

LoRaute: enrutamiento de mensajes en Backhaul LoRa

Redes para regiones desatendidas

Atonu Ghosh¹, Miembro estudiante de posgrado, IEEE, Sudip Misra², Compañero, IEEE,
Venkanna Udutalapally³, Miembro senior, IEEE y Debanjan Das⁴, Miembro senior, IEEE

Resumen—La tecnología LoRa ofrece una capacidad sin precedentes para conectar paisajes geográficos aislados y construir redes comunitarias que sirvan a propósitos específicos. A medida que la red crece, el enrutamiento coherente de mensajes se vuelve imperativo para cumplir con los objetivos de la red y los requisitos de Calidad de Servicio (QoS).

Sin embargo, a pesar del reciente aumento de la investigación y el desarrollo centrados en las redes LoRa, no hay mucha investigación que aborde los mecanismos de enrutamiento en las redes LoRa. Además, los mecanismos de enrutamiento LoRa deben ejecutarse en dispositivos de bajo consumo y con recursos limitados, ya que estas redes apuntan principalmente a ubicaciones remotas o entornos volátiles como los volcanes. Por lo tanto, este trabajo propone mecanismos de enrutamiento (LoRaute) para redes LoRa que ayudan a enrutar mensajes considerando los requisitos de QoS de los mensajes.

Además, se propone un hardware de red multipropósito, que sirve como una estación base de red LoRa o un puente WiFi a LoRa para comunicación TCP/IP. Además, este trabajo demuestra y evalúa la implementación de la red LoRa y los mecanismos de enrutamiento en un entorno real. Los resultados de la implementación indican una configuración rápida y fluida de redes LoRa multisalto. Además, la implementación logra un tamaño de registro de tabla de enrutamiento de 9 B, una latencia de enrutamiento de 24,45 ms y un consumo de corriente máximo de 171 mA por parte del nodo LoRa propuesto. Finalmente, el sistema propuesto sirve como red de retorno para comunicaciones esenciales de largo alcance, como lo demuestra la configuración experimental.

Términos del índice : red de retorno LoRa, estación base (BS) LoRa, Internet extendida LoRa, enrutamiento de mensajes LoRa, calidad de servicio (QoS) de la red LoRa, mensajería TCP/IP LoRa, WiFi sobre LoRa.

I. INTRODUCCIÓN

El mundo moderno ha sido testigo de un desarrollo prodigioso. El avance en ciencia y tecnología, conduciendo a la virtual unión del globo. Actualmente, miles de millones de dispositivos están conectados a Internet debido a los avances tecnológicos, formando así una red gigante, el Internet de las cosas (IoT) [1].

A lo largo de los años han evolucionado varias tecnologías que tienen como objetivo

Manuscrito recibido el 2 de febrero de 2023; revisado el 12 de abril de 2023; aceptado el 29 de mayo de 2023. Fecha de publicación 1 de junio de 2023; fecha de la versión actual 7 de noviembre de 2023. Este trabajo fue apoyado por el Ministerio de Electrónica y Tecnología de la Información (MeitY), Gobierno de la India, bajo la subvención 13(10)/2020-CC&BT. (Autor correspondiente: Sudip Misra.)

Atonu Ghosh y Sudip Misra trabajan en el Departamento de Ingeniería y Ciencias de la Computación del Instituto Indio de Tecnología Kharagpur, Kharagpur 721302, India (correo electrónico: atonughosh@outlook.com; sudip_misra@yahoo.com).

Venkanna Udutalapally y Debanjan Das trabajan en el Departamento de Ingeniería y Ciencias de la Computación y en el Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones del Instituto Internacional de Tecnología de la Información Naya Raipur, Naya Raipur 493661, India (correo electrónico: venkannau@iiitnr.edu.in; debanjan@iiitnr.edu.in).

Identificador de objetos digitales 10.1109/JIOT.2023.3281941

2327-4662c 2023IEEE. Se permite el uso personal, pero la republicación/redistribución requiere permiso del IEEE.

Consulte <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html> para obtener más información.

Uso de licencia autorizado limitado a: Universidad Industrial de Santander. Descargado el 11 de agosto de 2024 a las 03:24:06 UTC desde IEEE Xplore. Se aplican restricciones.

para ampliar los límites de la red de IoT y conectar regiones remotas. LoRa es una de esas tecnologías que ayuda a unir áreas aisladas a la red y permitir la prestación de servicios [2]. LoRa es la modulación de capa física del protocolo LoRaWAN de Semtech. LoRaWAN es una especificación abierta para redes de área amplia (LPWAN) de baja potencia basada en chips LoRa que operan en la banda industrial, científica y médica (ISM) sin licencia. El bajo consumo de energía, la baja velocidad de datos y la cobertura de larga distancia caracterizan a las redes LoRa [3]. Por lo tanto, los hace adecuados para una amplia gama de aplicaciones de IoT.

A pesar de la proliferación de dispositivos digitales, las zonas rurales de los países en desarrollo y subdesarrollados carecen de infraestructura de red crítica. Como resultado, dichos sitios permanecen desvinculados de los canales de comunicación de la sociedad. Lo que resulta en olvido de los anuncios destacados del Gobierno, dificultad para encontrar ayuda en emergencias, pérdida de boletines de la administración local y dejar escapar otras oportunidades.

Por lo tanto, tecnologías como LoRa pueden ayudar significativamente a construir redes comunitarias únicamente para comunicaciones dentro de la red o para extender servicios esenciales a ubicaciones remotas.

Sin embargo, las infraestructuras LoRaWAN no cumplen con los requisitos de estas redes comunitarias debido principalmente a su naturaleza de un solo salto [4], [5]. Estas redes tienen necesidades complejas y multicriterios que son fundamentales para el funcionamiento de la red.

Escenario de ejemplo: este trabajo considera aldeas remotas que carecen de una infraestructura de comunicación adecuada. Estas zonas a menudo se pierden los diversos anuncios de los organismos gubernamentales y no gubernamentales en los medios digitales, ya que carecen de servicios de comunicación a diferencia de las zonas urbanas.

Estas regiones están al borde de cualquier red principal que atienda al resto de la población. Por lo tanto, dichas ubicaciones deben estar conectadas a la red troncal a través de medios económicos y sostenibles.

La figura 1 representa el caso de uso de aldea que resuelve LoRaute (el sistema propuesto y los mecanismos de enrutamiento). El caso de uso es genérico y requiere que se pueda acceder a la red LoRa desde cualquier lugar del pueblo. Por tanto, una conexión punto a punto es inviable. Además, existe la necesidad de estaciones base fijas (BS) que sirvan como columna vertebral de la red. Los aldeanos acceden a la red utilizando el dispositivo propuesto (detallado en la Sección III). Los dispositivos pueden ser móviles o fijos en casa.

A través de esta red, los usuarios intercambian mensajes utilizando las aplicaciones de mensajería TCP/IP. Por lo tanto, está claro que la estructura de la red es inherentemente multisalto.

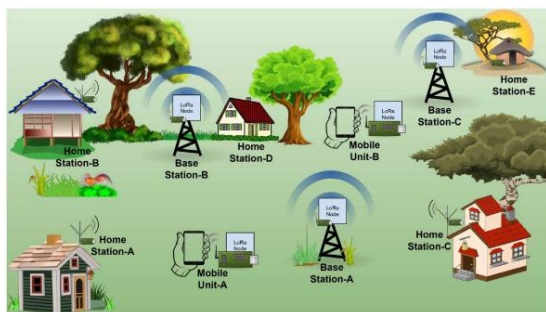


Fig. 1. Descripción general del sistema propuesto y la implementación de red con el nodo LoRa configurado como BS, HS y MU.

A. Motivación

La tecnología LoRa ha atraído recientemente una gran atención por parte de la comunidad investigadora. Como resultado, varias obras implementan IoT y otros sistemas aprovechando el potencial de LoRa. Así, las redes LoRaWAN también han emergido considerablemente. Además, también han surgido redes que extienden Internet a través de LoRa. El principal problema con los sistemas y redes existentes es que no abordan el aspecto fundamental del enrutamiento de datos en estas grandes redes basadas en LoRa.

La ausencia de mecanismos de enrutamiento eficientes retrasa cualquier red y obstaculiza el propósito general de la red.

Además, la eficiencia energética se vuelve esencial a medida que las redes LoRa apuntan a ubicaciones remotas. Además, el flujo de mensajes agota la batería limitada de los dispositivos LoRa.

Por tanto, los mecanismos de enrutamiento deben ser energéticamente eficientes.

Aunque, recientemente, pocos trabajos se han centrado en la comunicación LoRa mult salto, estos trabajos se basan únicamente en simulaciones y no muestran resultados reales basados en hardware. Pocos estudios han implementado sistemas de mensajería utilizando LoRa pero no lograron implementar ningún mecanismo de enrutamiento de mensajes [6], [7].

Para abordar estas lagunas en la literatura como en la Sección I, este trabajo propone LoRaute para el enrutamiento eficiente de mensajes en grandes redes LoRa que sirven para la comunicación dentro y entre aldeas. Este trabajo demuestra la mejora de la eficiencia de la red y el hardware del sistema cuando se implementa con LoRaute.

B. Contribuciones

LoRaute aborda las necesidades modernas de las redes comunitarias y ayuda a extender los servicios urgentes a áreas geográficas remotas. Además, los medios y el sistema propuestos son apropiados para implementaciones de IoT grandes y complejas. Las contribuciones de este trabajo se enumeran a continuación.

- 1) Este trabajo implementa mensajería TCP/IP a través de la red LoRa. Presenta los resultados obtenidos de un despliegue real de los mecanismos y hardware de enrutamiento propuestos.
- 2) El trabajo actual propone y demuestra mecanismos de enrutamiento de mensajes para redes LoRa mult salto en las que el nodo LoRaute propuesto funciona como punto de acceso y estación base (BS).
- 3) Además, este trabajo propone y demuestra el enrutamiento de mensajes en una red donde los dispositivos clientes WiFi intercambian mensajes a través de LoRa.

- 4) Finalmente, se discuten los resultados detallados y las observaciones de una implementación real basada en hardware.

II. TRABAJO RELACIONADO

La capacidad de LoRa para operar a largas distancias consumiendo poca energía en comparación con sus contrapartes ha atraído la atención de la comunidad investigadora. Como resultado, se ha utilizado ampliamente para construir nodos de sensores, puertas de enlace de IoT y otros sistemas similares [8], [9], [10].

Los investigadores se dieron cuenta de la naturaleza estricta de la topología en estrella basada en un solo salto de LoRaWAN y de su impracticabilidad para implementaciones a gran escala. De este modo, se produjo la génesis de las redes LoRa de malla y mult salto [11]. Los investigadores experimentaron con relés y formaron una topología de estrella de estrellas utilizando los dispositivos LoRa. Los investigadores concluyeron que el consumo de energía era menor que el de un salto dada la misma Calidad de Servicio (QoS) [12]. Además, un grupo de investigación examinó una red en malla de 19 dispositivos LoRa y una puerta de enlace. Como resultado, lograron una tasa de entrega de paquetes (PDR) significativamente mayor en comparación con la topología en estrella sin instalar puertas de enlace adicionales [13].

Independientemente de la tecnología de comunicación, el enrutamiento es fundamental para el éxito de todas las redes. Además, investigaciones recientes muestran que el rendimiento de las redes LoRa es inversamente proporcional a la carga de la red y directamente proporcional al número de puertas de enlace [14], [15]. Desafortunadamente, LoRa carece de esfuerzos de enrutamiento por parte de los creadores. Muy pocos investigadores han intentado abordar este ámbito de investigación en gran medida intacto. Las técnicas de enrutamiento eficientes seguramente mejorarán la aplicabilidad de LoRa y permitirán a la comunidad construir soluciones aún más sólidas y estructuradas que puedan escalarse [16].

Los investigadores propusieron una arquitectura de red en capas donde una puerta de enlace liviana manejaba el enrutamiento en cada capa comunicándose con la puerta de enlace central de toda la red [17]. Además, los investigadores propusieron equilibrar la carga del tráfico a través de una red definida por software (SDN).

Sin embargo, aunque los investigadores presentaron los resultados de su simulación y afirmaron la superioridad de sus mecanismos de enrutamiento, el trabajo no considera la naturaleza práctica de múltiples saltos de las redes LoRa [18].

Además, los investigadores experimentaron con un mecanismo de enrutamiento mult salto basado en agrupaciones. Desarrollaron un marco de evaluación basado en simulación y reportaron importantes ahorros de energía en la red de 1000 nodos con distribución uniforme entre seis grupos [19]. Además, los investigadores simulaban y utilizaron un mecanismo de selección de retransmisiones para enrutar mensajes en redes LoRaWAN [20]. Además, un grupo diferente de investigadores propuso un esquema de enrutamiento para redes de malla LoRa [21]. Sin embargo, el trabajo no permite mensajes TCP/IP a través de la red LoRa y no logra conectar los dispositivos WiFi con la red de retorno LoRa.

Los investigadores experimentaron y analizaron el rendimiento del control de acceso al medio para el protocolo de sueño basado en chimes versión 6 (MACGSP6) [22] en el hardware actual [23]. Sin embargo, un inconveniente importante del protocolo MACGSP6 es su naturaleza de apagar las radios en función de la probabilidad de chimes.

TABLA I
COMPARACIÓN DEL TRABAJO ACTUAL CON EL TRABAJO RELACIONADO

| Works | Multi Hop Solution | Routing Mechanisms | LoRa Base and Home Station | TCP/IP Over LoRa | WiFi Access Point |
|--------------------|-----------------------|--------------------|----------------------------|------------------|-------------------|
| Farooq et al. [17] | Yes (Gateway Based) | Yes | No | No | No |
| Lee et al. [18] | Yes | Yes (Relay Only) | No | No | NA |
| Paul et al. [19] | Yes (Simulation Only) | Yes | No | No | No |
| Feng et al. [20] | Yes (Simulation Only) | Yes | No | No | No |
| Hong et al. [21] | No | No | No | No | No |
| Osorio et al. [23] | Yes | Yes | No | No | No |
| Gao et al. [24] | Yes | Yes | No | No | No |
| This Work | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes |

Los mensajes en una red de mensajería de texto son muy impredecibles y, por lo tanto, esto daría como resultado una cantidad colosal de transmisiones no escuchadas.

Además, los investigadores propusieron una red de área amplia de baja potencia multicanal y multisalto que albergaba varios sensores de alta frecuencia. Demostraron una topología de red basada en tres saltos [24]. Sin embargo, a pesar de que los investigadores presentan mecanismos de sincronización en su trabajo, no cumplen con los requisitos de enrutamiento en una aplicación de mensajería, como se demuestra en este trabajo. Este trabajo se compara lado a lado con los trabajos relacionados en la Tabla I.

Los trabajos en la literatura dan cuenta de la investigación y el desarrollo que las redes LoRa a gran escala han recibido hasta ahora. Sin embargo, los trabajos relacionados se han centrado en enfoques basados en simulación. En consecuencia, no han abordado la extensa red de retorno LoRa basada en comunicación TCP/IP habilitada para WiFi para mensajes de texto y acceso a aplicaciones web. Además, falta una implementación real de dichos sistemas.

III. NODO LORAUTE

Los nodos LoRa impulsan la red propuesta para la entrega de servicios web y mensajes de texto esenciales basados en TCP/IP. Cada red G_{λ} está compuesta por i números de nodos LoRa (ni el i ésimo nodo) y se representa como

$$G_{\lambda} = \{n_1, n_2, \dots, n_i\} \mid i, \lambda \leq 1, \quad i \neq 1.$$

El nodo LoRa consta de un microcontrolador con una antena WiFi integrada, un transceptor LoRa, una antena LoRa y una unidad de administración de energía con baterías recargables que alimentan el nodo. Funciona en tres modos, es decir, como estación base (BS), estación doméstica (HS) o unidad móvil (MU). La Sección V proporciona una descripción detallada de la configuración de la red experimental en este trabajo.

A. La estación base BS

En este modo, LoRa funciona de manera similar a una BS celular y enruta mensajes. Recibe mensajes reenviados por otras BS en la red, consulta su tabla de enrutamiento local y consume los mensajes si están destinados a ella o los reenvía según las decisiones de enrutamiento que toma consultando una tabla de enrutamiento local. Ejecuta los algoritmos propuestos para el llenado y el enrutamiento de la tabla de enrutamiento. A diferencia de HS y MU, la BS permanece en constante funcionamiento y es fundamental para la red troncal. Por tanto, la eficiencia energética de los nodos es de

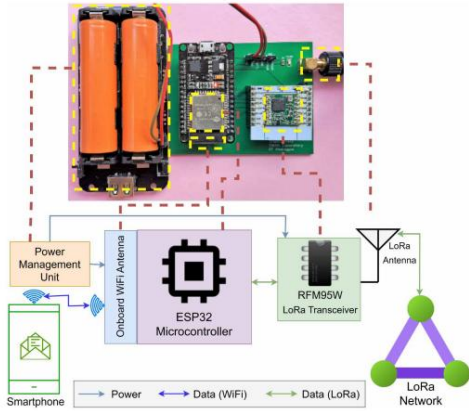


Fig. 2. Estructura del nodo LoRa y comunicación del teléfono inteligente con la red LoRa.

suma importancia, especialmente cuando se implementa en áreas remotas. El consumo de energía del nodo LoRa se examina en la Sección VI-D.

B. La estación base y la unidad móvil HS o MU

Como HS, el nodo conecta un punto de acceso WiFi para que los dispositivos habilitados para WiFi intercambien mensajes. Como en la Fig. 2, utiliza la antena WiFi integrada para la conexión y la antena LoRa para comunicarse con la red LoRa de retorno. También realiza el enrutamiento de mensajes en la red, ya que es menos probable que su posición cambie que los nodos móviles. Como MN, el nodo LoRa une las redes WiFi y LoRa y enruta mensajes similares a las BS. Pero las MU proporcionan movilidad a diferencia de las BS. Debido a las frecuentes variaciones de ubicación, los nodos móviles no participan en las operaciones de enrutamiento primario de la red. En cambio, estos nodos proporcionan a los usuarios en movimiento un acceso simplificado a la red.

IV. ENRUTAMIENTO DE MENSAJES LORAUTE

La BS y el HS determinan principalmente el enrutamiento de los mensajes en la red, ya que forman una ruta confiable y estacionaria en comparación con las MU. Por lo tanto, es menos probable que la topología de red formada por HS y BS cambie rápidamente. Por lo tanto, el esquema de red propuesto emplea estas estaciones para crear la columna vertebral de la red de retorno LoRa. Cada nodo, después del encendido, en la red, escucha continuamente los mensajes de transmisión que comienzan con "Hola".

Los BS y HS envían estas transmisiones de "Hola" en el formato "Hola, <tipo_nodo_remitente>, <id_nodo_remitente>".

Algoritmo 1 Descubrir vecinos

Entrada: Nlist (lista de vecinos de un nodo)

Salida: Napped (lista adjunta de nodos vecinos)

1: procedimiento HANDLE_NEIGHBOR(Nlist)

2: recibido ← Escuche transmisiones y reciba

3: si se recibe.STARTS_WITH("Hola") entonces

4: splitMsg ← recibido.SPLIT(",") División por coma

5: si splitMsg[2] en Nlist entonces

6: Saltar recibido y seguir escuchando

7: demás

8: Napped ← splitMsg[2] return Agregar nodo

9: Fin de Napped si La lista adjunta

10:

11: demás

12: Saltar recibido y seguir escuchando

13: devolver

14: terminar si

15: finalizar el procedimiento

TABLA II
 ESTRUCTURA DE LA TABLA DE ENRUTAMIENTO DE MUESTRA PARA UNA BS (B1) DONDE
 LOS NODOS PASANTES SON VECINOS DE B1

| Destination Node (key) | Through Node (value) |
|------------------------|----------------------|
| 23 | 4 |
| 9 | 3,6 |
| 13 | 1 |

El algoritmo 1 representa el método para el descubrimiento de vecinos y población de la lista de vecinos de un nodo.

El algoritmo toma la lista de sus vecinos como entrada y devuelve una lista con el nuevo nodo vecino adjunto.

La lista devuelta (L) se transmite posteriormente a otras solicitudes. nodos en la red como en el Algoritmo 1 para actualizar su enrutamiento mesa

$$L = \{n_1, n_2, \dots, n_k\} \quad k \geq 0, \quad G_{\lambda} \geq 2$$

A. Tabla de enrutamiento

La estructura de la tabla de enrutamiento del nodo LoRa se presenta en Cuadro II. Consta de dos columnas y n filas. La primera columna es el ID del nodo de destino y la segunda columna es el ID de BS o HS a través del cual se envía el nodo de destino. accesible. La implementación basada en Python de esta tabla es un diccionario donde el nodo de destino es la clave y el nodo de destino es la clave. el nodo es el valor. Este diccionario se almacena en cada HS o BS y se refiere a reenviar cada mensaje. Cuando un mensaje llega a una BS o HS, primero verifica la dirección del mensaje. destino para afirmar si es el destino del mensaje. si el El destino es el nodo mismo, consume el mensaje. Demás, Consulta la tabla de enrutamiento para reenviar el mensaje a la dirección correcta. Licenciatuara o HS.

Cada nodo solicita a sus nodos vecinos para su vecino liza. Al recibir las listas de vecinos, un nodo inserta la los nodos vecinos de los vecinos como claves en la implementación del diccionario. Agrega el nodo remitente como el valor correspondiente a cada llave insertada. Así, mientras se reenvía un mensaje, un nodo busca las claves del diccionario. Si está presente como clave en el

Algoritmo 2 Crear tabla de rutas

Entrada: ni (ID de ith nodo vecino)

Salida: Tableroute (tabla de enrutamiento del nodo)

1: procedimiento CREATE_ROUTE(ni)

2: Enviar una solicitud a ni para su lista de vecinos

3: recibido ← Recibir respuesta de ni

4: si se recibe.STARTS_WITH("NL") entonces

5: splitRes ← recibido.SPLIT(",")

6: si splitRes[2] en Tableroute.values entonces

7: Eliminar Tableroute.VALUES(splitRes[1])

8: para el nodo en splitRes[2] (lista de vecinos) haga

9: Ruta de tabla ← nodo:splitRes[1]

10: fin para

11: volver Tableroute más Tabla de rutas actualizada

12:

13: para el nodo en splitRes[2] (lista de vecinos) haga

14: Ruta de tabla ← nodo:splitRes[1]

15: fin para

16: devolver el final de Tabla de rutas actualizada

17: Tableroute si

18: demás

19: Saltar recibido e intentarlo más tarde

20: devolver

21: terminar si

22: finalizar el procedimiento

diccionario, el valor asociado se convierte en el siguiente salto para el mensaje. Los nodos ejecutan el algoritmo 2 para solicitar vecinos. listas de vecinos de los nodos y crear su propia tabla de enrutamiento.

Como Python implementa la estructura de datos del diccionario usando tablas hash, el tiempo de búsqueda es constante para cualquier clave. Por eso, la implementación logra un tiempo de búsqueda O(1). En general, el El algoritmo tarda O(n) tiempo en ejecutarse.

B. Reenvío de mensajes y adición de direcciones

Para enrutar los mensajes a sus destinos, las direcciones se hace referencia en cada salto del proceso de reenvío de mensajes operaciones. El encabezado del mensaje LoRa contiene las direcciones de origen y destino y otra información, como el mensaje. número de secuencia y tipo de paquete. La dirección de destino en Se hace referencia al encabezado del mensaje en cada salto para mover el Los mensajes saltan a salto. Además, a medida que los mensajes pasan los saltos, el La dirección de destino en el encabezado del mensaje se modifica en consecuencia para los saltos posteriores. Además, para la entrega final de un mensaje, su dirección de destino se adjunta en el origen. Cada nodo analiza esta dirección durante las operaciones de reenvío para determinar el siguiente salto o el final del salto para el mensaje.

La figura 3 demuestra el mecanismo de reenvío de mensajes. implementado en el sistema propuesto. Por ejemplo, en el nodo número 4, se origina el mensaje con destino al nodo 23. Por lo tanto, el nodo 4 consulta su tabla de enrutamiento para reenviar el mensaje al nodo 23. Por lo tanto, el mensaje se envía al nodo 13. Nodo 13, a su vez, reenvía el mensaje al nodo de destino. De este modo, el mensaje es entregado. Agregar la dirección al mensaje agrega una sobrecarga de 3 bytes, considerando el espacio de direcciones de

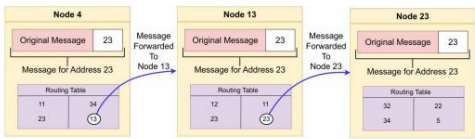


Fig. 3. Reenvío de mensajes por nodos hasta que el mensaje se entrega en el destino.

Implementación LoRa de este trabajo. Plantea gastos generales mínimos como se examina en la Sección VI. La dirección se agrega a la cadena del mensaje usando un delimitador de coma en esta implementación. El formato del mensaje resultante, incluida la dirección, es <mensaje>,<dirección_destino>,<recuento_salto>.

Cuando la entrada de un nodo está ausente en una tabla de enrutamiento, el mensaje se envía a la ruta predeterminada, es decir, el mensaje se transmite para llegar a otros nodos, quienes, a su vez, pueden enrutar el mensaje a su destino. Por tanto, aumenta la probabilidad de entrega de un mensaje. Sin embargo, en esta etapa, al mensaje se le añade un recuento de saltos que se incrementa en cada salto. El conteo de saltos impide así una circulación interminable del mensaje en la red.

C. Transmisiones de emergencia e inundaciones

La red basada en LoRa proporciona la posibilidad de enviar mensajes y anuncios de emergencia. Como estos mensajes están destinados a todos los participantes de la red, la red inunda estos mensajes en la red. Sin embargo, como las inundaciones inconscientes obstaculizan el rendimiento de la red, dichos mensajes contienen el campo de recuento de saltos para limitar el tiempo de vida. Por ejemplo, un mensaje de emergencia tiene el formato <SOS>,<mensaje>,<source_id>,<hop_count>. Un nodo de retransmisión comprueba el campo hop_count si ha alcanzado el límite. De lo contrario, incrementa el campo hop_count y lo retransmite a la red. Por tanto, las inundaciones siguen bajo control.

D. Acuse de recibo de entrega de mensaje

La red propuesta implementa un reintento opcional de envío de mensajes basado en acuse de recibo. La recepción de cada mensaje se confirma mediante un mensaje "ACK" cuando está habilitado. Si falla la entrega de un mensaje, la red propuesta proporciona un mecanismo para establecer el número de reintentos que ejecuta un nodo remitente para enviar el mensaje. Por lo tanto, a través del mecanismo de reconocimiento, la QoS de la red mejora enormemente. Sin embargo, a pesar de las mejoras en la QoS, el mecanismo ACK aumenta la latencia y el consumo de ancho de banda de la red. Por lo tanto, el mecanismo ACK se puede desactivar y los mensajes se pueden intercambiar en la red sin él por mensajes no críticos. La definición de "tipo de paquete" en el encabezado del mensaje selecciona el modo de mensajería en el esquema propuesto. El destino también se adjunta a los ACK para su entrega de un extremo a otro. El envío de los ACK sigue el mismo esquema que en la Sección IV-B.

E. Múltiples caminos

Se puede llegar a un nodo de destino o a un nodo intermedio desde un nodo de origen a través de múltiples rutas. En tales casos, el algoritmo de enrutamiento selecciona una ruta aleatoriamente entre las disponibles. La naturaleza aleatoria de la selección evita que una sola ruta se sobrecargue.



Fig. 4. Despliegue de una BS en un poste, implementación de hardware y componentes del nodo. (a) BS. (b) Nodo.

F. Cambio en la topología de la red Es

esencial actualizar las tablas de enrutamiento a medida que cambia la estructura de la red. Por tanto, los nodos son flexibles y pueden comprobar periódicamente los nodos vecinos. El "Descubrir Vecino" (Algoritmo 1) busca nuevos mensajes de difusión y actualiza su lista de vecinos en consecuencia. Además, la opción "Crear tabla de rutas" (Algoritmo 2) actualiza la tabla de enrutamiento. Por lo tanto, la red siempre mantiene un estado de enrutamiento actualizado.

V. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

Este trabajo evalúa el esquema de red propuesto mediante la implementación de un conjunto de siete nodos LoRa. De los siete nodos LoRa, dos nodos están configurados como nodos BS, dos como nodos HS, un nodo receptor y el resto como nodos emisores. Luego, se realizaron varias rondas de experimentos para evaluar el rendimiento del enrutamiento y la red variando el número de remitentes, la frecuencia de los mensajes y el tamaño de la carga útil. El nodo LoRa que se muestra en la Fig. 2 consta de una placa de desarrollo de microcontrolador ESP32, un transceptor LoRa RFM95W de 868 MHz, una antena de 868 MHz con ganancia de 5 dBi, un sistema de gestión de baterías de iones de litio 18 650 y dos 18 650 2200-. Baterías de iones de litio de mAh.

La Fig. 4 muestra la BS de prueba, el nodo doméstico y móvil, y los componentes del nodo LoRa. Los componentes se conectan a través de una placa de circuito impreso (PCB). Además, la placa de desarrollo ESP32 contiene una antena WiFi integrada de 2,4 GHz que conecta los dispositivos cliente WiFi. El firmware del microcontrolador ESP32 se desarrolló utilizando micropython. El hilo uno que se ejecuta en el ESP32 maneja las transmisiones periódicas de información del nodo. Mientras que el hilo dos controla el resto de funcionalidades del sistema. La Tabla III muestra las configuraciones de nodos LoRa utilizadas en la configuración experimental.

Para probar la mensajería en la red, se desarrolló una aplicación de socket de red basada en Python que permite enviar y recibir mensajes. Un socket de aplicación de Android existente.

VI. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

A. Latencia de enrutamiento

1) Descubrimiento de vecinos y creación de tabla de rutas: el algoritmo "Descubrir vecinos" se ejecutó 20 veces y se observó que el tiempo de ejecución promedio de cumplimiento de la solicitud de lista de vecinos (solicitud y recepción) fue de 2,65 s. En contraste,

TABLA III
CONFIGURACIONES DE CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

| # | Parameter | Value |
|----|---------------------------|-------------|
| 1 | Deployment type | Multi-hop |
| 2 | Topology | Mesh |
| 3 | Experiment duration | 7 days |
| 4 | Clients | i5 Laptops |
| 5 | Client protocol | TCP |
| 6 | Client WiFi | 2.4GHz |
| 7 | No. of clients | 2 |
| 8 | LoRaute microcontroller | ESP32 |
| 9 | LoRa module | RFM95W |
| 10 | Firmware | Micropython |
| 11 | LoRa Frequency | 868MHz |
| 12 | LoRa Tx Power | 20dBm |
| 13 | LoRa Spreading Factor | 10 |
| 14 | LoRa Bandwidth (kHz) | 125 |
| 15 | LoRa Coding Rate | 1 |
| 16 | No. of Home Stations (HS) | 2 |
| 17 | No. of Base Stations (BS) | 3 |
| 18 | No. of Hops | 7 |
| 19 | Hop distance | 25m |

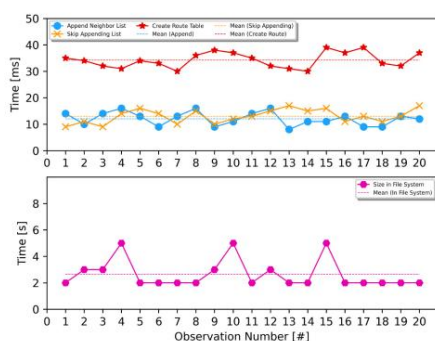


Fig. 5. Tiempos de ejecución de descubrimiento de vecinos y creación de tabla de rutas.

los tiempos máximo y mínimo fueron 5 y 2 s, respectivamente. La figura 5 muestra las observaciones de nuestro experimento. Además, el tiempo promedio para agregar la lista de vecinos y omitir los tiempos de adición se registró como 12,05 y 13,05 ms, respectivamente.

Mientras que el tiempo promedio para la ejecución de la creación de la tabla de rutas fue de solo 34,25 ms.

2) Retraso en el reenvío de mensajes: se registró el tiempo para reenviar un mensaje recibido en el transceptor WiFi y entregarlo a través del transceptor LoRa. El experimento constaba de tres nodos. Un nodo recibió los mensajes de prueba a través de WiFi desde un dispositivo cliente Android y envió los mensajes a un nodo intermedio a través de LoRa. El tercer nodo realizó lo contrario del primer nodo, es decir, recibió mensajes del nodo intermedio a través de LoRa y los entregó a un escritorio a través de WiFi. Se registró el tiempo que tardó el nodo intermedio en reenviar los mensajes de transmisión. La Fig. 6 muestra las observaciones para varios tamaños de carga útil. Los retrasos en el reenvío fueron nominales y dependieron de la implementación del código de procesamiento en los nodos LoRa. Los tamaños de carga útil de prueba fueron 40, 80, 160 y 180 B. Las latencias promedio se registraron como 7,1, 15,4, 22,25 y 24,45 ms, respectivamente, para las cargas útiles.

B. Tamaño de la tabla de enrutamiento

El tamaño de la tabla de enrutamiento (cuando se carga en la RAM) es una función semilineal del número de nodos vecinos. Se necesita

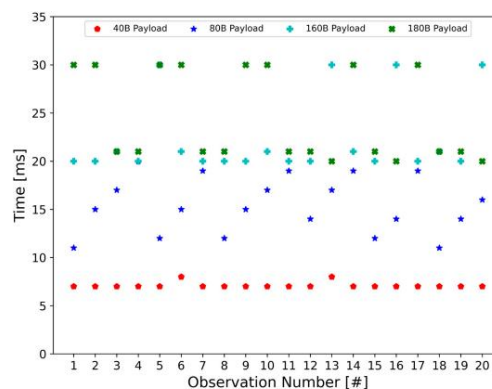


Fig. 6. Retraso ocurrido al reenviar mensajes de diferentes tamaños por nodos.

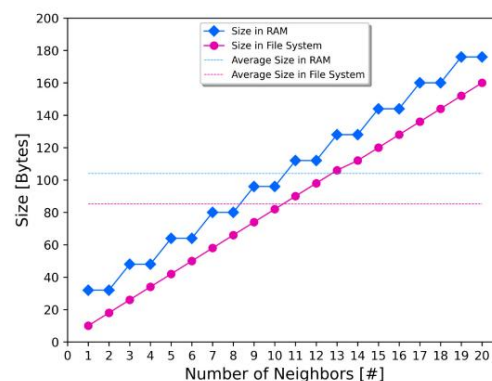


Fig. 7. Variación del tamaño de la tabla de enrutamiento (en RAM y sistema de archivos) con respecto al número de vecinos.

aproximadamente 104 bytes en promedio por registro de par clave-valor mientras se carga en la memoria principal del dispositivo ESP32.

Por el contrario, cuando los registros se escribieron en un archivo del sistema de archivos, cada registro consume 9 bytes para un número de nodo de tres dígitos. Por lo tanto, el sistema de archivos predeterminado de 1,5 MB del microcontrolador ESP32 proporciona un espacio enorme para la tabla de enrutamiento.

Por ejemplo, un nodo con cuatro nodos vecinos solo tiene un tamaño de tabla de vecinos de aproximadamente 33 bytes, incluida la nueva coma que separa cada registro. La Fig. 7 representa la variación del tamaño de la tabla de enrutamiento con respecto al número de nodos vecinos. Mientras que, en el sistema de archivos, cada registro consumía 8 B para ser almacenado y el tamaño del archivo mostraba una relación lineal con el número de registros.

C. Competencia

Se realizaron cinco rondas de experimentos para probar la calidad y la simultaneidad del enlace LoRa. En la primera ronda, se configuraron tres nodos emisores y un receptor para transmitir datos cada siete segundos. Se observó que más del 50% de los mensajes se perdieron o los datos se confundieron debido a colisiones. Así, se implementó la transmisión de mensajes con acuse de recibo y reenvío automático.

Dos y tres nodos emisores transmitieron 30 B a un receptor en dos rondas separadas. La ronda con dos remitentes no resultó en transmisiones fallidas y solo un mensaje retransmitido, como en la Fig. 8. Con tres remitentes, cada uno transmitiendo en un intervalo de

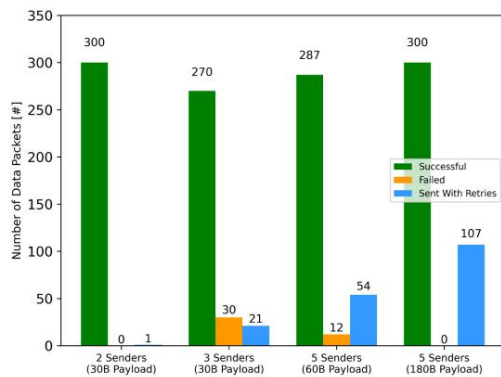


Fig. 8. Mensajes LoRa enviados exitosamente, fallidos y enviados con reintentos con múltiples nodos enviando datos a un solo nodo.

En siete segundos, se perdieron treinta mensajes y se retransmitieron veintinueve mensajes, lo que indica congestión de los canales LoRa. Además, con cinco remitentes transmitiendo 60 B de datos en intervalos de 7, 12, 18, 24 y 30 s, la cantidad de paquetes perdidos se redujo a pesar del aumento en la cantidad de remitentes debido a los diferentes tiempos de transmisión, lo que resultó en una reducción de las colisiones. Además, cuando los intervalos y la carga útil se aumentaron aún más a 18, 28, 38, 48 y 58 s y 180 B, respectivamente, no se perdió ningún paquete. Sin embargo, el número de retransmisiones aumentó. Esto imita un entorno de mensajería real, y los tiempos de transmisión escasamente distribuidos dejan los canales LoRa inactivos durante un período amplio para que los mensajes se reciban y reconozcan. Para estimar la calidad de la red, se calcula la tasa de entrega de paquetes (PDR(η)), que es el número de paquetes entregados (δ) respecto al número total de paquetes enviados (η)

$$\delta_1 \eta_1[\%] = \frac{\delta}{\eta} \cdot 100 = \frac{300}{300} = 100\% \quad (3)$$

De manera similar, como en la Fig. 8, η_2 (270 paquetes entregados, 30 paquetes perdidos) = 90 %, η_3 (287 paquetes entregados, 12 paquetes perdidos) = 96 %, y η_4 (300 paquetes entregados, 0 paquetes perdidos) = 100 %, respectivamente, para las rondas restantes del experimento. En comparación con la literatura más cercana, los investigadores en [25] experimentaron con diez nodos LoRa pero enviaron datos cada 120 s, que es 2,07 veces el mayor retraso (58 s) en este experimento. A pesar de la alta frecuencia de datos y la carga útil similar, este trabajo logró PDR más altos. Además, en comparación con el trabajo relacionado [23], esta implementación logró PDR más altos que oscilaron entre 96% y 100% en lugar de 81% y 98%.

D. Consumo de energía

Se registró el consumo actual del nodo LoRa propuesto y se comparó con hardware similar en la literatura.

El sistema propuesto consume un máximo de 0,47 W de potencia para transmitir datos de 160 B a través de LoRa. Por tanto, el sistema propuesto consume 0,117 W menos de energía que en [26].

La Fig. 9 muestra la corriente consumida durante las transmisiones LoRa. El consumo de corriente promedio para transmitir 10, 20, 40, 80 y 160 B de datos es 68,25, 72,03, 75,16, 93,9 y 93,97 mA, respectivamente. A medida que aumentaba la longitud del mensaje, también aumentaba el tiempo en el aire (TOA). como un

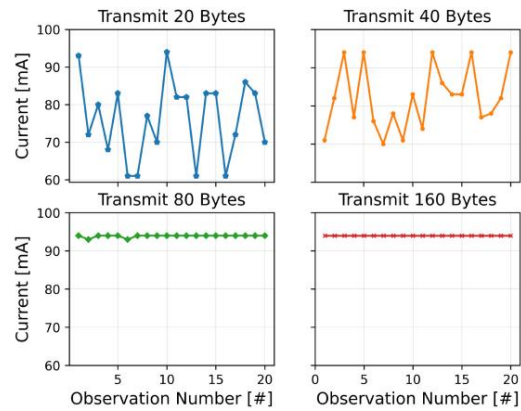


Fig. 9. Consumo de corriente de transmisión LoRa.

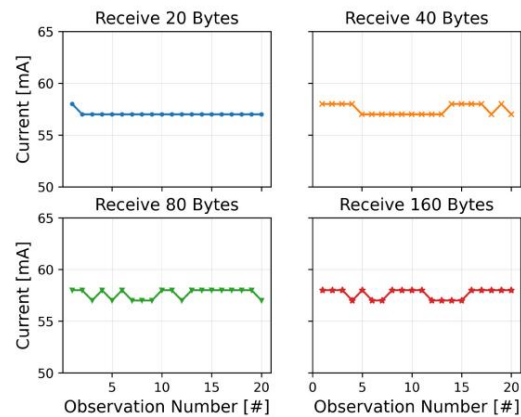


Fig. 10. Consumo de corriente de recepción LoRa.

Como resultado, las instancias de medición mostraron valores altos consecutivos para mensajes más largos. Mientras que la corriente promedio consumida para la recepción de mensajes a través de LoRa es 57, 57,05, 57,45, 57,65 y 57,65 mA, respectivamente. La Fig. 10 muestra el consumo de corriente de recepción para diferentes cargas útiles.

La configuración experimental consumió un promedio de aproximadamente 152,51 mA de corriente cuando los mensajes se recibieron a través de WiFi desde un dispositivo cliente y se reenviaron por el canal LoRa. La corriente máxima consumida en este caso fue de aproximadamente 171 mA. El consumo total de energía del dispositivo se puede minimizar aún más ejecutando la configuración con 3,3 V en lugar de 5 V, como en nuestro experimento. La figura 11 muestra la corriente consumida por veinte mensajes.

VII. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

El sistema y los métodos (LoRaute) propuestos en este trabajo ayudan a establecer comunicación TCP/IP y mensajería de texto a través de redes LoRa. El sistema implementa el nodo LoRa con capacidad multimodo y describe los mecanismos de enrutamiento de mensajes para una red LoRa que sirve como backhaul de la capa TCP/IP superior. Se experimentó con LoRaute y se implementó en una configuración de mensajería real. Este trabajo ilustró las observaciones en detalle. El sistema reenvía eficientemente los mensajes recibidos a través de WiFi al canal LoRa. El nodo LoRaute consume una corriente máxima de 171 mA cuando la radio WiFi recibe los mensajes y la radio LoRa los transmite durante

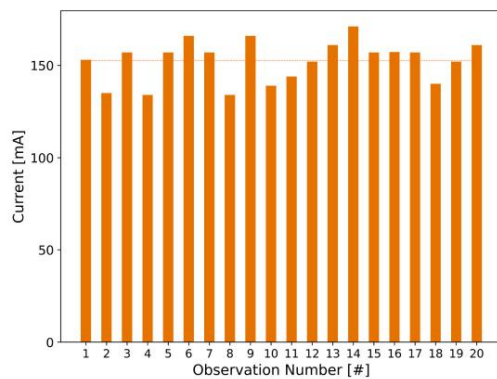


Fig. 11. Corriente consumida al reenviar mensajes recibidos a través de WiFi al canal LoRa.

mayor propagación. El consumo actual general del sistema es menor en un sitio de puesta en servicio real ya que la frecuencia de los mensajes a través de WiFi será menor. Además, el nodo LoRaute solo tarda aproximadamente 25 ms en reenviar los mensajes a través del puente WiFi y LoRa. Como trabajo futuro, los autores pretenden habilitar la transmisión de imágenes a través de la red de retorno LoRa, permitiendo una experiencia de mensajería mejorada para el

usuario.

REFERENCIAS

- [1] MA Jamshed, K. Ali, QH Abbasi, MA Imran y M. Ur-Rehman, "Desafíos, aplicaciones y futuro de los sensores inalámbricos en Internet de las cosas: una revisión", *IEEE Sensors J.*, vol. 22, núm. 6, págs. 5482–5494, marzo de 2022.
- [2] O. Afisiadis, S. Li, J. Tapparel, A. Burg y A. Balatsoukas-Stimming, "Sobre las ventajas de la detección coherente de LoRa en presencia de interferencias", *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, núm. 14, págs. 11581–11593, julio de 2021.
- [3] H. Ma, Y. Fang, G. Cai, G. Han y Y. Li, "Un nuevo sistema LoRa de índice de bin de frecuencia para transmisión de alta velocidad de datos: análisis de diseño y rendimiento", *IEEE Internet Cosas J.*, vol. 9, núm. 14, págs. 12515–12528, julio de 2022.
- [4] E. Sisinni et al., "Extensor de alcance LoRaWAN para IoT industrial", *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 16, núm. 8, págs. 5607–5616, agosto. 2020.
- [5] B. Citoni, S. Ansari, QH Abbasi, MA Imran y S. Hussain, "Análisis comparativo de una implementación urbana de LoRaWAN: mundo real versus simulación", *IEEE Sensors J.*, vol. 22, núm. 17, págs. 17216–17223, septiembre. 2022.
- [6] M. Vigil-Hayes, MN Hossain, AK Elliott, EM Belding y E. Zegura, "LoRaX: Reutilización de LoRa como un sistema de mensajería de baja velocidad de datos para extender los límites de Internet", en *Proc. ACM SIGCAS/SIGCHI Conf. Computadora. Sosten. Soc. (BRÚJULA)*, 2022, págs. 195–213.
- [7] AM Cardenas, MKN Pinto, E. Pietrosevoli, M. Zennaro, M. Rainone y P. Manzoni, "Un sistema de mensajería de bajo costo y bajo consumo basado en la tecnología inalámbrica LoRa", *Mobile Netw. Aplicación*, vol. 25, págs. 961–968, junio de 2020.
- [8] JJ Astrain, F. Falcone, AJ López-Martín, P. Sanchis, J. Villadangos e IR Matías, "Monitoreo de autobuses eléctricos dentro de un entorno urbano inteligente", *IEEE Sensors J.*, vol. 22, núm. 12, págs. 11364–11372, junio de 2022.
- [9] F. Wu, C. Qiu, T. Wu y M. R. Yu, "Implementación de sistemas híbridos basados en el borde para aplicaciones de IoT de salud y seguridad de largo alcance", *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, núm. 12, págs. 9970–9980, junio de 2021.
- [10] S. Gao, X. Zhang, C. Du y Q. Ji, "Una red multicanal de área amplia de baja potencia con capacidad de sincronización de alta precisión para el monitoreo de vibraciones de máquinas", *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, núm. 3, págs. 5040–5047, junio de 2019.
- [11] R. P. Centelles, F. Freitag, R. Meseguer y L. Navarro, "Más allá de la estrella de las estrellas: una introducción al multisalto y la malla para LoRa y LoRaWAN", *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 20, núm. 2, págs. 63–72, abril/junio. 2021.
- [12] MS Aslam et al., "Explorando LoRa de múltiples saltos para ciudades verdes e inteligentes", *Red IEEE*, vol. 34, núm. 2, págs. 225–231, marzo/abril. 2020.
- [13] H.-C. Lee y K.-H. Ke, "Monitoreo de sensores de IoT de gran área utilizando un sistema de red de malla inalámbrica LoRa: diseño y evaluación", *IEEE Trans. Instrumento. Medida*, vol. 67, núm. 9, págs. 2177–2187, septiembre. 2018.
- [14] O. Georgiou y U. Raza, "Análisis de redes de área amplia de baja potencia: ¿Puede LoRa escalar?" *Comunicaciones inalámbricas IEEE. Lett.*, vol. 6, núm. 2, págs. 162–165, abril de 2017.
- [15] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen y W. M. Townsley, "Un estudio de LoRa: redes de largo alcance y baja potencia para Internet de las cosas", *Sensores*, vol. 16, núm. 9, pág. 1466, 2016.
- [16] J. P. S. Sundaram, W. Du y Z. Zhao, "Una encuesta sobre redes LoRa: problemas de investigación, soluciones actuales y cuestiones abiertas", *IEEE Commun. Encuestas Tuts.*, vol. 22, núm. 1, págs. 371–388, primer trimestre de 2020.
- [17] MO Farooq, "Protocolo de comunicación de múltiples saltos para LoRa con extensión de red definida por software", *Internet Things*, vol. 14 de junio de 2021, art. 100379.
- [18] S. Lee, J. Lee, H.-S. Park y J. K. Choi, "Un novedoso esquema de control de retransmisión, justo y escalable para Internet de las cosas en redes de área amplia de baja potencia basadas en LoRa", *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, núm. 7, págs. 5985–6001, abril de 2021.
- [19] B. Paul, "Un nuevo esquema de enrutamiento energéticamente eficiente para redes LoRa", *Sensores IEEE J.*, vol. 20, núm. 15, págs. 8858–8866, agosto. 2020.
- [20] S. Feng, J. Chen y Z. Zhao, "Enrutamiento rentable en redes LoRa de múltiples saltos a gran escala", en *Proc. Conferencia IEEE INFOCOM. Computadora. Comunitario. Talleres (INFOCOM WKSHPS)*, 2022, págs. 1–6.
- [21] S. Hong, F. Yao, Y. Ding y S.-H. Yang, "Un protocolo de enrutamiento energéticamente eficiente basado en jerarquías para redes de malla LoRa", *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, núm. 22, págs. 22836–22849, noviembre de 2022.
- [22] M. Calle, G. Berdugo, J. C. Vélez y J. Kabara, "MACGSP6: Un protocolo para soportar aplicaciones de Internet de las cosas con enlaces sin línea de visión", *Comput. Electo. Ing.*, vol. 58, págs. 76–87, febrero de 2017.
- [23] A. Osorio, M. Calle, J. Soto y J. E. Candelo-Becerra, "Rutas en LoRa para ciudades inteligentes: un estudio de chismes", *Future Gener. Computadora. Sistema*, vol. 136, págs. 84–92, noviembre de 2022.
- [24] S. Gao, F. Shang y C. Du, "Diseño de red de área amplia de baja potencia multicanal y multisalto para el monitoreo de vibraciones de aeronaves", *IEEE Trans. Instrumento. Medida*, vol. 68, núm. 12, págs. 4887–4895, diciembre de 2019.
- [25] J. M. Solé, R. P. Centelles, F. Freitag y R. Meseguer, "Implementación de una biblioteca de malla LoRa", *IEEE Access*, vol. 10, págs. 113158–113171, 2022.
- [26] AM Cardenas, MKN Pinto, E. Pietrosevoli, M. Zennaro, M. Rainone y P. Manzoni, "Un sistema de mensajería sostenible habilitado por LoRa para comunidades aisladas", en *Proc. 4ª Conferencia Internacional de la EAI. Tecnología de objetos inteligentes. Bien Social*, 2018, págs. 118–123.