocolo está integrado dentro del protocolo TCP/IP, y asegura que los datos que llegan al Gateway se envíen a través de Internet utilizando un formato estándar de IoT, como JSON sobre HTTP o MQTT. En la tabla 3 se muestra la estructura.

En la figura 4 Se muestra un ejemplo de cómo se va conformando la trama correspondiente a la aplicación.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos para el diseño de un protocolo multivariable en una red MESH basada en dispositivos ESP32 LoRa V2 a 915 MHz se presentan en esta sección. El análisis se basa en los resultados obtenidos de parámetros críticos como RSSI, eficiencia, latencia, consumo energético y el impacto de diversos tipos de obstáculos en el desempeño de la red.

Campo	Tamaño (bytes)	Descripción
Preámbulo	2	Inicio de la trama (0xAA, 0xBB).
ID del Nodo	1	Identificador único del nodo primario.
Tipo de Sensor	1	Tipo de sensor (0x01 para corriente, 0x02 para voltaje, etc.).
Datos del Sensor	Variable	Datos del sensor adquiridos y normalizados.
Checksum	2	Código de verificación de errores.
Fin de Trama	1	Fin de la trama (0xFF).

Tabla 1. Estructura de la trama de Adquisición

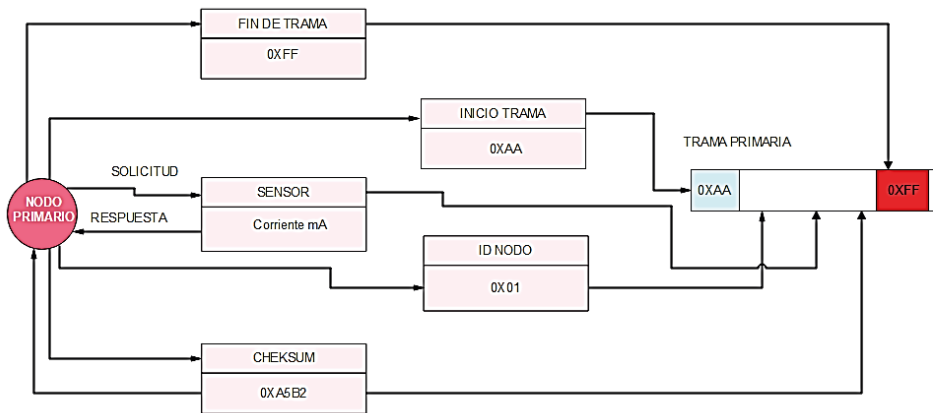


Figura 2. Conformación de la trama para el protocolo Base

Campo	Tamaño (bytes)	Descripción
Preámbulo	2	Inicio de la trama (0xAA 0xBB).
ID Nodo Origen	1	Identificador del nodo que origina el mensaje.
ID Nodo Destino	1	Identificador del nodo de destino o 0xFF para broadcast.
TTL	1	Número de saltos permitidos en la red.
Tipo de Mensaje	1	Tipo de mensaje (0x01: Datos, 0x02: Acknowledge, etc.).
Payload	Variable	Los datos recibidos del nodo primario o repetidor, listos para ser reenviados.
Checksum	2	Verificación de integridad de la trama.
Fin de Trama	1	Fin de la trama (0xFF).

Tabla 2. Estructura de la trama Multihop

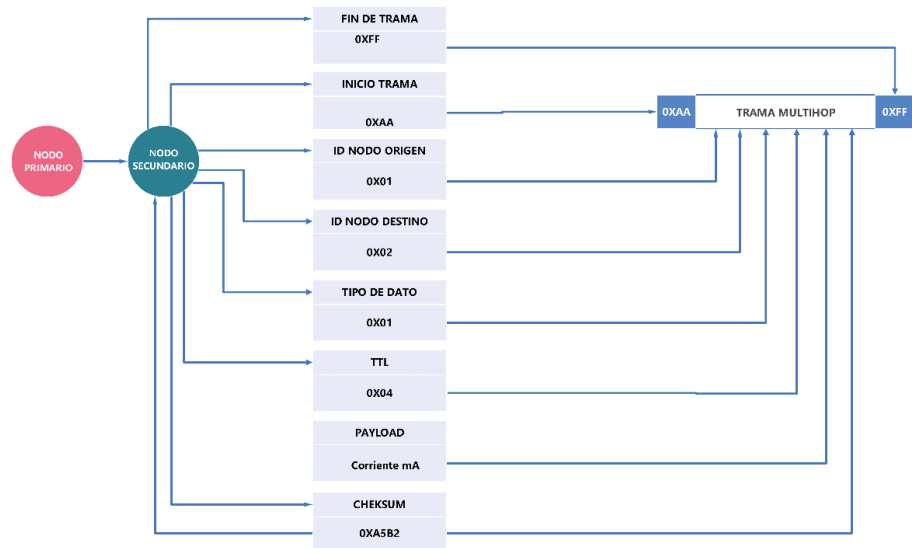


Figura 3. Conformación de la trama para el protocolo de Red

Campo	Tamaño (bytes)	Descripción
Identificador del Dispositivo	Variable	Identificación única del dispositivo (Gateway).
Timestamp	4	Tiempo de recepción de datos en formato Unix.
Datos de Sensores	Variable	Datos en formato JSON con identificadores y valores de cada sensor.
Integridad	Variable	Sello criptográfico o checksum para verificar autenticidad.

Tabla 3. Estructura del protocolo de Aplicación

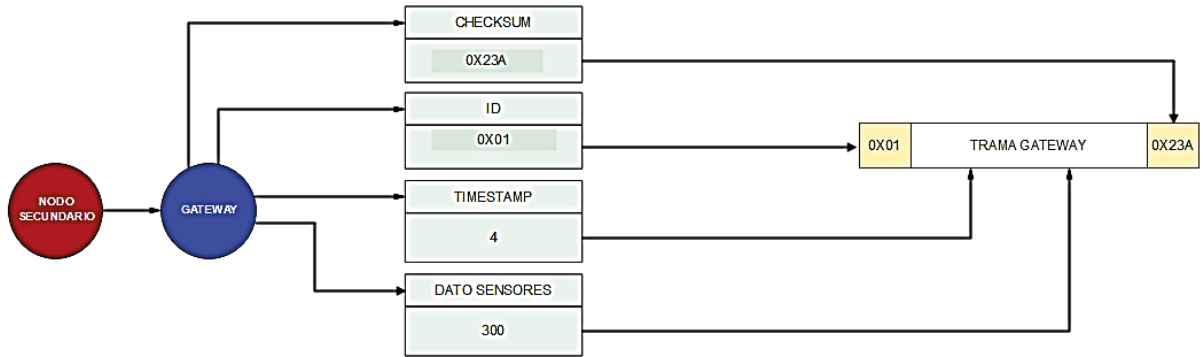


Figura 4. Conformación de la trama para el protocolo de Aplicación.

ID Nodo Primario	ID Nodo Secundario	Distancia (m)	Perdida Obstáculos Urbanos (dB)	Tramas Enviadas	Tramas Perdidas	Eficiencia (%)
Nodo Primario 1	Nodo Secundario 1	20	10	100	2	98
Nodo Primario 1	Nodo Secundario 1	40	15	100	8	92
Nodo Primario 2	Nodo Secundario 1	60	20	100	15	85
Nodo Primario 2	Nodo Secundario 1	80	25	100	20	80
Nodo Primario 3	Nodo Secundario 1	100	30	100	30	70

Tabla 4. Eficiencia de la transmisión del protocolo entre nodos primarios y secundarios

ID Nodo Primario	ID Nodo Secundario	Distancia (m)	Pérdida de Trayectoria (dB)	Pérdida de Obstáculos Urbanos (dB)	SNR (dB)	Condición de la Señal
Nodo Primario 1	Nodo Secundario 1	20	57.7	10	9.5	Excelente
Nodo Primario 1	Nodo Secundario 1	40	63.7	15	7.8	Buena
Nodo Primario 2	Nodo Secundario 1	60	67.2	20	5.2	Buena
Nodo Primario 2	Nodo Secundario 1	80	69.7	25	3.3	Regular
Nodo Primario 3	Nodo Secundario 1	100	71.7	30	3.0	Regular

Tabla 5. Nivel de SNR y distancia entre nodos.

ID Nodo Primario	ID Nodo Secundario	Distancia (m)	Corriente de Transmisión (A)	Data Rate (kbps)	Latency (ms)	Condiciones de Transmisión
Nodo Primario 1	Nodo Secundario 1	20	0.5	5.0	150	Excelente
Nodo Primario 1	Nodo Secundario 1	40	0.5	4.5	180	Buena
Nodo Primario 2	Nodo Secundario 1	60	1.0	3.8	200	Buena
Nodo Primario 2	Nodo Secundario 1	80	1.0	3.2	230	Regular
Nodo Primario 3	Nodo Secundario 1	100	1.0	3.0	240	Regular

Tabla 6. Resultados relevantes

Para la presentación de los resultados de este trabajo se presentan las siguientes tablas donde puede observar el nivel de eficiencia de la red MESH con el protocolo diseñado para el envío de tramas de protocolos por medio de los nodos de la red LoRa MESH.

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA Y OBSTÁCULOS

El porcentaje de eficiencia fue evaluado para distancias entre 20 y 100 metros, con un promedio de cien tramas enviadas y un entorno urbano con pérdidas adicionales causadas por obstáculos como concreto y vegetación densa. Se muestra en la tabla 4.

- **Resultados principales:**

- En el rango de 20 a 80 metros las pérdidas tramas enviadas y el índice de ganancia decibels por los obstáculos fueron insignificantes manteniendo una eficiencia de entre el 98 al 80 por ciento
- Al incrementar la distancia a cien metros se observó la pérdida de un tercio de las tramas lo cual trajo un decremento en el porcentaje de eficiencia.

ANÁLISIS DEL SNR VS DISTANCIA CON NODOS

La relación SNR (Signal-to-Noise Ratio) y la distancia es un indicador clave para evaluar la calidad de la comunicación en redes LoRa. A medida que la distancia entre los nodos primarios y secundarios aumenta, el nivel de señal se reduce y el ruido relativo tiene un mayor impacto, disminuyendo el valor de SNR. Los resultados obtenidos en la tabla 5 muestran el comportamiento de SNR bajo diferentes escenarios.

- **Resultados Destacados**

Disminución Progresiva del SNR con la Distancia:

- A una distancia de 20 metros, el SNR fue de 9.5 dB, clasificándose como una señal de buena calidad, adecuada para una comunicación robusta y eficiente.
- A 40 metros, el SNR se redujo a 7.8 dB, manteniéndose en un rango aceptable, pero con una leve degradación.
- A mayores distancias, como 60 metros y 100 metros, el SNR cayó a 5.2 dB y 3.0 dB, respectivamente, indicando una señal con calidad regular y mayor susceptibilidad a errores de transmisión.

DATA RATE VS DISTANCIA Y CORRIENTE CON NODOS

La relación entre la **Data Rate (Tasa de Datos)** y la distancia, junto con la corriente de transmisión, es fundamental para evaluar el rendimiento de la red LoRa. La tasa de datos está directamente relacionada con la capacidad del sistema para transmitir información en tiempo real, pero disminuye con el aumento de la distancia debido a la degradación de la señal.

RESULTADOS DESTACADOS

En la tabla 6 se pueden observar los siguientes resultados.

1. Efecto de la Distancia en la Tasa de Datos:

- o A **20 metros**, la tasa de datos fue la más alta, alcanzando **5.0 kbps** con una corriente de transmisión de **0.5 A**. Este valor refleja una excelente capacidad de transmisión en condiciones óptimas.
- o A **40 metros**, la tasa de datos disminuyó a **4.5 kbps**, una reducción moderada que todavía garantiza un buen desempeño de la red.

- o En distancias mayores, como **60 metros** y **100 metros**, la tasa de datos cayó a **3.8 kbps** y **3.2 kbps**, respectivamente, con una corriente de transmisión de **1.0 A**, lo que indica una pérdida significativa de eficiencia en entornos con mayor atenuación.

2. Impacto de la Corriente de Transmisión:

- o A distancias cortas (20 y 40 metros), la diferencia entre **0.5 A** y **1.0 A** no es significativa, ya que las condiciones de señal son ideales.
- o A mayores distancias (60 metros en adelante), el uso de **1.0 A** permitió mantener una tasa de datos más alta que la que sería posible con una corriente de 0.5 A. Esto se debe a la mejora en el RSSI y SNR al aumentar la potencia de transmisión.

3. Condición de Transmisión:

- o **Buena:** Para distancias de hasta 40 metros, con tasas de datos superiores a **4.0 kbps**.
- o **Regular:** Entre 60 y 100 metros, con tasas de datos entre **3.0 y 4.0 kbps**.

DISCUSIÓN

Nuestro protocolo diseñado demostró ser efectivo en la transferencia de información en una red LoRa de tipo MESH. Logramos una mejora significativa en la eficiencia de la comunicación hasta 100 metros en un entorno con alta densidad de obstáculos, lo que se traduce en un menor consumo de energía y una mayor vida útil de la batería de los dispositivos IoT.

Además, se observó una reducción notable en la latencia de la transmisión de datos, lo que es crítico en aplicaciones en tiempo real. Estos hallazgos respaldan la viabilidad y utilidad de nuestro protocolo en entornos altamente poblados. Comparando nuestro protocolo con investigaciones previas, encontra-

mos que supera las limitaciones identificadas en los protocolos existentes. A diferencia de algunos enfoques anteriores que sacrificaban la confiabilidad en aras de la eficiencia energética, nuestro protocolo logra un equilibrio óptimo entre eficiencia y confiabilidad siempre y cuando no se superen los 100 mts a línea de vista. Por otro lado, es importante reconocer que este estudio presenta algunas limitaciones. Por ejemplo, la investigación se centró en entornos con interferencias mínimas en lo que se refiere a la existencia de campos electromagnéticos parásitos, por lo que es necesario investigar más a fondo cómo se comporta el protocolo en entornos más hostiles. Además, la escalabilidad del protocolo a redes LoRaWAN de tipo MESH a gran escala deberá evaluarse más a fondo. Se requerirá una investigación adicional para abordar estos desafíos.

Principio del formulario

CONCLUSIONES

El diseño de un protocolo para una red MESH multivariable basado en sistemas LoRa debe equilibrar cuidadosamente el consumo de energía, la calidad de la señal y la tasa de datos para satisfacer las necesidades de aplicación específicas. Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para la implementación de estrategias adaptativas que maximizan el rendimiento de la red en entornos reales, entre ellos la posibilidad de ajustar dinámicamente parámetros como la corriente de transmisión, el spreading factor y la tasa de datos garantiza que la red pueda operar eficientemente en una amplia gama de condiciones. Esto es particularmente relevante en aplicaciones IoT donde la conectividad debe mantenerse incluso en entornos complejos. De igual forma la implementación de algoritmos que prioricen la conservación de energía en nodos menos críticos o en periodos de baja actividad podría extender significativamente la vida útil de la red. Esto es esencial para ga-

rantizar la sostenibilidad de redes IoT de larga duración. Por otra parte, el protocolo diseñado para red MESH multivariable demostró ser escalable, lo que nos permitirá a futuro ser capaz de adaptarlo a diferentes configuraciones topológicas, desde escenarios simples con pocos nodos hasta redes densas en entornos urbanos o industriales. La capacidad de mitigar el impacto de los obstáculos mediante el despliegue estratégico de nodos y la utilización de repetidores asegura que la red pueda mantener una comunicación confiable incluso en entornos adversos.

En conclusión, este estudio representa una pequeña contribución hacia la mejora de las comunicaciones en redes LoRa-IoT y muestra el potencial de nuestro protocolo en la industria y en la investigación académica. Nuestros resultados subrayan la importancia de diseñar protocolos eficientes y confiables para abordar los desafíos del IoT en entornos de baja potencia.

REFERENCIAS

1. Ashton, K. (2009). That 'Internet of Things' Thing. *RFID Journal*. Recuperado de <https://www.rfidjournal.com/that-internet-of-things-thing>
2. Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466. <https://doi.org/10.3390/s16091466>
3. Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60-67. <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743>
4. Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., & Watteyne, T. (2017). Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 34-40. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613>