



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

TESIS DE GRADO

Evaluar la posibilidad de reducir las latencias entre nodos en una red de malla inalámbrica basada en RPL

Autor

Chiara CIRIANI

Tutor

J. Ignacio ALVAREZ-HAMELIN

Co-tutor

Georgios Z. PAPADOPOULOS

17 de noviembre de 2024

« You don't have to see the whole staircase, just take the first step. »

Martin Luther King Jr.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me acompañaron durante la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradezco a mis tutores de tesis, Juan Ignacio y Georgios, por su guía, paciencia y compromiso a lo largo de todo el proceso. Sus aportes fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Agradezco también a mis profesores y compañeros de la Facultad de Ingeniería, con quienes compartí ideas, discusiones y aprendizajes que enriquecieron esta investigación.

A mi familia, por su apoyo incondicional, por creer en mí y sostenerme en los momentos difíciles.

A mis amigos y amigas, por estar siempre, por los ánimos, los cafés, las distracciones necesarias y por recordarme que no estaba sola en esto.

Finalmente, gracias a todas las personas que de alguna manera formaron parte de este camino.

Resumen

A medida que las ciudades buscan reducir su consumo energético asociado al alumbrado público, las tecnologías de redes *Internet of Things (IoT)* permiten implementar mecanismos más eficientes para controlar las luminarias. En particular, estas pueden ser atenuadas o apagadas cuando no se detecta movimiento, y encenderse nuevamente ante la presencia de peatones o vehículos. Para lograrlo, todas las luminarias de una misma calle deben funcionar de forma coordinada, lo que exige un mecanismo de comunicación entre nodos altamente confiable y con baja latencia.

En este contexto, esta tesis analiza el problema de la latencia nodo a nodo en redes inalámbricas de baja potencia y con pérdidas —*Low-Power and Lossy Networks (LLNs)*—, y propone una solución basada en multicast utilizando el protocolo *IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)* sobre una red en malla inalámbrica, con *Wireless Smart Ubiquitous Network (Wi-SUN)* como tecnología de capa física y de enlace. La solución introduce dominios multicast para facilitar la comunicación directa entre nodos vecinos, reduciendo la dependencia del árbol DODAG para el envío de mensajes y mejorando así los tiempos de entrega y la entrega confiable de paquetes.

La propuesta se evalúa mediante simulaciones que modelan escenarios urbanos reales. Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa tanto en la latencia promedio como en la confiabilidad de la entrega de paquetes, en comparación con las soluciones tradicionales basadas en la versión estándar de RPL.

Este trabajo contribuye con una estrategia concreta para optimizar la comunicación entre dispositivos en redes IoT urbanas, abriendo además el camino a futuras mejoras en aplicaciones críticas como los sistemas de alumbrado público inteligente.

Palabras clave: redes de baja potencia y con pérdidas, RPL, Wi-SUN, multicast, dominios, latencia nodo a nodo, IoT urbano, sistemas de alumbrado público inteligente, entrega confiable de paquetes

Abstract

As cities strive to reduce the energy consumption associated with public lighting, *IoT* network technologies can be used to implement more efficient mechanisms for controlling streetlights. In particular, lights can be dimmed or turned off when no motion is detected, and switched on again when a pedestrian or vehicle is nearby. To achieve this behavior, all the streetlights on a given street must operate in a coordinated manner, which requires a highly reliable and low-latency node-to-node communication mechanism.

In this context, this thesis addresses the problem of node-to-node latency in *Low-Power and Lossy Networks (LLNs)* and proposes a multicast-based solution using the *RPL* protocol over a wireless mesh network, with *Wi-SUN* as the physical and link layer technology. The solution introduces multicast domains to facilitate direct communication between neighboring nodes, reducing the dependency on the DODAG tree for message forwarding and thus improving delivery times and reliable packet transmission.

The proposed mechanism is evaluated through simulations that replicate real urban environments. The results show a significant improvement in both average latency and delivery reliability when compared to traditional solutions based on the standard version of RPL.

This work contributes a concrete strategy to optimize communication between devices in urban IoT networks, while also paving the way for future enhancements in critical applications such as smart street lighting systems.

Keywords: Low-Power and Lossy Networks, RPL, Wi-SUN, multicast, domains, node-to-node latency, urban IoT, smart street lighting systems, reliable packet delivery

Índice general

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Abstract	ix
Índice de figuras	xiii
Índice de cuadros	xvii
1 Introducción	1
1.1 Internet de las Cosas (IoT)	1
1.2 Enrutamiento en el Internet de las Cosas: Desafíos y Surgimiento de RPL	2
1.3 Desafíos y Limitaciones del Protocolo RPL en Redes LLN	3
2 Estado del arte	7
2.1 RPL	7
2.1.1 Construcción del Destination-Oriented Directed Acyclic Graph (DO-DAG)	7
2.1.2 Modos de Operación de RPL (MOP)	9
2.1.3 Enrutamiento hacia abajo (Downwards routing) en RPL	11
2.1.4 Enrutamiento Peer-to-Peer en RPL	12
2.1.5 El problema	13
2.2 Estado de enrutamiento iniciado por la raíz en RPL	14
2.2.1 Terminología	14
2.2.2 Extensión del RFC 6650	15
Projected Destination Advertisement Object (DAO) (DAO Proyecto- tado)	15
2.2.3 Nuevas Opciones de Control en RPL (RPL Control Options)	16
Sibling Information Option (SIO)	16
VIA Information Options (VIO)	17
2.2.4 Ejemplo de Establecimiento de pistas con rutas proyectadas	18
2.2.5 Limitaciones	21
2.3 Protocolos de enrutamiento reactivos (bajo demanda)	22
2.3.1 P2P-RPL	22

2.3.2	AODV-RPL	23
2.3.3	Comparación entre P2P-RPL y AODV-RPL	24
2.4	Estrategias de enrutamiento para un grupo de nodos en una red mallada . .	26
2.4.1	Protocolos Reactivos	26
2.4.2	Métodos Basados en Ubicación	27
2.4.3	Modificaciones del protocolo RPL	27
2.5	Conclusiones	28
3	Peer to Peer MPL (P2P-MPL)	29
3.1	Planteamiento del problema	29
3.2	Solución propuesta: Peer-to-Peer MPL	30
3.3	Multicast Protocol for Low-Power and Lossy Networks (MPL)	32
3.3.1	Términos clave en Multicast Protocol for Low-Power and Lossy Networks (MPL)	34
3.3.2	Uso de MPL en peer-to-peer MPL (P2P-MPL)	34
3.3.3	Limitaciones del Protocolo MPL	35
3.4	Wi-SUN	35
3.4.1	Pila de protocolos de Wi-SUN	35
3.4.2	Capa MAC de Wi-SUN	36
3.4.3	Operación multicast de RPL en una red Wi-SUN FAN	37
3.5	Colección de datos	37
3.6	Formación del dominio	38
3.7	Instalación del dominio	45
3.8	Extensiones a la solución	47
3.8.1	Extensión	47
3.8.2	Implementación	48
3.9	Conclusiones	48
4	Resultados simulados de casos de estudio	51
4.1	Configuración de red	51
4.2	Soluciones basadas en una única ruta	55
4.2.1	Número de transmisiones	57
4.3	Protocolos de enrutamiento basados en rutas múltiples	58
4.3.1	Comunicación directa	59
	Número de transmisiones	60
	Fiabilidad	61
4.3.2	Alcance extendido	64
	Número de transmisiones	64
	Fiabilidad	65
4.4	Resultados de las simulaciones	66
5	Conclusión	67
5.1	Trabajo futuro	68
	Bibliografía	69

Índice de figuras

1.1	Diagrama ilustrativo del caso de uso en un sistema de iluminación inteligente.	4
1.2	Diagrama ilustrativo de un posible DODAG correspondiente a este caso de uso de una red de luminarias.	4
2.1	Un ejemplo del proceso de formación de un DODAG. El nodo raíz (nodo 30) transmite inicialmente el mensaje DODAG Information Object (DIO), luego los nodos 25 y 20 lo reciben, actualizan su padre preferido y transmiten sus propios mensajes DIO. El nodo 19 recibe el DIO del 25 por lo que repite el proceso y lo elige como padre preferido.	8
2.2	Patrones de tráfico soportados por RPL. Las líneas con flechas indican el flujo de tráfico, mientras que las líneas punteadas sin flechas representan los enlaces en la topología de enrutamiento.	9
2.3	Reenvío de mensajes peer-to-peer (P2P) utilizando el Modo de Operación 1 (MOP 1) y MOP 2. Las líneas con flechas indican el flujo de tráfico, mientras que las líneas punteadas sin flechas representan los enlaces de la topología de enrutamiento.	10
2.4	Los dos esquemas diferentes de enrutamiento descendente en RPL. (a) describe el enrutamiento descendente en el modo non-storing y (b) en el modo storing. El patrón “(7)” indica que el nodo 7 es el originador de ese conjunto de DAOs, y el número representa el orden lógico en el conjunto de DAOs. En ambos casos de enrutamiento descendente, solo se muestran los conjuntos de DAOs del nodo 7. Los demás nodos envían y procesan sus propios conjuntos de DAOs de la misma manera.	11
2.5	Un ejemplo de una pista y sus componentes. El nodo 0 es el ingreso de la pista mientras que el nodo 3 es el egreso.	14
2.6	Formatos del DAO Base Object y Projected DAO Base Object.	16
2.7	Formato del Sibling Information Option.	17
2.8	Formato del Via Information Option.	18
2.9	Un ejemplo de comunicación entre el nodo 0 y el nodo 4 usando el protocolo RPL estándar en modo de no almacenamiento. El mensaje debe llegar primero a la raíz antes de ser dirigido hacia el nodo destino.	19
2.10	Pista (track) instalada en el ejemplo. El nodo 1 es un salto laxo (loose hop) que es parte un carril (lane). Mediante el uso del mensaje Projected DAO se instalan cuatro segmentos.	21

2.11	La transmisión de un mensaje P2P desde el nodo 0 al nodo 2 está representada en la figura. Las líneas naranjas punteadas con una flecha indican la ruta creada por RPL, mientras que las líneas rosas sólidas con una flecha representan la ruta establecida por P2P-RPL.	23
2.12	Proceso de descubrimiento de ruta en P2P-RPL y AODV-RPL. En Figura 2.12d, se destaca la diferencia clave entre ambos enfoques: mientras que AODV-RPL admite rutas asimétricas, como se ilustra en la figura, P2P-RPL no lo hace, lo que impide el establecimiento de una ruta.	25
3.1	Un ejemplo de un DODAG de RPL desplegado para una aplicación de gestión de luminarias en un entorno urbano.	30
3.2	Red de ejemplo con cinco luminarias.	31
3.3	Dominio de ejemplo para la red presentada.	32
3.4	Pila de protocolos de Wi-SUN.	35
3.5	Ilustración de los horarios de canal para transmisiones unicast y broadcast en una red Wi-SUN Field Area Network (FAN).	36
3.6	Los diferentes métodos utilizados para construir un dominio de multidifusión con redundancia.	39
3.7	Vista ampliada de la red: luminarias seleccionadas y nodos adyacentes. . . .	40
3.8	Posibles caminos entre la luminaria 0 y la luminaria 2.	41
3.9	Red utilizada para calcular el segundo camino entre la luminaria 0 y la luminaria 2 utilizando la técnica de Eliminación de enlaces.	42
3.10	Posibles caminos entre la luminaria 0 y la luminaria 2.	42
3.11	Red utilizada para calcular el segundo camino entre la luminaria 0 y la luminaria 2 utilizando la técnica de Eliminación de nodos.	43
3.12	Vecinos en común entre las luminarias 0 y 1.	44
3.13	Dominios propuestos	44
3.14	Tres posibles estructuras de paquetes para transportar los Datos de Configuración de Dominio Multicast (Multicast Domain Configuration Data (MDCD)).	46
3.15	Persona saliendo de su casa.	48
4.1	Una topología de ejemplo utilizada para calcular el número total de mensajes enviados.	52
4.2	Ejemplo de formación del DODAG.	54
4.3	Ejemplo de envío de mensaje en un grupo de luminarias desde la luminaria 0 como origen al luminaria 1 para encenderlo. (a) muestra el envío usando la alternativa de RPL y (b) usando la versión con gateway.	55
4.4	Ejemplo de envío de mensaje en un grupo de luminarias desde la luminaria 0 como origen a todo el resto de las luminarias. (a) muestra el envío usando la alternativa de Ruyas Proyectadas y (b) usando la solución propuesta P2P-MPL.	56
4.5	Cumulative Distribution Function (CDF) del número de transmisiones para todos los enfoques considerados utilizando un solo camino. La diferencia entre ambas figuras es cuál farola es la fuente del mensaje.	57
4.6	CDF del número de transmisiones para todos los enfoques considerados utilizando rutas múltiples y comunicación directa. La diferencia entre ambas figuras es cuál farola es la fuente del mensaje.	60
4.7	CDF de la probabilidad de que todas las luminarias en el dominio reciban el mensaje de cualquier luminaria con los diferentes enfoques considerando rutas múltiples.	62

4.8	CDF del número de transmisiones para todos los enfoques considerando rutas múltiples y alcance extendido para la luminaria 0.	65
4.9	CDF del número de transmisiones para todos los enfoques considerando rutas múltiples y alcance extendido para la luminaria 5.	65

Índice de cuadros

4.1	Corte mínimo de aristas en los distintos dominios	63
4.2	Corte mínimo de vértices en los distintos dominios	63
4.3	Corte mínimo de aristas en los distintos dominios	66
4.4	Corte mínimo de vértices en los distintos dominios	66

Siglas

6LoWPAN IPv6 over Low-power Wireless Personal Area Networks. 2

BI Broadcast Interval. 37

CDF Cumulative Distribution Function. xiv, xv, 57, 58, 60, 62, 65

CoAP Constrained Application Protocol. 46

CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance. 36

DAO *Destination Advertisement Object*. xi, 8–12, 14–16, 18, 29, 31, 37, 38, 45, 51

DAO-ACK *Destination Advertisement Object Acknowledgement*. 9

DIO *DODAG Information Object*. xiii, 7–10, 22, 24, 25, 28, 29, 45, 52–54

DIS *DODAG Information Solicitation*. 8

DODAG *Destination-Oriented Directed Acyclic Graph*. vii, ix, xi, xiii, xiv, 3–5, 7–10, 12, 14, 15, 18, 19, 22–25, 29–31, 37, 39, 47, 51–55, 58, 59, 62

ETX Estimated Transmission Count. 51, 53

FAN Field Area Network. xiv, 29, 36, 37

FH Frequency Hopping. 36

IETF Internet Engineering Task Force. 2

IoT Internet of Things. vii, ix, 1–3, 5, 22–28, 35, 68

IPv6 Internet Protocol version 6. 2, 3, 7, 37

LLN Low-power and Lossy Network. 2–4, 7, 11, 22, 26–28, 33, 35, 67

MAC Medium Access Control. 36

MDCD *Multicast Domain Configuration Data*. xiv, 5, 45–47

MOP *RPL Mode Of Operation*. 9, 10

MPL *Multicast Protocol for Low-Power and Lossy Networks*. xii, 30, 32–35, 45

OF *Objective Function*. 7–9

P2P peer-to-peer. xiii, 1–5, 7, 9, 10, 12–14, 21–29, 58, 67, 68

P2P-MPL peer-to-peer MPL. xii, xiv, 30, 32, 34, 39, 48, 51, 55–59, 61, 63, 64, 67

PAN Personal Area Network. 36

PDR *Packet Delivery Ratio*. 38, 39, 41–44, 52, 58, 59, 62

RPL *IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*. vii, ix, xi, xiii, xiv, 1–5, 7–19, 21–31, 33, 35, 37, 39, 45, 47–49, 51, 52, 55, 56, 58, 59, 67

SIO *Sibling Information Option*. 16, 31, 37, 38, 40, 45

UDI Unicast Dwell Interval. 36

VIO *VIA Information Options*. 17

Wi-SUN Wireless Smart Ubiquitous Network. vii, ix, xiv, 35–37

WSN Wireless Sensor Networks. 2

Capítulo 1

Introducción

A medida que las ciudades de todo el mundo buscan controlar y reducir su consumo de energía dedicado a la iluminación pública, las tecnologías de redes IoT pueden emplearse para gestionar de manera eficiente las luminarias. En particular, cuando sea posible, las luces de calle podrían apagarse o atenuarse y volver a encenderse cuando se detecte la presencia de un peatón o un vehículo cercano. En una aplicación de este tipo, todas las luminarias de una calle deben funcionar como un grupo, lo que requiere un mecanismo de comunicación altamente confiable y de baja latencia. En este contexto, se propone una solución basada en multidifusión con RPL para la comunicación nodo a nodo en una red mallada inalámbrica, y la comparamos con soluciones de vanguardia, incluida la versión estándar de RPL.

En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales que constituyen la base de esta tesis, proporcionando un marco teórico necesario para comprender el problema abordado y la solución propuesta.

En primer lugar, se describe el impacto del Internet de las Cosas (*IoT*) en la evolución tecnológica, destacando cómo ha transformado múltiples industrias mediante la interconexión de dispositivos y la generación de datos en tiempo real.

Posteriormente, se introducen los desafíos específicos del enrutamiento en (*IoT*), explorando las dificultades técnicas que surgen al conectar dispositivos en entornos caracterizados por restricciones de energía, ancho de banda y confiabilidad. En este contexto, se presenta el Protocolo de Enrutamiento para Redes IPv6 de Baja Potencia y Alta Pérdida (RPL), enfatizando su origen, características y capacidad para abordar las necesidades de estas redes.

Finalmente, se examinan las limitaciones de RPL, particularmente en escenarios donde la comunicación entre pares (*P2P*) es fundamental. Estas limitaciones plantean el problema principal de esta tesis, motivando la búsqueda de una solución que permita mejorar la eficiencia y escalabilidad de las comunicaciones en redes malladas urbanas.

1.1 Internet de las Cosas (IoT)

El surgimiento del Internet de las Cosas marca una nueva era en la interconexión de dispositivos, donde objetos cotidianos, desde electrodomésticos hasta vehículos, se convierten en nodos activos dentro de la red. Esta conectividad masiva ha transformado sectores clave,

como la industria, la salud, y las ciudades inteligentes, permitiendo nuevas aplicaciones como el monitoreo remoto, la automatización, y la toma de decisiones en tiempo real basada en datos.

El concepto de IoT se basa en la presencia ubicua de una variedad de objetos y dispositivos que, al estar interconectados, pueden intercambiar información para alcanzar objetivos comunes. Este paradigma trasciende los límites de la tecnología, ya que combina desafíos técnicos con tareas sociales y empresariales. Entre sus aplicaciones destacan el monitoreo ambiental y personal, la planificación industrial, la agricultura de precisión, y los entornos inteligentes en ciudades, hogares y edificios.

Uno de los pilares fundamentales del IoT son las Redes de Sensores Inalámbricos, o en inglés *Wireless Sensor Networks (WSN)*, que permiten el desarrollo de aplicaciones capaces de captar diversas variables del entorno, como temperatura, humedad y luminosidad. Originalmente, la interoperabilidad entre estas redes y la infraestructura global de Internet era limitada debido a la ausencia de comunicación basada en IP. Sin embargo, con el objetivo de superar estas barreras, el grupo de trabajo *IPv6 over Low-power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN)*, creado en 2004 por la *Internet Engineering Task Force (IETF)* desarrolló un estándar que habilita el uso de *Internet Protocol version 6 (IPv6)* sobre redes IEEE 802.15.4.

Las contribuciones de 6LoWPAN permitieron la integración de dispositivos pequeños en redes basadas en IP, sentando las bases para el desarrollo de aplicaciones IoT. A partir de estas iniciativas, surgió en 2008 el grupo de trabajo RoLL (*Routing over Low-power and Lossy Networks*), dedicado a definir requisitos de enrutamiento para redes de baja potencia y alta pérdida (Low-power and Lossy Network (LLN)) en diversos escenarios, como entornos urbanos, industriales y de automatización doméstica.

El esfuerzo de este grupo culminó en 2012 con la estandarización del Protocolo de Enrutamiento para Redes IPv6 (RPL), descrito en la RFC 6550 [1]. Este protocolo proactivo, basado en árboles, establece grafos acíclicos dirigidos entre los nodos terminales y el nodo raíz. Aunque RPL es considerado un estándar en redes IoT, su diseño presenta limitaciones en ciertos escenarios, particularmente en aquellos donde la comunicación entre pares (P2P) es crítica, lo que ha impulsado la búsqueda de nuevas soluciones para superar estas restricciones.

1.2 Enrutamiento en el Internet de las Cosas: Desafíos y Surgimiento de RPL

El crecimiento del Internet de las Cosas ha generado una necesidad imperiosa de protocolos de enrutamiento diseñados específicamente para redes con recursos limitados y características desafiantes. En las LLN, los dispositivos suelen tener restricciones en términos de energía, capacidad de procesamiento y memoria, y las conexiones entre ellos son inherentemente inestables, lo que hace que las soluciones de enrutamiento tradicionales, como las utilizadas en redes cableadas o inalámbricas convencionales, sean inadecuadas.

En este contexto, el enrutamiento en IoT debe garantizar una comunicación eficiente y confiable entre los dispositivos, optimizando el uso de recursos escasos mientras maneja la dinámica constante de la topología de la red. Los protocolos diseñados para redes de alta capacidad, como OSPF o BGP, son demasiado complejos y costosos en términos de recursos para adaptarse a las limitaciones de las LLN. Por ello, surgió la necesidad de desarrollar protocolos específicos que pudieran abordar estos desafíos.

El Protocolo de Enrutamiento para Redes de Baja Potencia y Alta Pérdida (RPL, por sus siglas en inglés) fue creado por el IETF como una respuesta directa a esta necesidad. Publicado en el RFC 6550, RPL fue diseñado para proporcionar un enrutamiento eficiente en redes con topologías complejas y recursos limitados. Este protocolo utiliza un enfoque

basado en gráficos dirigidos acíclicos dirigidos por restricciones (DODAG) que permite la comunicación ascendente hacia un nodo raíz, típica en aplicaciones como la recolección de datos de sensores.

RPL se basa en métricas configurables y restricciones específicas de la red para construir rutas optimizadas, asegurando que el protocolo pueda adaptarse a diferentes aplicaciones de IoT, como redes de sensores ambientales o monitoreo industrial. Aunque su diseño es robusto para aplicaciones donde la comunicación es predominantemente jerárquica, como en la recolección de datos, su rendimiento es menos eficiente en escenarios de comunicación P2P, donde los dispositivos necesitan interactuar directamente entre sí sin pasar por el nodo raíz.

Esta limitación en el manejo de comunicaciones P2P es una motivación central para este trabajo, que propone soluciones complementarias para mejorar la eficiencia de RPL en aplicaciones como los sistemas de iluminación inteligente y otras redes urbanas complejas.

1.3 Desafíos y Limitaciones del Protocolo RPL en Redes LLN

Las redes de baja potencia y alta pérdida (LLN) han ganado relevancia en los últimos años debido a su aplicación en entornos como ciudades inteligentes, agricultura de precisión y sistemas industriales. Estas redes, compuestas por nodos con recursos limitados, deben ofrecer una comunicación confiable y eficiente en términos energéticos, enfrentando desafíos como altas tasas de pérdida de paquetes y restricciones de ancho de banda. En este contexto, el protocolo de enrutamiento para redes IPv6 (RPL) se ha establecido como un estándar ampliamente adoptado, debido a su capacidad de manejar las características de las LLN.

A pesar de su flexibilidad y eficiencia en muchas aplicaciones, el RPL presenta limitaciones en escenarios donde la comunicación entre pares (P2P) es esencial. Su diseño predeterminado, centrado en el enrutamiento a través de un nodo raíz, introduce latencias significativas y sobrecarga innecesaria en casos donde los nodos deben comunicarse directamente entre sí. Este problema es especialmente crítico en aplicaciones sensibles al tiempo, como los sistemas de iluminación inteligente en ciudades, donde las luminarias necesitan coordinar acciones de manera local, por ejemplo, sincronizando el encendido según la actividad en la vía pública.

En los entornos urbanos modernos, las redes no se limitan únicamente a luminarias inteligentes, sino que incluyen una amplia variedad de dispositivos conectados, como sensores de movimiento, estaciones de monitoreo ambiental, nodos de conectividad para vehículos e incluso dispositivos personales, como teléfonos móviles y wearables. Esta creciente diversidad de dispositivos refleja la expansión del Internet de las Cosas (IoT) en las ciudades inteligentes, donde la conectividad es clave para ofrecer servicios integrados y eficientes. La coexistencia de estos diferentes tipos de nodos, cada uno con características y requisitos específicos, resalta la necesidad de mecanismos de comunicación P2P que sean robustos, escalables y adaptables a diversas topologías y demandas de la red.

La Figura 1.1 muestra un diagrama ilustrativo del caso de estudio en un sistema de iluminación inteligente, donde se representan luminarias distribuidas a lo largo de una calle.

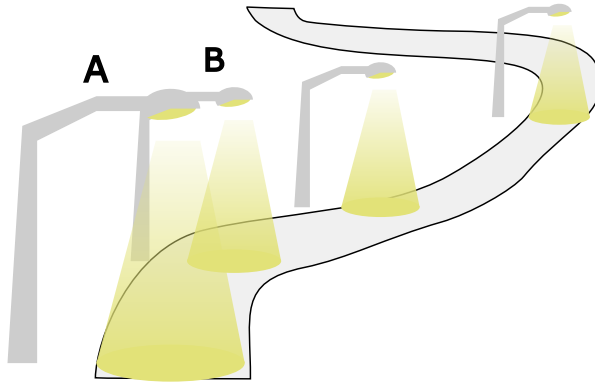


FIGURA 1.1: Diagrama ilustrativo del caso de uso en un sistema de iluminación inteligente.

En este escenario, todas las luminarias permanecen apagadas para optimizar el consumo energético, pero están equipadas con sensores de movimiento que les permiten encenderse al detectar actividad. Por ejemplo, cuando un automóvil pasa por la calle, la luminaria A detecta el movimiento y se enciende. Para que esta funcionalidad sea efectiva, es crucial que las luminarias próximas a la luminaria A también se enciendan antes de que el automóvil pase por ellas. Para lograr esto, la luminaria A debe notificar a las demás luminarias cercanas.

Aunque este mecanismo puede parecer sencillo, en redes basadas en RPL, la comunicación punto a punto (P2P) no es eficiente. La Figura 1.2 ilustra un posible DODAG correspondiente a la red de luminarias en este caso de uso.

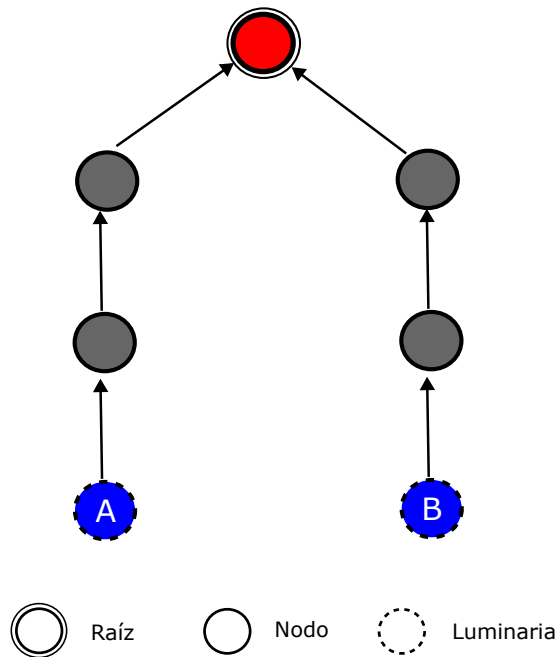


FIGURA 1.2: Diagrama ilustrativo de un posible DODAG correspondiente a este caso de uso de una red de luminarias.

En redes de baja potencia y recursos limitados (LLNs), como el caso de estudio, el único nodo con suficiente capacidad de memoria es la raíz de la red. Según el protocolo RPL, si la luminaria A necesita comunicarse con la luminaria B, el mensaje debe ser

enviado primero a la raíz ascendiendo por el árbol del DODAG. Posteriormente, la raíz reenvía el mensaje hacia la luminaria B descendiendo por el árbol. En redes IoT modernas, donde existe una gran variedad de dispositivos conectados, la densidad de nodos entre las luminarias y la raíz puede ser considerable, lo que incrementa significativamente la latencia de la comunicación P2P.

En este ejemplo, aunque la altura del árbol es relativamente baja para simplificar el caso, se puede observar claramente la ineficiencia de la comunicación P2P en RPL. Incluso con solo dos nodos entre las luminarias y la raíz, el protocolo requiere un número significativo de transmisiones. En lugar de que la luminaria A se comunique directamente con la luminaria B mediante una única transmisión, son necesarias seis transmisiones: tres para que el mensaje ascienda hasta la raíz y otras tres para que descienda desde la raíz hasta la luminaria B. Este comportamiento resalta las limitaciones de RPL en escenarios P2P.

Dado este contexto, la motivación principal de esta investigación es desarrollar una solución que mejore la comunicación P2P en redes basadas en RPL, con el objetivo de reducir la latencia y optimizar el desempeño en escenarios como el presentado.

Esta tesis propone una solución genérica para mejorar la comunicación P2P en redes malladas, basada en la creación dinámica de dominios dentro de la red. En este caso de estudio, esta solución se emplea en un sistema de iluminación inteligente, donde las luminarias se organizan en dominios y utilizan comunicación multicast basada en RPL para intercambiar mensajes directamente dentro del mismo dominio, evitando el nodo raíz. Este enfoque no solo reduce la latencia y el overhead, sino que también permite una operación más robusta y escalable en redes urbanas complejas.

Las contribuciones de esta tesis son las siguientes:

1. Se propone un marco centralizado, donde los nodos envían la lista de sus vecinos y la calidad de enlace correspondiente a un nodo central que, dada una lista de grupos de nodos que deben intercambiar comunicaciones P2P, determina los dominios de multidifusión de RPL.
2. Se proponen tres algoritmos para construir estos dominios.
3. Se define un nuevo mensaje a nivel de aplicación llamado Datos de Configuración de Dominio Multicast, o en inglés *MDCD*, que permite la instalación del dominio de multidifusión previamente diseñado.
4. Se evalúa el rendimiento de los algoritmos propuestos y se compara con otras soluciones mediante un programa de resolución que se implementó.

La estructura de esta tesis es la siguiente: en el Capítulo 2 (Estado del arte), se revisan los antecedentes técnicos y los trabajos relacionados que sirven como base para esta investigación, con un enfoque en los protocolos de enrutamiento existentes, incluido RPL, y sus aplicaciones en redes malladas. El Capítulo 3 (Peer to Peer MPL (P2P-MPL)) aborda el problema de la comunicación eficiente entre nodos en redes malladas y describe detalladamente la solución propuesta para optimizar esta comunicación. A continuación, el Capítulo 4 (Resultados simulados de casos de estudio) presenta una evaluación del desempeño de la solución propuesta, comparándola con técnicas representativas del Estado del arte en el contexto de redes malladas. Finalmente, en el Capítulo 5 (Conclusión), se sintetizan las conclusiones obtenidas y se proponen posibles líneas futuras de investigación.

Capítulo 2

Estado del arte

Este capítulo explora las estrategias y protocolos de enrutamiento diseñados para mejorar el soporte de comunicación P2P en redes de baja potencia y pérdida (LLN). Primero, se explicará en detalle el protocolo de enrutamiento RPL y, luego, una modificación que se le hizo al mismo denominada Estado de enrutamiento iniciado por la raíz. Posteriormente, a través de una revisión detallada, se comparan dos enfoques clave, P2P-RPL y AODV-RPL, junto con alternativas recientes como métodos basados en ubicación y modificaciones al protocolo RPL. El objetivo es analizar sus fortalezas, limitaciones y áreas de aplicación en el contexto de redes IoT, donde la optimización de recursos y la adaptabilidad a condiciones dinámicas son esenciales.

2.1 RPL

RPL, especificado en RFC 6550 [1], es un protocolo de enrutamiento por vector de distancia diseñado para redes IPv6, adaptado específicamente para redes de bajo consumo y con pérdida de datos, como las redes de sensores inalámbricos. Utiliza una estrategia distribuida de gestión de topología, lo que implica que todos los nodos enrutadores participan en la gestión de la topología mediante una Función Objetivo (en inglés *Objective Function* (*OF*)) para calcular su rango (o *rank* en inglés). El rango es un valor que representa la distancia de un nodo a la raíz.

Los nodos intentan reducir su rango eligiendo como nodo padre al que les permita disminuir su valor. El rango que tendría un nodo al seleccionar a otro como padre se calcula tomando el rango de ese nodo potencial y sumándole un valor que depende de la calidad del enlace con él, según lo evalúa la función objetivo. Como resultado, esta distancia a la raíz considera varios factores, principalmente el número de saltos y la calidad del enlace. La topología resultante de estas decisiones forma un Grafo Acíclico Dirigido Orientado al Destino (en inglés *DODAG*), lo que significa que es un grafo, sin bucles, orientado hacia el nodo raíz.

2.1.1 Construcción del DODAG

RPL define varios mensajes de control para construir y mantener la topología de la red:

- **DIO:** Anuncia la presencia y configuración de un DODAG.

- **DODAG Information Solicitation (DIS):** Solicita información sobre el DODAG a los nodos cercanos.
- **DAO:** Propaga información de destino hacia arriba para garantizar el enrutamiento hacia abajo.

En el funcionamiento de RPL, los nodos de la red construyen inicialmente el DODAG. En este primer paso, el nodo raíz inicia el proceso de construcción de DODAG enviando un mensaje DIO a sus vecinos. Este mensaje contiene información relevante como el rango del nodo, el modo de operación, la Función Objetivo (OF) y métricas. Cada nodo que recibe un mensaje DIO debe procesarlo y decidir si unirse o no al DODAG según la OF empleada. Si un nodo decide unirse al DODAG, tiene un camino ascendente hacia el nodo raíz. En ese momento, el nodo calcula su rango, actualiza su tabla de vecinos y elige su nodo padre preferido, que se utilizará para enviar mensajes hacia el nodo raíz del DODAG. Generalmente, el padre preferido es el vecino con el rango más bajo según la OF.

RPL permite que un nuevo nodo se una a la red en cualquier momento. En este caso, el nuevo nodo utiliza un mensaje DIS para solicitar un mensaje DIO de un nodo ya incorporado al DODAG. Al recibir el mensaje DIO, el nuevo nodo selecciona su padre preferido de acuerdo con la OF.

Además, el mensaje DIO se utiliza en el mantenimiento del DODAG. Basado en el Trickle Timer (definido en RFC6206 [2]), los nodos envían periódicamente mensajes DIO para mantener la estabilidad de la red.

La Figura 2.1 ilustra el proceso de formación del DODAG.

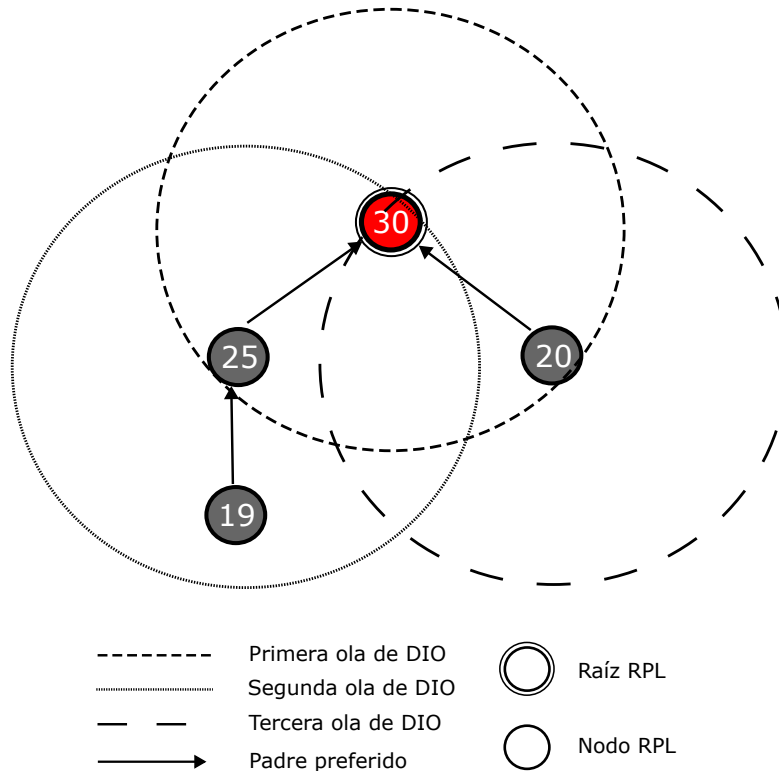


FIGURA 2.1: Un ejemplo del proceso de formación de un DODAG. El nodo raíz (nodo 30) transmite inicialmente el mensaje DIO, luego los nodos 25 y 20 lo reciben, actualizan su padre preferido y transmiten sus propios mensajes DIO. El nodo 19 recibe el DIO del 25 por lo que repite el proceso y lo elige como padre preferido.

RPL permite rutas tanto hacia arriba (del nodo a su padre) como hacia abajo (del nodo a sus hijos). Las rutas ascendentes se crean naturalmente durante el proceso inicial de envío de mensajes DIO. Sin embargo, el uso de rutas descendentes requiere el manejo de mensajes DAO. Los nodos del DODAG procesan los mensajes DAO de acuerdo con el Modo de Operación de RPL (o en inglés *RPL Mode Of Operation (MOP)*). Independientemente del MOP utilizado, los mensajes DAO pueden requerir confirmación de recepción, que debe realizarse mediante mensajes Destination Advertisement Object Acknowledgement (DAO-ACK).

Aunque RPL está diseñado para el patrón de tráfico de Multipunto a Punto (MP2P), también admite el reenvío de datos mediante los patrones Punto a Multipunto (P2MP) y Punto a Punto (P2P). En el tráfico MP2P, los nodos envían mensajes de datos al nodo raíz, creando un flujo ascendente (Figura 2.1a). En el tráfico P2MP, a veces llamado multicast, el nodo raíz envía mensajes de datos a los otros nodos, produciendo un flujo descendente (Figura 2.1b). En el tráfico P2P, un nodo envía mensajes a otro nodo (no raíz) del DODAG, por lo tanto, puede ser necesario el reenvío tanto hacia arriba como hacia abajo (Figura 2.1c).

Estas diferentes modalidades de tráfico se ilustran en la Figura 2.2.

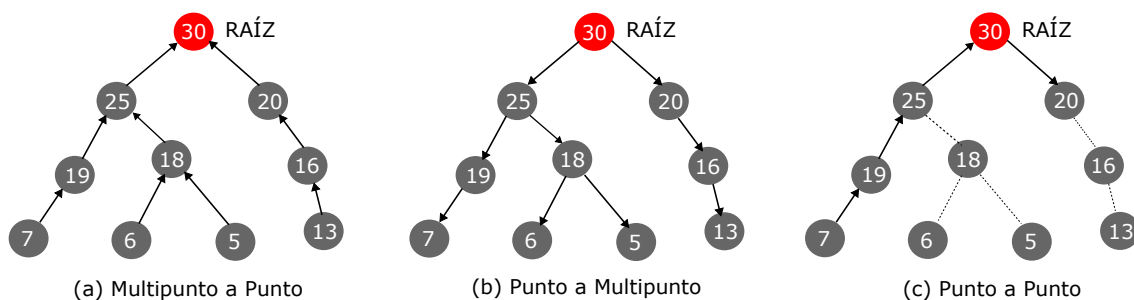


FIGURA 2.2: Patrones de tráfico soportados por RPL. Las líneas con flechas indican el flujo de tráfico, mientras que las líneas punteadas sin flechas representan los enlaces en la topología de enrutamiento.

En RPL, todo el proceso de construcción de DODAG depende en gran medida de la OF considerada en la red. Además, el rendimiento de la red está directamente relacionado con el proceso de selección de rutas. Según las métricas y restricciones aplicadas para seleccionar la mejor ruta entre un nodo y la raíz, es posible aumentar o disminuir el rendimiento de la red. Asimismo, como se ha mencionado, algunas aplicaciones requieren diferentes niveles de rendimiento en el protocolo de enrutamiento. Por ejemplo, las aplicaciones de e-health necesitan baja latencia y alta fiabilidad. Por otro lado, algunas aplicaciones pueden requerir bajo consumo de energía y movilidad, como las aplicaciones de monitoreo de animales. Por lo tanto, diferentes tipos de aplicaciones pueden necesitar diferentes OFs. Para cumplir con los requisitos de la aplicación, cada OF debe considerar las métricas o restricciones que mejor satisfagan estas condiciones. Basándose en la información de las OF, el nodo calcula el peso de cada camino hacia la raíz. De esta manera, la selección del padre preferido y el cálculo del rango se realizan según la OF. El IETF define, como estándar, dos funciones objetivo diferentes: la Función Objetivo Cero (OF0) y la Función Objetivo de Rango Mínimo con Histéresis (MRHOF).

2.1.2 Modos de Operación de RPL (MOP)

RPL define cuatro MOP que deben ser utilizados teniendo en cuenta el patrón de tráfico requerido por la aplicación y la capacidad computacional de los nodos.

1. **Sin rutas descendentes mantenidas por RPL (MOP 0):** RPL no mantiene rutas descendentes, permitiendo únicamente tráfico de Multipunto a Punto (MP2P). En otras palabras, los nodos solo pueden enrutar paquetes hacia arriba, en dirección al nodo raíz. Este modo es adecuado para aplicaciones que solo requieren que los datos fluyan de los nodos hacia la raíz, como la recolección de datos de sensores.
2. **Modo de Operación Sin Almacenamiento (MOP 1):** En el non-storing MOP, se admiten las rutas descendentes, y se permite el uso de los patrones de tráfico P2P y MP2P. Sin embargo, todas las rutas descendentes se mantienen en el nodo raíz. Así, el tráfico descendente total se envía primero al nodo raíz del DODAG y luego se reenvía a su destino, como se muestra en la Figura 2.3a. En este caso, los nodos no almacenan tablas de enrutamiento completas; en su lugar, solo almacenan información sobre sus padres y un conjunto de hijos, mientras que el nodo raíz mantiene la información completa de enrutamiento y es responsable de calcular las rutas. Cuando un paquete necesita ser reenviado, incluye encabezados de enrutamiento (*source routing headers*) que detallan toda la ruta hasta el destino. Este modo es adecuado para redes con recursos de memoria limitados, ya que reduce los requisitos de memoria en los nodos intermedios.
3. **Modo de Operación con Almacenamiento (Storing Mode) sin soporte multicast (MOP 2):** Las rutas descendentes también se admiten, pero, a diferencia del MOP 1, los nodos mantienen, de forma individual, una tabla de enrutamiento construida mediante mensajes DAO para manejar el tráfico descendente. Así, el reenvío descendente se realiza sin necesidad de pasar por el nodo raíz, como se ilustra en la Figura 2.3b.
4. **Modo de Operación con Almacenamiento (Storing Mode) y soporte multicast (MOP 3):** El MOP con almacenamiento y soporte multicast funciona de manera similar al MOP 2, con la diferencia de que permite el envío de datos multicast. Este tipo de transmisión permite que un nodo no raíz envíe mensajes a un grupo de nodos formado mediante DAOs multicast.

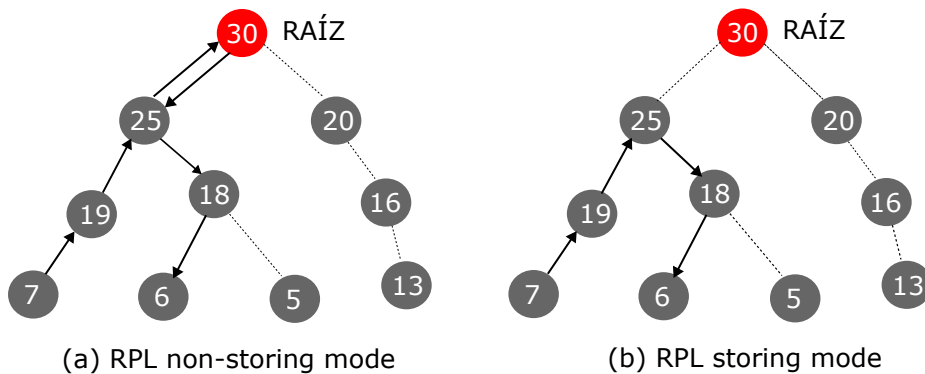


FIGURA 2.3: Reenvío de mensajes P2P utilizando el Modo de Operación 1 (MOP 1) y MOP 2. Las líneas con flechas indican el flujo de tráfico, mientras que las líneas punteadas sin flechas representan los enlaces de la topología de enrutamiento.

Tanto los mensajes DIO como DAO se envían periódicamente para adaptarse a la dinámica de la red, y los mensajes DAO permiten que el nodo raíz del DODAG tenga una vista completa y actualizada de la información de rutas entre padres e hijos en la red.

La decisión de un nodo intermedio de actualizar su tabla de enrutamiento basada en un mensaje DAO depende del modo de enrutamiento descendente en la instancia de RPL.

2.1.3 Enrutamiento hacia abajo (Downwards routing) en RPL

RPL ofrece dos modos de soporte para el enrutamiento hacia abajo: almacenamiento y no almacenamiento (*storing* y *non-storing*).

El modo de almacenamiento (*storing*) es similar al funcionamiento de los routers IP tradicionales; cada nodo almacena la información del siguiente salto hacia los nodos en su subárbol. Este modo tiene la ventaja de generar un menor overhead en los paquetes y un comportamiento de reenvío IP más intuitivo, pero a cambio requiere una memoria significativa para la tabla de enrutamiento en dispositivos embebidos con recursos limitados. Un nodo más cercano a la raíz necesitaría $O(N)$ entradas en la tabla de enrutamiento en el peor de los casos, correspondientes al tamaño total de la red.

Por otro lado, los nodos en el modo no almacenamiento (*non-storing*) no almacenan información de rutas, excepto la de su nodo padre, y solo la raíz mantiene la información completa de la topología. Cuando un paquete se enruta hacia abajo, se utiliza un método de *source-routing* (enrutamiento por origen) que comienza desde la raíz y solo la raíz es responsable de este enrutamiento. A pesar del aumento y la variabilidad del overhead de los paquetes debido a las opciones de encabezado de IPv6 por el uso de source-routing (que agrega toda la información del camino en el encabezado), el modo no almacenamiento es más popular en redes de área local de baja potencia (LLN, por sus siglas en inglés) debido a su ventaja de requerir una memoria constante $O(1)$ en los nodos embebidos.

Los dos esquemas de enrutamiento hacia abajo, modo de almacenamiento y modo sin almacenamiento, se ilustran en la Figura 2.4.

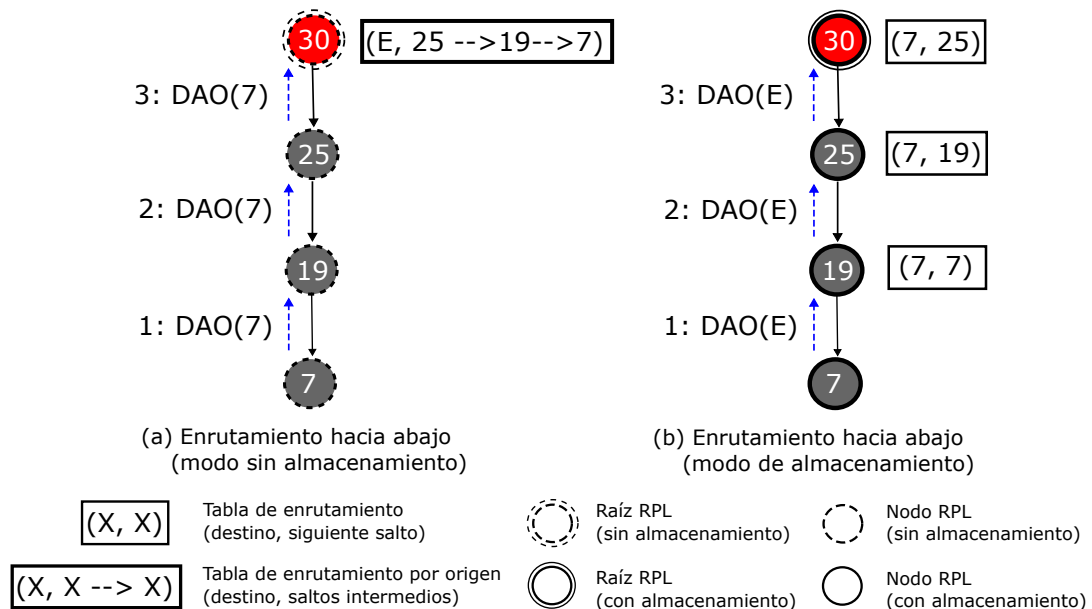


FIGURA 2.4: Los dos esquemas diferentes de enrutamiento descendente en RPL. (a) describe el enrutamiento descendente en el modo non-storing y (b) en el modo storing. El patrón “(7)” indica que el nodo 7 es el originador de ese conjunto de DAOs, y el número representa el orden lógico en el conjunto de DAOs. En ambos casos de enrutamiento descendente, solo se muestran los conjuntos de DAOs del nodo 7. Los demás nodos envían y procesan sus propios conjuntos de DAOs de la misma manera.

En el modo no almacenamiento, cada nodo unido al DODAG envía un mensaje DAO unicast a su nodo padre preferido. Sin embargo, el receptor del mensaje DAO es la raíz. Durante el camino, todos los nodos intermedios no almacenan ni procesan el mensaje; simplemente lo reenviarán a sus nodos padres preferidos hasta que llegue a la raíz. Luego, la raíz almacena la información relacionada con la fuente original del DAO. En detalle, esta información relacionada contiene las direcciones IPv6 del nodo fuente original del DAO y de su nodo padre preferido. Basándose en esta información, que se recoge de cada nodo, la raíz genera un encabezado de enrutamiento por origen para permitir el enrutamiento hacia abajo. Por ejemplo, en la Figura 2.4a, el nodo 7 comienza a establecer su enrutamiento hacia abajo. Primero, envía un DAO al nodo padre preferido 19, luego los nodos 19 y 25, uno tras otro, reenvían ese DAO al nodo raíz 30. De esta manera, el enrutamiento hacia abajo al nodo 7 se ha establecido a través de la tabla de enrutamiento por origen del nodo 30.

En cambio, en el modo de almacenamiento, el receptor del DAO es el nodo padre preferido del emisor, en lugar de la raíz. En este caso, el nodo padre preferido almacenará la información relacionada con el mensaje DAO entrante, y luego procesará un nuevo mensaje DAO hacia su propio nodo padre preferido. Este proceso se repetirá en cada nodo dentro del camino hasta que llegue a la raíz. Finalmente, la raíz recibe el mensaje DAO de sus nodos hijos. Cada nodo almacena la información de enrutamiento de su subárbol, lo que permite un esquema de enrutamiento *hop-by-hop* (salto a salto). La Figura 2.4b ilustra un ejemplo del proceso en el modo de almacenamiento para establecer un enrutamiento hacia abajo al nodo 7, así como los cambios correspondientes en la tabla de enrutamiento de cada nodo intermedio. La combinación de todas las tablas de enrutamiento de los nodos relacionados conforma el camino de enrutamiento hacia abajo hasta el nodo 7.

2.1.4 Enrutamiento Peer-to-Peer en RPL

El protocolo RPL (*Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*) no implementa un mecanismo separado para el enrutamiento *peer-to-peer* (P2P). En su lugar, el enrutamiento entre pares se logra de manera natural y transparente mediante la estructura de enrutamiento ascendente y descendente, basada en la dirección IPv6, que caracteriza a RPL. Cuando un nodo envía un paquete hacia otro nodo par, el paquete inicialmente asciende en dirección a la raíz de la red, y luego desciende cuando encuentra un nodo que posee una entrada de dirección en su tabla de enrutamiento que corresponde al destino del paquete. De este modo, el desempeño de la comunicación P2P depende del modo operativo de RPL en uso, ya sea de almacenamiento o no almacenamiento (*storing* o *non-storing*).

En modo de almacenamiento (*storing mode*), los nodos intermedios almacenan información de enrutamiento, lo que permite que el paquete cambie de dirección en un nodo ancestro común entre el emisor y el receptor dentro del árbol de enrutamiento. Esta capacidad de redirigir el tráfico en puntos intermedios optimiza las rutas y reduce la latencia en la comunicación P2P. En de no almacenamiento (*non-storing mode*), sólo el nodo raíz almacena información de enrutamiento completa; por lo tanto, el paquete debe llegar primero a la raíz antes de ser dirigido hacia el nodo destino, lo que puede incrementar la latencia en comparación con el modo almacenado.

Por ejemplo, en la Figura 2.3 se ilustra un escenario en el cual los nodos 7 y 6 se comunican de manera peer-to-peer. Un paquete enviado desde el nodo 7 inicialmente asciende en el árbol y luego desciende hacia el nodo 6. En modo almacenado, el punto de inflexión es el nodo 25. En modo no almacenado, el paquete debe llegar primero al nodo raíz antes de redirigirse hacia el nodo 6.

2.1.5 El problema

El problema se evidencia en el ejemplo anterior 2.3: la comunicación P2P en RPL es ineficiente debido a la longitud de las rutas, que suelen ser más largas de lo necesario. En el caso de la comunicación entre los nodos 7 y 6, el modo de almacenamiento requiere 4 saltos (ruta 7-19-25-18-6), mientras que el modo de no almacenamiento requiere 6 saltos (ruta 7-19-25-Raíz-25-18-6), a pesar de que existe una ruta óptima de solo 1 salto (la ruta directa: 7-6). Esta ineficiencia se debe a que RPL no cuenta con un mecanismo separado para la construcción de rutas eficientes entre pares (P2P), sino que utiliza las rutas ascendentes y descendentes ya existentes. Como resultado, las rutas P2P son más largas de lo necesario. Esto no solo incrementa la latencia de extremo a extremo, sino también el número de transmisiones, lo cual aumenta el consumo de energía. Además, un número elevado de transmisiones incrementa la competencia en el canal inalámbrico, pudiendo causar congestión de la red, especialmente en los nodos de inflexión de una ruta P2P, que pueden convertirse en cuellos de botella. Esta carga adicional afecta principalmente a los nodos cercanos a la raíz y recarga de trabajo al nodo raíz, especialmente en el modo de no almacenamiento de RPL. Por lo tanto, resulta crucial resolver la ineficiencia en la comunicación P2P en RPL en modo de no almacenamiento.

La separación y exclusión mutua entre los modos de o almacenamiento y almacenamiento en RPL dificultan la implementación de la comunicación P2P entre nodos. En modo de no almacenamiento, el enrutamiento ascendente primero encuentra una ruta desde el nodo origen hasta el borde de la red (LBR), y luego se realiza un enrutamiento descendente desde el LBR hasta el nodo de destino. En modo de almacenamiento, el enrutamiento ascendente solo necesita encontrar un ancestro común (el nodo 25 en la Figura 2.3, por ejemplo) de los dos nodos que se comunican (nodos 7 y 6 en la Figura 2.3, por ejemplo); luego, se ejecuta un enrutamiento descendente hasta el nodo destino.

En esta tesis se propone resolver el problema de la comunicación P2P en RPL específicamente en el modo no almacenado.

El modo de no almacenamiento tiene como objetivo ahorrar espacio de memoria en dispositivos con recursos limitados, cuya restricción de memoria es considerable. Sin embargo, en este modo, el nodo LBR asume una gran carga al generar encabezados de enrutamiento para todos los nodos en la red RPL. Además, el tamaño de un encabezado de enrutamiento de origen es no solo más extenso, sino también variable (dependiendo de la profundidad de la ruta P2P), lo que genera una sobrecarga de comunicación y aumenta la complejidad de la lógica de procesamiento.

De manera más crítica, todas las comunicaciones P2P en modo de no almacenamiento deben pasar por el nodo LBR, lo que provoca que la ruta P2P sea, en muchos casos, innecesariamente larga. Este problema de rutas extensas reduce el rendimiento de transmisión en toda la red. En particular, en una red de malla densa, este problema se agrava, ya que la gran cantidad de transmisiones y retransmisiones pueden llevar a una congestión de la red.

Otro aspecto fundamental a considerar es que el modo de almacenamiento tampoco representa una solución definitiva. Si bien este modo puede evitar la sobrecarga de los encabezados de enrutamiento de origen y el problema de las rutas extensas, actúa de manera similar a la función de enrutamiento de almacenamiento y reenvío tradicional en Internet. Sin embargo, en este modo, cada nodo asume la responsabilidad de almacenar la información de enrutamiento de todos sus hijos en un subárbol. Si la red es de gran escala y las comunicaciones P2P son frecuentes, algunos nodos pueden quedarse sin espacio de memoria, lo que les impide soportar funciones a nivel de aplicación. Además, es posible que se pierda la información de rutas descendentes de algunos hijos debido a la falta de espacio para almacenarlas.

2.2 Estado de enrutamiento iniciado por la raíz en RPL

El borrador de la RFC¹ de estado de enrutamiento iniciado por la Raíz en RPL, también conocido como *Destination Advertisement Object (DAO) Projection Draft* [3], amplía las capacidades del RFC 6550, permitiendo que la raíz de RPL instale y mantenga rutas proyectadas dentro de un DODAG (*Destination Oriented Directed Acyclic Graph*). Estas rutas se establecen a través de un conjunto específico de nodos, que puede o no incluir a la raíz, y se mantienen durante un período de tiempo determinado.

El objetivo de este estándar es facilitar la comunicación P2P eficiente dentro de una red RPL. Para lograrlo, estas rutas están diseñadas para ofrecer una mejor optimización o mayor resiliencia en comparación con las rutas obtenidas a través de la operación estándar de RPL. Al permitir que la raíz gestione estas rutas, es posible crear trayectorias más optimizadas en términos de tamaño, latencia y tasa de entrega de paquetes. Esto se logra mediante la selección de nodos específicos para incluir en la ruta, en lugar de depender únicamente de la operación distribuida de RPL.

2.2.1 Terminología

Un camino (*path*) es una secuencia de puertas de enlace a través de la cual los paquetes se envían desde un host de origen hasta un host de destino. Este es unidireccional y se define entre dos nodos.

Este borrador introduce el concepto de pista (*track*), que representa una colección de caminos potenciales que utilizan estrategias de reenvío redundantes para mejorar la robustez de la transmisión de datos. Una pista puede contener múltiples caminos que se bifurcan y vuelven a unirse.

Básicamente, las pistas son DODAGs orientados hacia un ingreso (*Track Ingress*). La dirección de avance de los paquetes va desde el ingreso hacia uno de los posibles nodos de egreso (*Track Egress*), que se encuentra descendiendo en el DODAG. La pista puede estar estrictamente conectada (los nodos son adyacentes) o conectada de forma laxa (los nodos están conectados mediante segmentos asociados a la misma pista).

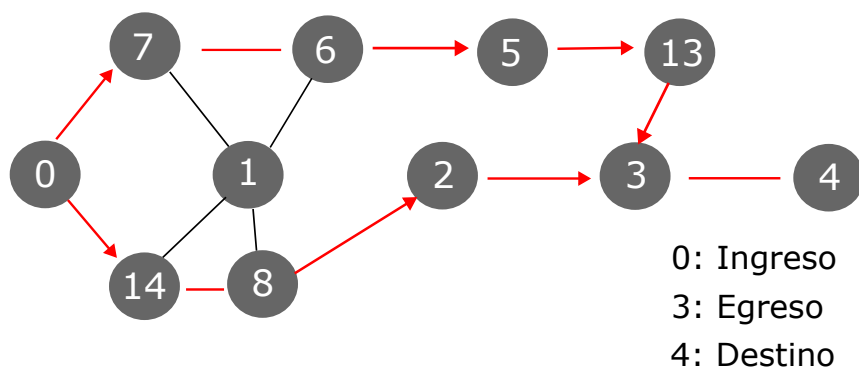


FIGURA 2.5: Un ejemplo de una pista y sus componentes. El nodo 0 es el ingreso de la pista mientras que el nodo 3 es el egreso.

La Figura 2.5 ilustra el mapeo de un DODAG (*Destination Oriented Directed Acyclic Graph*) con el concepto genérico de una pista, donde la raíz del DODAG actúa como el ingreso de la pista. El nodo 0 es el ingreso y el nodo 3 es el egreso de la pista.

¹En el contexto de estándares de Internet, un *Request for Comments (RFC)* es un documento formal que describe métodos, comportamientos, investigaciones o innovaciones técnicas aplicables a Internet y sistemas relacionados. Un borrador de RFC es una versión preliminar que propone nuevas especificaciones o modificaciones y está sujeto a revisión antes de ser adoptado como estándar.

También se muestran los carriles (*lanes*) y segmentos (*segments*) que son solo segmentos de avance, lo que significa que son direccionales y progresan hacia el destino.

Podemos observar de la figura que un segmento es un camino serial orientado desde el ingreso (este) al egreso (oeste), formado por una secuencia estricta de nodos a lo largo de la cual se instala una ruta proyectada (en inglés *Projected Route*). Por ejemplo, $1 \Rightarrow 6 \Rightarrow 5 \Rightarrow 13$ es un segmento que dirige hacia el nodo 4 como destino.

Mientras que un carril (*lane*) es un camino serial de avance de extremo a extremo. Por ejemplo, $0 \rightarrow 1 \rightarrow 3$ es un carril hacia el nodo 4 como destino.

Por lo tanto, una pista es un DODAG y representa la estructura o esqueleto de la red, mientras que un segmento se utiliza para unir los puntos dispersos que conforman la estructura de una pista.

2.2.2 Extensión del RFC 6650

Esta especificación extiende RPL para habilitar que la raíz instale rutas de avance dentro de un DODAG principal que opera en modo de no almacenamiento (Non-Storing).

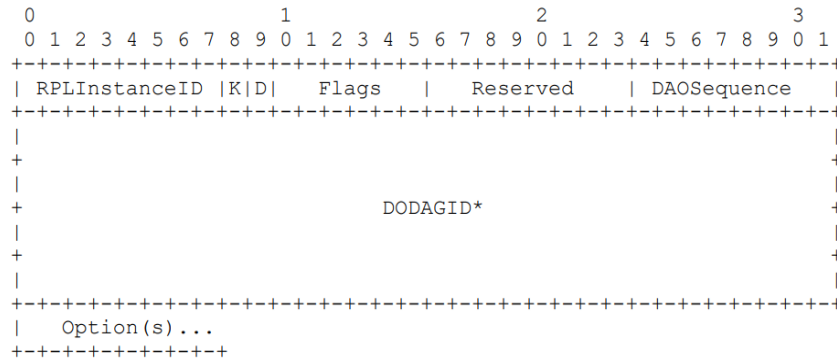
Projected DAO (DAO Proyectado)

En RPL, el *Destination Advertisement Object* (DAO) se utiliza para propagar la información de destino de forma ascendente a lo largo del DODAG. En modo de almacenamiento (*storing mode*), el mensaje DAO se envía mediante unicast del nodo hijo al padre seleccionado. En cambio, en modo de no almacenamiento (*non storing mode*), el mensaje DAO se envía mediante unicast a la raíz del DODAG. Un ejemplo de esto se puede observar en la Figura 2.4.

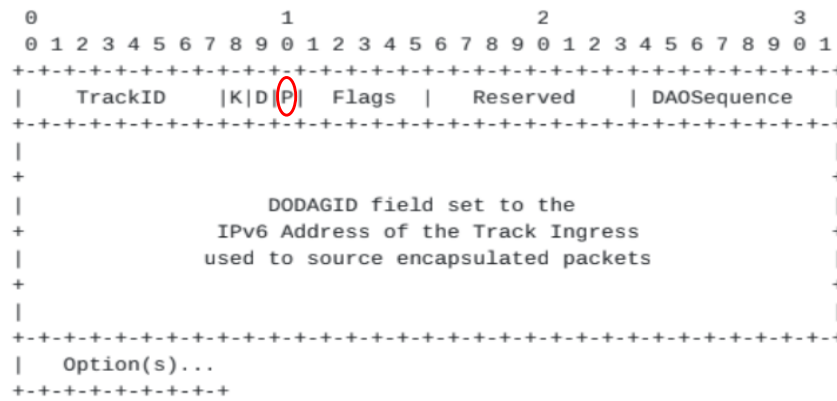
En el modo de no almacenamiento de RPL, los objetos *Target Information Object* (TIO) y *Reachability Target Object* (RTO) se combinan en un mensaje DAO para informar a la raíz del DODAG de todas las conexiones en el DODAG, que se forman mediante relaciones dirigidas entre padre e hijo. El mensaje DAO señala a la raíz que un padre dado puede ser utilizado para alcanzar a un hijo determinado.

Este borrador de rutas proyectadas enmienda la especificación del DAO para crear el mensaje P-DAO (Projected DAO). Este DAO modificado se señala con una nueva bandera "P" (Projected DAO). Esto se ilustra en la Figura 2.6.

Un Projected DAO (P-DAO) es un mensaje DAO especial generado por la raíz para instalar una Ruta Proyectada (*P-Route*), formada por múltiples saltos en su DODAG. Esta ruta es instalada y mantenida por la raíz del DODAG principal, y una pista está compuesta por la combinación de una o más ruta proyectada.



(a) The DAO Base Object



(b) Projected DAO Base Object

FIGURA 2.6: Formatos del DAO Base Object y Projected DAO Base Object.

2.2.3 Nuevas Opciones de Control en RPL (RPL Control Options)

Sibling Information Option (SIO)

Este borrador introduce extensiones de protocolo que amplían la información topológica disponible para la entidad centralizada (es decir, el nodo raíz), incorporando relaciones de hermanos entre nodos. Para habilitar la inclusión de esta información, el borrador establece un mecanismo que permite a los nodos anunciar datos adicionales de sus hermanos, enriqueciendo aún más la comprensión topológica de la entidad.

Específicamente, este documento amplía la *Control Message Option* (CMO) de los DAOs en RPL para introducir la Sibling Information Option (SIO). La SIO permite que un nodo consciente de RPL anuncie un subconjunto de sus vecinos candidatos como hermanos hacia la raíz. Esta opción se incorpora en los mensajes DAO, los cuales se envían directamente a la raíz en el modo de no almacenamiento. Si es necesario, múltiples SIOs pueden incluirse dentro de un único mensaje.

La SIO proporciona información sobre hermanos que el nodo raíz podría utilizar para formar rutas proyectadas. Uno o más SIOs pueden colocarse en los mensajes DAO que se envían a la raíz en el modo de no almacenamiento.

El formato de la SIO se ilustra en la Figura 2.7.



FIGURA 2.7: Formato del Sibling Information Option.

VIA Information Options (VIO)

Un *VIA Information Options (VIO)* señala la lista ordenada de direcciones Via IPv6 que constituye los saltos de un segmento de una pista. Un P-DAO en modo de almacenamiento contiene una *Storing Mode VIO (SM-VIO)*, mientras que un P-DAO en modo de no almacenamiento contiene una *Non-Storing Mode VIO (NSM-VIO)*.

Una SM-VIO instala una ruta proyectada estricta de salto a salto (*hop by hop*) llamada segmento (*segment*) de una pista. La NSM-VIO instala una ruta proyectada menos estricta, dirigida desde el origen, llamada carril (*lane*) en el ingreso de la pista (*track ingress*).

El formato de la Via Information Option se ilustra en la Figura 2.8.

La dirección Via Address es una dirección IPv6 ULA o GUA de un nodo a lo largo del segmento. La VIO contiene una o más direcciones IPv6 Via listadas en el orden del flujo de datos desde el Ingress hasta el Egress.

- En el caso de una SM-VIO, la lista indica un camino secuencial (estricto) a través de vecinos directos, comenzando en el ingreso y terminando en el egreso. Es decir, un segmento (*segment*).
- En el caso de una NSM-VIO, la lista completa puede ser laxa y excluye el nodo de ingreso, comenzando en el primer salto laxo y finalizando en un nodo de egreso. Es decir, un carril (*lane*).

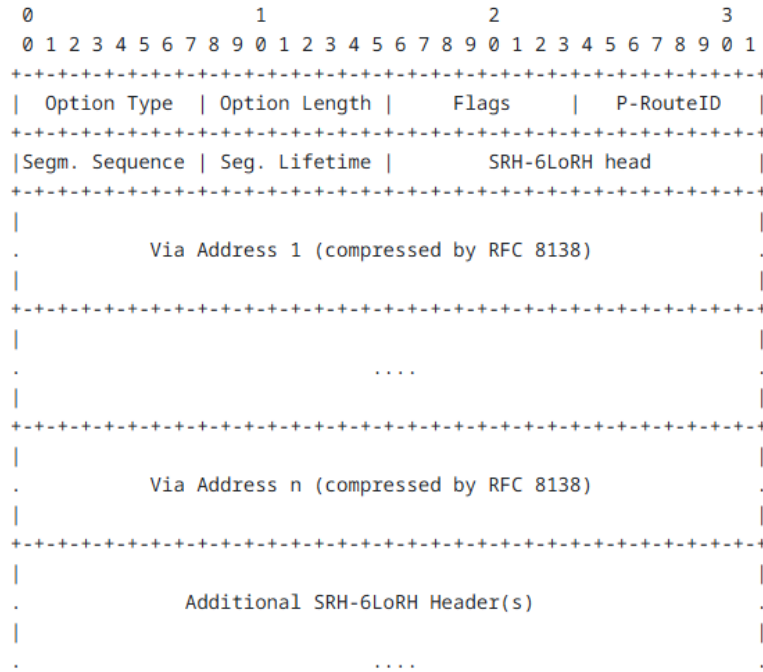


FIGURA 2.8: Formato del Via Information Option.

2.2.4 Ejemplo de Establecimiento de pistas con rutas proyectadas

Esta especificación amplía RPL para permitir que la raíz instale rutas de reenvío dentro de un DODAG principal que opera en modo de no almacenamiento. La raíz puede instalar una ruta proyectada mediante el uso de un mensaje DAO extendido, denominado Projected DAO (P-DAO). Una pista consiste en una combinación de una o más rutas proyectadas.

Un nodo ubicado en el ingreso de más de un segmento dentro de una pista tiene la capacidad de utilizar uno o más de estos segmentos para enrutar un paquete dentro de la pista.

Imaginemos una red donde el nodo 0 debe comunicarse con el nodo 4. Siguiendo el protocolo RPL estándar, cuando el nodo 0 envía un mensaje al 4, este mensaje necesariamente pasa primero por la raíz del DODAG, lo que implica que el mensaje asciende hasta la raíz para que esta, al ser quien conoce todas las rutas, redireccione el mensaje hacia el nodo 4. Esto está ilustrado en la Figura 2.9.

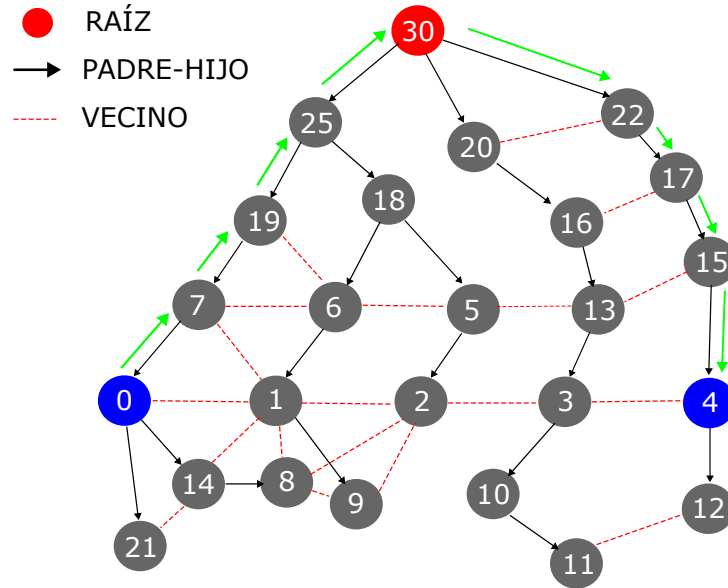


FIGURA 2.9: Un ejemplo de comunicación entre el nodo 0 y el nodo 4 usando el protocolo RPL estándar en modo de no almacenamiento. El mensaje debe llegar primero a la raíz antes de ser dirigido hacia el nodo destino.

El objetivo del borrador de *Projected Routes* es configurar una pista para determinar la estructura, y luego usar segmentos para conectar los puntos que forman dicha estructura.

Siguiendo el ejemplo, primero se define la estructura y se crea la pista. Para ello, se envía un *Non-Storing P-DAO* que establece su estructura con las siguientes características:

- **Ingreso:** el nodo 0, que es el nodo iniciador.
- **TrackID:** (0,129), identificador de la pista (*track*).
- **NSM-VIO:** el nodo 1 como un salto laxo (*loose hop*) que define la estructura de la pista.
- **Destino:** el nodo 4, destinatario del mensaje de el nodo 0.

Este *Non-Storing P-DAO* es enviado desde la raíz al nodo 0 y para establecer la pista y este nodo responde con un *P-DAO-ACK* confirmando la recepción y la creación de la pista.

Ahora que la estructura está formada, el siguiente paso es formar segmentos para conectar los puntos de la estructura laxa. En este caso particular, se formarán mínimamente dos segmentos: uno desde el ingreso de la pista al nodo intermedio (*loose hop*) y otro desde este nodo intermedio hacia el nodo destino. Es decir, desde el nodo 0 al nodo 1 y otro del nodo 1 al nodo 4. Por supuesto, pueden haber más de dos segmentos, ya que puede haber más de un segmento para llegar desde el nodo 0 al nodo 1. Para el ejemplo se mostrarán cuatro segmentos, dos para cada caso.

Para establecer el segmento, la raíz del DODAG envía un *Storing P-DAO* al último nodo del segmento.

Para empezar, se debe establecer un segmento que conecta el salto laxo (nodo 1) con el nodo destino (nodo 4). Un posible segmento es el siguiente: $1 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 13 \rightarrow 3 \rightarrow 4$. Para lograr establecer este segmento, un *Storing P-DAO* es enviado desde la raíz al nodo 4, conteniendo:

- **Ingreso:** el nodo ingreso (*track ingress*), al igual que antes, es el nodo 0, al ser el nodo que quiere enviar el mensaje.
- **TrackID:** (0,129) ya que este segmento es parte de la misma pista formada previamente.
- **SM-VIO:** ruta estricta 1,6,5,13,3,4.
- **Destino:** nodo 4.

Este mensaje se reenvía de manera inversa, estableciendo el estado de enrutamiento en cada nodo hasta el nodo 1. Finalmente, el nodo 1 responderá a la raíz con un P-DAO-ACK para confirmar tanto la recepción del mensaje como la formación del segmento. Este es el segmento 3 en la Figura 2.10.

De la misma manera, otro posible segmento es el siguiente: $1 \rightarrow 8 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$. Este es el segmento 4 en la Figura 2.10. Para lograr establecer este segmento, un Storing P-DAO es enviado desde la raíz al nodo 4, conteniendo:

- **Ingreso:** el nodo 0.
- **TrackID:** (0,129).
- **SM-VIO:** ruta estricta 1,8,2,3,4.
- **Destino:** nodo 4.

Por último, al ya establecer la pista y el segmento desde el salto laxo al nodo egreso, sólo queda establecer un segmento desde el nodo ingreso al salto laxo. Luego, se debe establecer un segmento que conecte el nodo 0 con el nodo 1. Un posible segmento es $0 \rightarrow 7 \rightarrow 1$. Para lograr establecer este segmento, un *Storing* P-DAO es enviado desde la raíz al nodo 4, que contiene:

- **Ingreso:** nodo 0.
- **TrackID:** (0,129).
- **SM-VIO:** ruta estricta 0,7,1.
- **Destino:** nodo 4.

Este mensaje también se envía de manera inversa desde el nodo 1 hasta el nodo 0, confirmando el establecimiento del segmento enviando un P-DAO-ACK al final. Este es el segmento 1 en la Figura 2.10.

De la misma manera, otro posible segmento es el siguiente: $0 \rightarrow 14 \rightarrow 1$. Para lograr establecer este segmento, un Storing P-DAO es enviado desde la raíz al nodo 1, conteniendo:

- **Ingreso:** el nodo 0.
- **TrackID:** (0,129).
- **SM-VIO:** ruta estricta 0,14,1.
- **Destino:** nodo 4.

Al igual que antes, este mensaje se reenvía de manera inversa, estableciendo el estado de enrutamiento en cada nodo hasta el nodo 0. Finalmente, el nodo 0 responde a la raíz con un P-DAO-ACK. Este es el segmento 1 en la Figura 2.10.

Finalmente, de esta manera, se formó una pista compuesta por una combinación de rutas proyectadas, los cuales se han instalado mediante el uso de *Projected DAO* (P-DAO). La pista y todos los segmentos instalados se ilustran en la Figura 2.10.

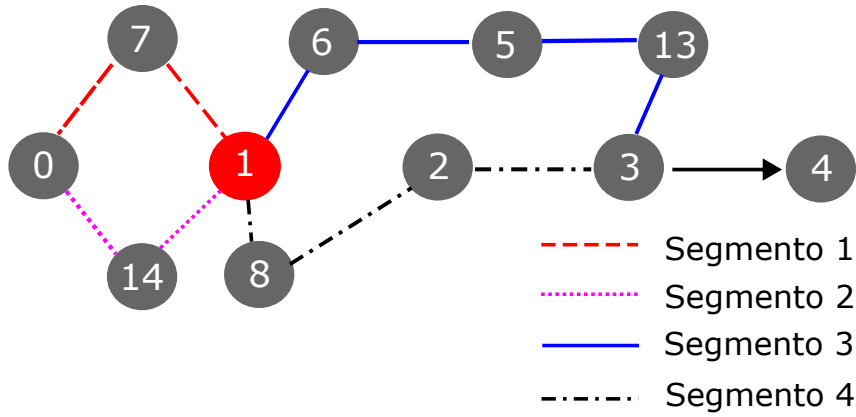


FIGURA 2.10: Pista (track) instalada en el ejemplo. El nodo 1 es un salto laxo (loose hop) que es parte de un carril (lane). Mediante el uso del mensaje Projected DAO se instalan cuatro segmentos.

Con la pista y sus segmentos establecidos, el nodo 0 puede ahora enviar el mensaje al nodo 4 mediante los segmentos formados. En este caso, se utilizará el Segmento 1 o el Segmento 2 para enviar el mensaje del nodo 0 al nodo 1, y luego el Segmento 3 o Segmento 4 para enviar el mensaje del nodo 1 al nodo 4.

El enfoque de pistas y segmentos aumenta la confiabilidad, permitiendo múltiples opciones de rutas en caso de fallas en nodos o enlaces, como puede suceder bajo condiciones climáticas adversas. Por ejemplo, se podría configurar un tercer segmento adicional entre el nodo 4 y el nodo 2, brindando rutas alternativas que mejoran la robustez y la disponibilidad del sistema.

2.2.5 Limitaciones

En una red con N nodos, donde cada nodo necesita comunicarse con todos los demás ($N - 1$ destinos), la principal desventaja de este borrador es su alto consumo de recursos debido a la gran cantidad de pistas (tracks) necesarias.

Establecer una estructura de enrutamiento basada en pistas requiere N pistas separadas, cada una con hasta $N - 1$ destinos.

Como consecuencia, cada vez que un nodo inicia una comunicación, debe enviar $N - 1$ mensajes unicast, uno para cada destino.

Esto genera una sobrecarga significativa de memoria, ya que cada nodo debe almacenar y gestionar múltiples pistas mientras mantiene el estado de enrutamiento de numerosos pares.

Además, la sobrecarga de transmisión aumenta proporcionalmente con el tamaño de la red, lo que hace que esta estrategia sea ineficiente para implementaciones a gran escala que requieren comunicación P2P dinámica y de baja latencia.

2.3 Protocolos de enrutamiento reactivos (bajo demanda)

La comunicación punto a punto (P2P, *Peer-to-peer communication*) representa un patrón de tráfico importante en las Redes de Baja Potencia y Redes con Pérdidas (LLNs), especialmente en escenarios de IoT. Aunque la implementación predeterminada de RPL admite tráfico P2P, el enfoque propuesto por el estándar de la IETF puede considerarse muy costoso en ciertas situaciones. Además, la comunicación P2P a través de un DAG en particular, entre cientos (o miles) de enrutadores, genera una fuerte congestión de tráfico cerca de la raíz de ese DAG.

En este caso, es conveniente descubrir rutas directas entre varios pares de origen-destino que no pasen por la raíz del DAG. Así, en abril de 2010, el grupo de trabajo RoLL (*Routing Over Low Power and Lossy Networks*) comenzó la propuesta de una nueva solución para mejorar el soporte P2P proporcionado por RPL.

2.3.1 P2P-RPL

En agosto de 2013, se presentó el descubrimiento reactivo de rutas punto a punto en redes de baja potencia y con pérdidas (P2P-RPL) como un estándar de la IETF en la RFC 6997 [4].

P2P-RPL es una extensión de RPL que permite la creación de rutas P2P a demanda, funcionando como un protocolo de enrutamiento reactivo. De esta manera, un nodo fuente que desea enviar un mensaje de datos P2P debe iniciar un proceso de descubrimiento de ruta. El descubrimiento de rutas en P2P-RPL ocurre formando un DAG temporal enraizado en el nodo origen. Al igual que RPL, P2P-RPL usa mensajes DIO de multidifusión de enlace-local IPv6 para establecer un DAG; sin embargo, a diferencia de RPL, este DAG es de naturaleza temporal. En P2P-RPL, el único propósito de la creación de este DAG es descubrir rutas hacia el (los) destino(s), y los DIO sirven como mensajes de descubrimiento de rutas.

El mecanismo es el siguiente:

1. La fuente, que actúa como la raíz del DAG temporal, inunda la red con mensajes DIO que incluyen una Opción de Descubrimiento de Ruta P2P (P2P-RDO, *P2P Route Discovery Option*) a través de toda la red solicitando una ruta hacia el nodo de destino. Esta nueva opción es introducida por P2P-RPL.
2. Cada nodo que recibe el P2P-RDO primero verifica el destino del mensaje, determina si debe unirse al DODAG y selecciona su padre preferido temporal.
3. Si el nodo no es el destino, debe reenviar el P2P-RDO. De esta manera, el nodo repite el mismo proceso, enviando mensajes DIO por multidifusión.
4. El P2P-RDO se reenvía a través de la red hasta que alcanza el nodo de destino o se completa el número máximo de saltos.
5. Cuando el destino recibe el P2P-RDO, debe generar un Objeto de Respuesta de Descubrimiento P2P (P2P-DRO, *P2P Discovery Reply Object*) para responder a la solicitud de ruta. Este es un nuevo *RPL Control Message* introducido por el protocolo.
6. El P2P-DRO se reenvía de regreso a través del padre preferido elegido durante el reenvío del P2P-RDO. Los nodos intermedios deben almacenar la ruta inversa utilizada para entregar el P2P-DRO para el futuro reenvío de mensajes de datos.
7. La fuente del P2P-RDO, al recibir el P2P-DRO, puede comenzar el envío del mensaje de datos P2P a través de la ruta creada.

La Figura 2.11 ejemplifica las rutas que pueden crearse utilizando tanto RPL como P2P-RPL para la transmisión de un mensaje de datos P2P.

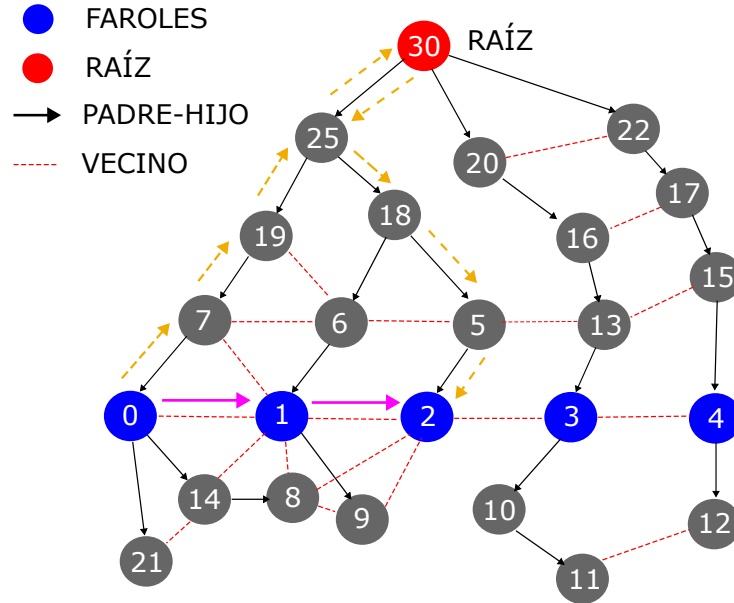


FIGURA 2.11: La transmisión de un mensaje P2P desde el nodo 0 al nodo 2 está representada en la figura. Las líneas naranjas punteadas con una flecha indican la ruta creada por RPL, mientras que las líneas rosas sólidas con una flecha representan la ruta establecida por P2P-RPL.

2.3.2 AODV-RPL

Aunque P2P-RPL permite mejorar el tráfico de datos P2P en redes RPL, presenta limitaciones. El protocolo asume que los enlaces entre nodos son simétricos, es decir, que la calidad de enlace de A a B es igual (o casi igual) a la de B a A. Así, los mensajes P2P intercambiados usan un único camino. Sin embargo, en entornos reales, esta simetría puede no cumplirse, lo cual no satisface los requisitos de enrutamiento de diversas aplicaciones IoT.

En este contexto, AODV-RPL (*Ad hoc On-demand Distance Vector routing-based RPL*), también conocido como *Supporting Asymmetric Links in Low Power Networks: AODV-RPL Draft* [5], surge como una mejora de RPL para soportar el patrón de tráfico P2P considerando tanto enlaces simétricos como asimétricos en el proceso de descubrimiento de rutas. Mientras que P2P-RPL requiere que los enlaces tengan conectividad bidireccional, AODV-RPL permite rutas de comunicación asimétricas en redes con enlaces bidireccionales asimétricos.

Al igual que en P2P-RPL, las rutas P2P en AODV-RPL se crean bajo demanda. Un nodo fuente inicia el proceso de creación de ruta hacia un destino cuando la ruta actual no cumple con los requisitos de la aplicación o no existe una ruta deseada. Pero, a diferencia de P2P-RPL, en AODV-RPL se construyen pares de instancias DODAG durante la formación de rutas entre el nodo origen (*OrigNode*) y el nodo destino (*TargNode*).

Instancias en AODV-RPL

1. **RREQ-Instance:** se forma con mensajes de control de ruta enviados del *OrigNode* al *TargNode*. La ruta descubierta en la RREQ-Instance se usa para enviar datos desde *TargNode* a *OrigNode*.

2. **RREP-Instance:** se forma con mensajes de control de ruta enviados de TargNode a OrigNode. La ruta descubierta en la RREP-Instance se usa para enviar datos desde OrigNode a TargNode.

Mecanismo de AODV-RPL

1. El nodo origen envía mensajes DIO-RREQ (DIO con contenido de solicitud de ruta, *DIO with Route Request content*) para crear una RREQ-Instance (DODAG creado por el originador de un mensaje RREQ) y encontrar un camino hacia el nodo destino deseado. Es decir, al igual que en RPL, se envían mensajes DIO con multidifusión.
 - Una diferencia con P2P-RPL es que DIO-RREQ tiene un campo "S" que indica si la ruta es simétrica o asimétrica.
 - Si el enlace se define como asimétrico, todas las rutas que lo usen también se consideran asimétricas.
2. Cada nodo que recibe el DIO-RREQ verifica la condición de enlace bidireccional, actualiza el campo S si es necesario, y decide si unirse o no a la RREQ-Instance.
3. Al alcanzar su destino, en vez de transmitir la respuesta a través de la ruta seleccionada como es el caso de P2P-RPL, el nodo evalúa el campo S para decidir cómo responder a la solicitud de creación de ruta.
 - Si el campo S indica que la ruta es simétrica, el nodo destino envía un DIO-RREP (DIO con contenido de respuesta de ruta, *DIO with Route Reply content*) unicast al originador del DIO-RREQ a través del camino creado. Dado que es simétrico, este único camino se puede usar para el transporte de datos en ambas direcciones.
 - Si la ruta es asimétrica, el nodo destino inicia la creación de una RREP-Instance (DODAG creado por el destino de un mensaje RREQ) mediante la multidifusión de DIO-RREP a sus vecinos.
4. En el caso de una ruta asimétrica, los DIO-RREP se reenvían, verificando la simetría de enlaces de manera similar a los DIO-RREQ, hasta llegar al originador del DIO-RREQ, quien, al recibirlo, puede iniciar el envío de mensajes de datos a través del camino creado por el DIO-RREP.

Este enfoque, a diferencia de P2P-RPL, permite rutas dinámicas y adaptativas para aplicaciones IoT en entornos con enlaces asimétricos.

2.3.3 Comparación entre P2P-RPL y AODV-RPL

Tanto P2P-RPL como AODV-RPL generan rutas bajo demanda y utilizan mensajes DIO para el descubrimiento de rutas, propagados mediante multidifusión de enlace local, formando un DODAG temporal con raíz en el nodo de origen.

Aunque parecen similares, presentan diferencias importantes. La diferencia principal radica en cómo cada protocolo maneja la simetría de los enlaces:

- **P2P-RPL** requiere que los enlaces entre dos nodos tengan conectividad bidireccional, es decir, que la calidad del enlace sea equivalente en ambas direcciones. Esto significa que el intercambio de mensajes P2P en P2P-RPL se realiza a través de un único camino simétrico.

- **AODV-RPL**, en cambio, permite la creación de rutas con enlaces asimétricos, generando un par de instancias DODAG (*RREQ-instance* y *RREP-instance*) cuando no se encuentra un camino simétrico. Así, el intercambio de mensajes P2P puede realizarse utilizando dos rutas diferentes: una de A a B y otra de B a A. Este enfoque de doble ruta hace a AODV-RPL más flexible en redes donde los enlaces son asimétricos, lo que permite una mayor adaptabilidad en entornos IoT con enlaces de calidad variable.

Por ejemplo, la Figura 2.12d muestra lo que ocurriría si la ruta fuera asimétrica, lo que significa que no todos los enlaces en el camino tienen alcance bidireccional. Si esto sucede, P2P-RPL no logra establecer una ruta. En contraste, AODV-RPL reinicia el proceso de descubrimiento de ruta, esta vez enviando por multidifusión un RREP-DIO hasta alcanzar el destino.

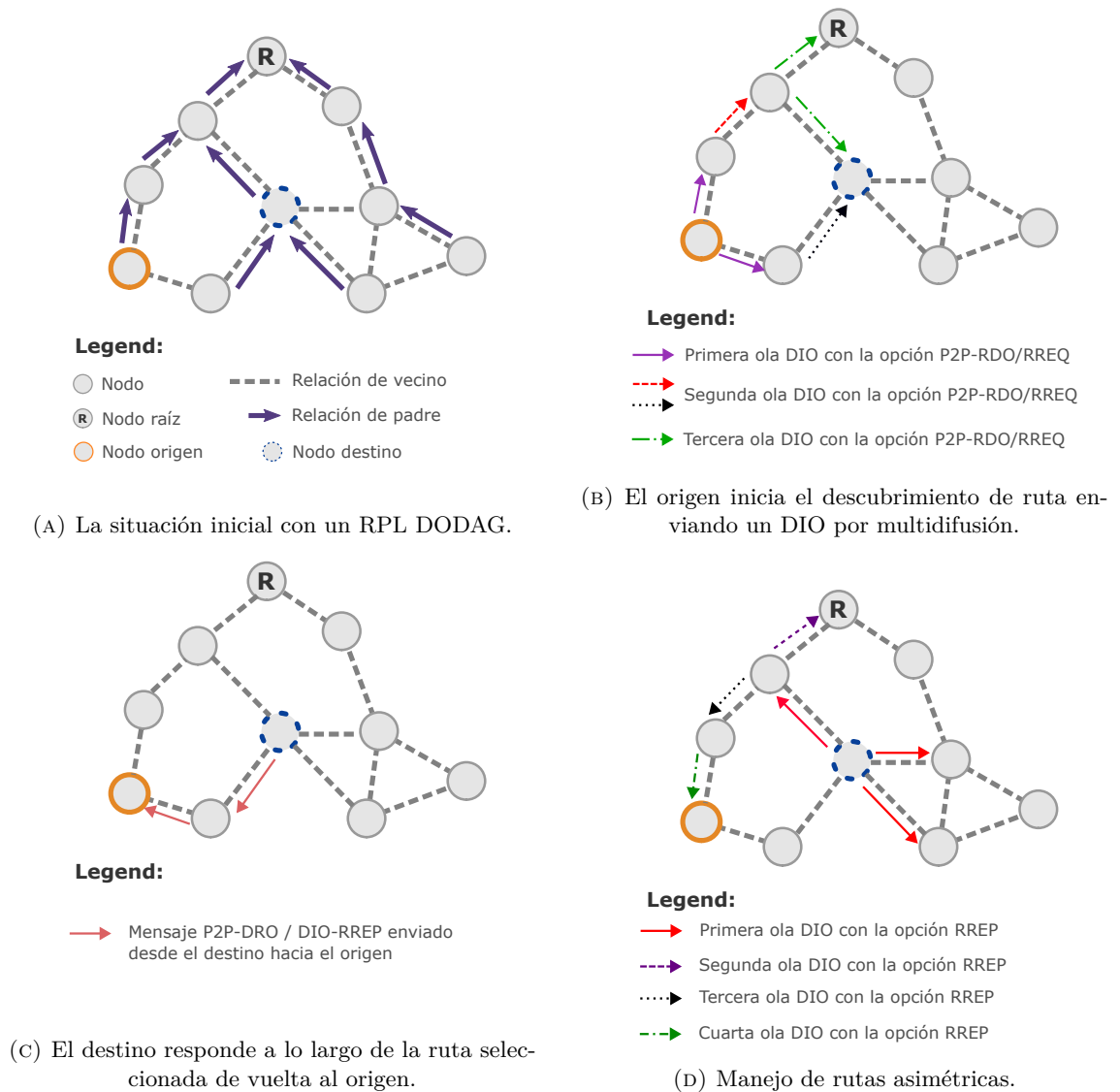


FIGURA 2.12: Proceso de descubrimiento de ruta en P2P-RPL y AODV-RPL. En Figura 2.12d, se destaca la diferencia clave entre ambos enfoques: mientras que AODV-RPL admite rutas asimétricas, como se ilustra en la figura, P2P-RPL no lo hace, lo que impide el establecimiento de una ruta.

En resumen, AODV-RPL extiende la capacidad de P2P-RPL para manejar situaciones

en las que la simetría de enlaces no está garantizada, haciéndolo más adecuado para aplicaciones IoT que requieren comunicaciones P2P en redes con enlaces asimétricos.

2.4 Estrategias de enrutamiento para un grupo de nodos en una red mallada

Varios trabajos han evaluado diferentes aspectos del protocolo RPL. Por ejemplo, diversas investigaciones han investigado los aspectos de seguridad de RPL, reportando diversas vulnerabilidades en el protocolo. Aunque la seguridad de RPL es un tema importante, no es el enfoque principal de esta tesis, que se centra en el rendimiento de las comunicaciones P2P en RPL.

Antes de la estandarización de RPL en 2012, se propusieron varios protocolos de enrutamiento reactivos basados en el vector de distancia bajo demanda (*AODV*) especificado en RFC 3561 [6] para ofrecer soporte de enrutamiento de cualquier nodo a cualquier otro nodo en redes de baja potencia (LLNs, por sus siglas en inglés). Ejemplos de estos protocolos incluyen LoWPAN-AODV, NST-AODV, LOAD-ng y TinyAODV. Estos protocolos simplificaron el AODV original y lo optimizaron para tener en cuenta las limitaciones de recursos, los enlaces inalámbricos defectuosos y la dinámica de las redes de dispositivos embebidos. Sin embargo, la naturaleza de inundación de los mensajes de solicitud/respuesta de rutas aún tenía un alto costo en términos de sobrecarga de red, lo que resultaba ser un costo inevitable para permitir un enrutamiento genérico de cualquier nodo a cualquier nodo.

Si el patrón de tráfico de la aplicación puede preverse de antemano (por ejemplo, la recolección de datos de muchos a uno), entonces un enfoque diferente como RPL puede ser más eficiente. Un ejemplo sería nodos que reportan a la raíz una vez al día el consumo eléctrico de una casa. Por supuesto, RPL sacrifica el rendimiento P2P para lograr esta eficiencia.

Desde el inicio del estándar RPL, varios trabajos han intentado mejorar su enrutamiento P2P, modificando el protocolo o proponiendo nuevos métodos. A continuación, se realiza una breve revisión de las investigaciones relacionadas que han buscado mejorar el soporte de enrutamiento P2P en RPL. Estos trabajos se han dividido en tres categorías.

2.4.1 Protocolos Reactivos

Muchos protocolos de enrutamiento reactivos basados en el protocolo AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*) han sido propuestos para mejorar el enrutamiento P2P de RPL en redes de baja potencia y pérdida (LLN). Entre ellos, NST-AODV y LOAD-ng son ejemplos destacados que intentan reducir la sobrecarga del protocolo AODV para hacerlo más adecuado para LLNs. Sin embargo, estos protocolos requieren que cada nodo envíe mensajes de solicitud/respuesta a través de toda la red para descubrir rutas P2P, lo cual introduce una sobrecarga considerable, especialmente en redes grandes y densas.

Como se mencionó en la sección Protocolos de enrutamiento reactivos (bajo demanda) (2.3), P2P-RPL y AODV-RPL fueron propuestos para optimizar el rendimiento P2P de RPL, utilizando mensajes de enrutamiento para crear rutas P2P mejoradas.

- **P2P-RPL:** Aunque no se basa en AODV, encuentra rutas P2P bajo demanda mediante la creación de un árbol de enrutamiento temporal con raíz en el nodo origen. Este proceso requiere que todos los nodos participen en la formación del árbol temporal durante la fase de descubrimiento, lo cual genera un número significativo de mensajes de control y aumenta el consumo de energía en los nodos. A diferencia de AODV-RPL, que aún se encuentra en estado de borrador, el rendimiento de P2P-RPL fue validado mediante experimentos en testbeds y se presentó como documento

experimental en el RFC6997. Posteriormente, se realizaron estudios de simulación extensiva en P2P-RPL utilizando simuladores como NS-3.

- **AODV-RPL:** Aunque está en fase de borrador, AODV-RPL utiliza un enfoque basado en AODV que permite la creación de rutas asimétricas, lo que facilita la adaptabilidad en redes LLN.

A pesar de estas mejoras, ambos protocolos enfrentan limitaciones: la difusión masiva de mensajes de enrutamiento puede congestionar la red y comprometer el rendimiento general. Además, no son retrocompatibles; es decir, la comunicación P2P no funcionará en redes que incluyan nodos que no reconozcan o ignoren los mensajes de P2P-RPL debido a sus políticas, lo cual limita la integración con dispositivos no compatibles.

2.4.2 Métodos Basados en Ubicación

Considerando que la mayoría de los protocolos de enrutamiento P2P, incluidos P2P-RPL, inundan la red con paquetes de control para crear rutas, generando una gran sobrecarga y consumo de energía, Zhao et al. propusieron el protocolo de enrutamiento basado en regiones eficiente en energía (*ER-RPL*) [7]. Este enfoque permite una comunicación P2P eficiente en términos de energía sin comprometer la fiabilidad de la red. ER-RPL emplea un enfoque híbrido, que combina características proactivas y reactivas basadas en RPL. La idea principal del protocolo es segmentar la red en diferentes regiones y realizar el descubrimiento de rutas P2P considerando solo las áreas donde se encuentran los nodos. Para ello, ER-RPL requiere la presencia de nodos conscientes de su ubicación (por ejemplo, equipados con GPS) en la red, llamados Nodos de Referencia (RN).

Los RN utilizan sus coordenadas para dividir la red en regiones y calcular las distancias entre los nodos y los RN. Posteriormente, los nodos seleccionan su región en función de la distancia a los RN. Así, a diferencia de P2P-RPL, que requiere que todos los nodos busquen rutas, ER-RPL explora solo un subconjunto de nodos basado en información de ubicación geográfica. Este enfoque permite que ER-RPL descubra rutas P2P entre un par de origen y destino con solo involucrar una pequeña parte de los nodos en la red, encontrando así una ruta de enrutamiento casi óptima en términos de ahorro de energía y fiabilidad. Sin embargo, obtener información de ubicación en dispositivos LLN con recursos limitados puede ser un requisito costoso o incluso impráctico.

Jung et al. propusieron el protocolo P2P-RPL consciente de la ubicación (*LA P2P-RPL*, *location-aware P2P-RPL*) [8] para mejorar la eficiencia y fiabilidad de las rutas P2P en la red. Similar al método anterior, este enfoque también depende de la información de ubicación de los nodos, la cual puede ser inexacta o incluso inalcanzable en algunos dispositivos IoT.

2.4.3 Modificaciones del protocolo RPL

Una alternativa propuesta por Kim y Paek para mejorar la eficiencia del enrutamiento P2P en RPL es NG-RPL publicado en el IEEE Internet of Things Journal (*NG-RPL for Efficient P2P Routing in Low-Power Multihop Wireless Networks* [9]). Este protocolo asume que la raíz tiene una vista completa de la topología de la red. Cada vez que un paquete P2P pasa por la raíz, esta informa tanto al nodo emisor como al nodo destino sobre el camino más corto entre ellos. Para que la raíz tenga esta visión completa de la topología de la red, NG-RPL requiere que cada nodo envíe la información de todos sus vecinos a la raíz.

En un trabajo similar al de NG-RPL, Mahyoub et al. propusieron *HRPL* [10] con el fin de mejorar el enrutamiento P2P en RPL. Al igual que en NG-RPL, en HRPL cada nodo envía su información de vecinos junto con sus enlaces a la raíz. Cuando un nodo desea

enviar un paquete P2P, solicita a la raíz que le proporcione el mejor camino disponible en la red. Sin embargo, una diferencia clave entre HRPL y NG-RPL es que, en HRPL, los nodos fuente deben solicitar explícitamente a la raíz un camino hacia el destino, mientras que en NG-RPL la raíz envía automáticamente el camino más corto a los nodos que envían paquetes P2P.

En otro trabajo, Rojas et al. propusieron un mecanismo de enrutamiento jerárquico denominado *IoTorii* [11]. Este enfoque asigna un conjunto de direcciones MAC significativas a los nodos de la red, permitiendo que cada nodo tenga múltiples opciones de rutas para enviar sus paquetes. Aunque este método puede proporcionar caminos más cortos para la comunicación P2P, requiere que los nodos hoja almacenen grandes tablas de enrutamiento. Este requisito no es deseable, ya que los nodos hoja en las redes RPL suelen ser muy limitados en recursos.

Por último, el protocolo *Enhanced RPL* (ERPL) publicado en el IEEE Internet of Things Journal (ERPL: *An Enhanced Peer-to-Peer Routing Mechanism for Low-Power and Lossy Networks* [12]) es otra alternativa que introduce un mecanismo para reenviar paquetes directamente sin necesidad de un enrutamiento ascendente si el nodo destino es un vecino directo del nodo fuente o de los nodos padres de este. Sin embargo, para que esta característica de ERPL beneficie a la comunicación P2P, el nodo destino debe ser un vecino directo entre los nodos padres del nodo fuente. Por ejemplo, los paquetes generados por el nodo 0 en la Figura 2.9 no se beneficiarían de ERPL si el destino fuera el nodo 4. En cambio, sí se benefician de ERPL si el destino fuese el nodo 1. La idea detrás de ERPL es utilizar los mensajes DIO como un proxy para obtener las direcciones de los vecinos. En ERPL, cuando un nodo recibe un mensaje DIO, extrae la dirección del emisor del mensaje y luego actualiza o agrega una entrada en su tabla de reenvío. Esto permite el descubrimiento de los vecinos de un salto.

2.5 Conclusiones

A lo largo de este capítulo se han analizado diversas estrategias para abordar los desafíos del enrutamiento P2P en redes LLN. Aunque P2P-RPL y AODV-RPL presentan mejoras significativas respecto al RPL estándar, enfrentan limitaciones como la sobrecarga de mensajes de control y la falta de retrocompatibilidad. Por otro lado, métodos basados en ubicación y modificaciones como NG-RPL y ERPL ofrecen soluciones innovadoras, pero a menudo requieren recursos adicionales o suposiciones restrictivas, como nodos con capacidades avanzadas.

En conclusión, el diseño de un protocolo de enrutamiento P2P eficiente en redes LLN implica equilibrar las demandas de fiabilidad, eficiencia energética y simplicidad. Las estrategias revisadas en este capítulo destacan la importancia de considerar las características específicas de las aplicaciones y los recursos de los dispositivos al seleccionar o desarrollar protocolos para redes IoT.

Capítulo 3

Peer to Peer MPL (P2P-MPL)

3.1 Planteamiento del problema

El caso de uso principal del trabajo presentado en este documento es el control eficiente de grupos de luminarias mediante una red mallada inalámbrica (wireless mesh network) en un entorno metropolitano.

Las luminarias están equipadas con sensores capaces de detectar la presencia de vehículos o peatones. Para optimizar el consumo energético, estas luces pueden mantenerse en un estado atenuado cuando no hay usuarios cerca y encenderse a plena potencia al detectar actividad en las proximidades. Para garantizar la seguridad y el confort en el tránsito urbano, al detectar la presencia de una persona o vehículo, todas las luminarias de la calle deberían volver a su potencia normal en un tiempo mínimo.

Dado que estas luminarias forman parte de una red mallada de gran tamaño, es necesario definir una estrategia de comunicación eficiente. En el protocolo RPL, una vez que la topología de la red se construye mediante mensajes *Destination Information Object* (DIO), y en el caso de operar en el modo de no almacenamiento (non-storing), cada nodo envía regularmente un mensaje *Destination Advertisement Object* (DAO) al nodo raíz del DODAG, informándole qué nodo ha seleccionado como su padre. Como resultado, cuando un nodo necesita comunicarse con otro, su paquete de datos es primero enviado al nodo raíz, que luego reenvía el paquete al destino usando enrutamiento basado en la fuente.

Sin embargo, este esquema de RPL es ideal para comunicaciones entre los nodos de una FAN y un nodo central (la raíz del DODAG) o hacia Internet, pero no para casos en los que los nodos necesitan principalmente comunicación peer-to-peer (P2P). Para la gestión eficiente de luminarias, los nodos suelen estar físicamente próximos, por lo que la comunicación no debería pasar por el nodo raíz. Retransmitir paquetes a través de la raíz introduce saltos adicionales y aumenta la latencia, afectando la respuesta en tiempo real de las luminarias.

Incluso si se utiliza el modo de almacenamiento de RPL, los mensajes seguirán llegando hasta el primer ancestro común antes de propagarse a otros nodos. La solución más eficiente y rápida es permitir que las luminarias intercambien mensajes directamente, dado que generalmente están lo suficientemente cerca para comunicarse sin intermediarios.

No obstante, también es útil que las luminarias formen parte de una red multi-aplicación más grande para intercambiar información de control y configuración con un controlador

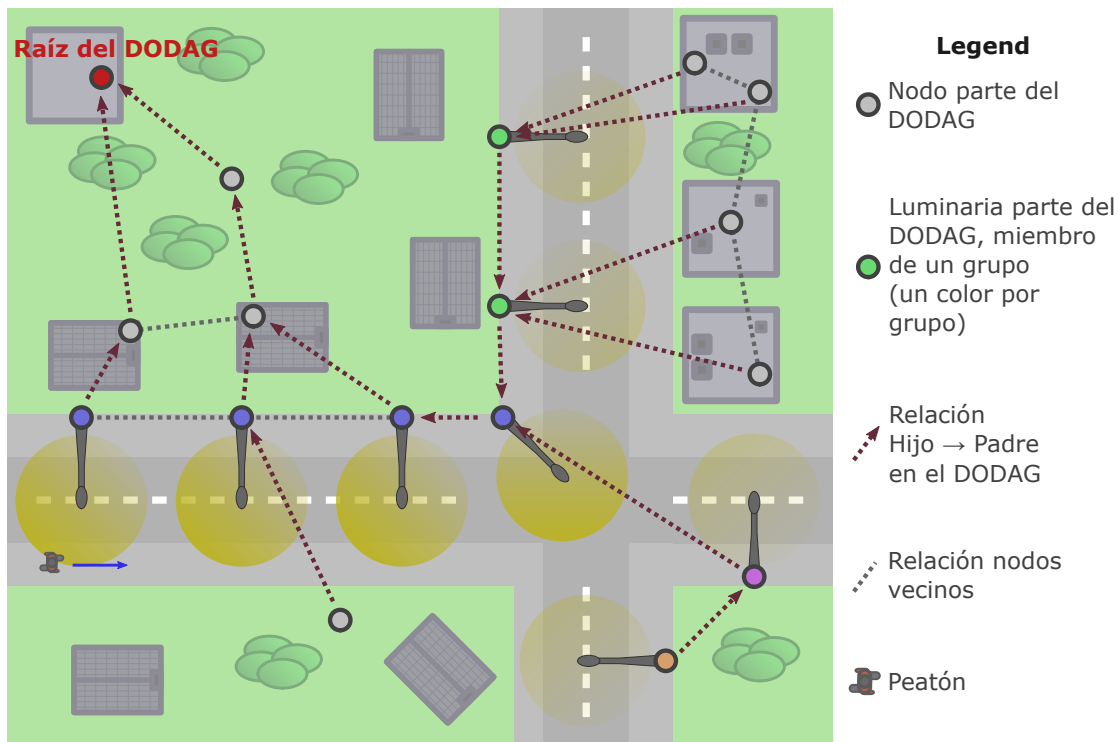


FIGURA 3.1: Un ejemplo de un DODAG de RPL desplegado para una aplicación de gestión de luminarias en un entorno urbano.

centralizado. Es más económico y eficiente desplegar una sola red que soporte múltiples aplicaciones en lugar de una red dedicada exclusivamente a la gestión de luminarias. Una ilustración de este escenario se presenta en la Figura 3.1.

Dado que la mayoría de los peatones y vehículos recorren una cuadra completa, puede ser suficiente que la primera luminaria que detecte movimiento envíe un solo mensaje de multidifusión (multicast) a todas las luminarias de la misma cuadra. Este esquema no cubre todos los casos posibles (por ejemplo, vehículos y peatones que comienzan o detienen su movimiento en medio de una cuadra). Se asume que la capa de aplicación definirá su propio protocolo para manejar estas situaciones y que cada luminaria será asignada a uno o más grupos de multidifusión que reflejen los patrones de movimiento típicos del área. La manera en que se asignan estos grupos queda fuera del alcance de este trabajo. En el resto del documento, se considerará un caso de estudio en el que se analiza una única calle y una única cuadra con once luminarias, todas dentro del mismo grupo de multidifusión.

3.2 Solución propuesta: Peer-to-Peer MPL

La solución propuesta en este documento, denominada **Peer-to-Peer MPL (P2P-MPL)**, se basa en el Protocolo Multicast para Redes de Baja Potencia y Alta Pérdida (MPL), el cual se detalla en la siguiente subsección. El objetivo es permitir una comunicación más eficiente entre luminarias, evitando la necesidad de enviar mensajes a través del nodo raíz. En esta solución, los paquetes de la aplicación, responsables de activar las luminarias, serán entregados utilizando la multidifusión de RPL, también conocida como MPL, dentro de un dominio de multidifusión.

Cada grupo de luminarias (por ejemplo, una calle o una manzana) corresponderá a un dominio de multidifusión específico. Dado que MPL no especifica cómo se forman estos dominios, es necesario definir un método para su construcción. La raíz de la red,

actuando como entidad centralizada, se encargará de organizar las luminarias en distintos dominios, asignándoles una Dirección de Dominio específica. Este proceso se llevará a cabo en tres pasos principales: recopilación de información sobre la vecindad, construcción de los dominios de multidifusión y distribución de la información de pertenencia a los nodos.

Para la creación de los dominios de multidifusión, la entidad centralizada debe conocer los vecinos de cada nodo y la calidad de los enlaces correspondientes. Para ello, se puede utilizar la opción SIO propuesta en el estado de enrutamiento iniciado por la raíz en RPL [3] (o también conocido como *DAO Projection Draft*), lo que permitirá construir un grafo $G(V, E)$, donde V representa el conjunto de nodos en la red $(n_1, n_2, \dots)$ y E el conjunto de enlaces que conectan nodos vecinos. Cabe destacar que el DODAG de RPL es un subconjunto de esta red.

En este esquema, cuando una luminaria detecta movimiento, enviará un mensaje que será retransmitido únicamente dentro de su dominio correspondiente. De esta manera, la comunicación se mantiene local y, a diferencia del funcionamiento estándar de RPL, el mensaje no necesita pasar por el nodo raíz para que todas las luminarias del grupo reciban la señal de encendido.

Para el caso particular de encender las luminarias de las calles a partir de la detección de movimiento, cada dominio de multidifusión estará compuesto exclusivamente por las luminarias de una misma calle.

Consideremos una calle compuesta por cinco luminarias, donde además de estas, existen numerosos dispositivos conectados a la red, no únicamente las luminarias. Habrá, por lo tanto, una gran cantidad de nodos adicionales que intercambian datos en la misma red, ampliando su tamaño más allá de estas cinco luminarias.

Observemos la red ilustrada en la Figura 3.2, que muestra cinco luminarias numeradas del 0 al 4 representadas en azul.

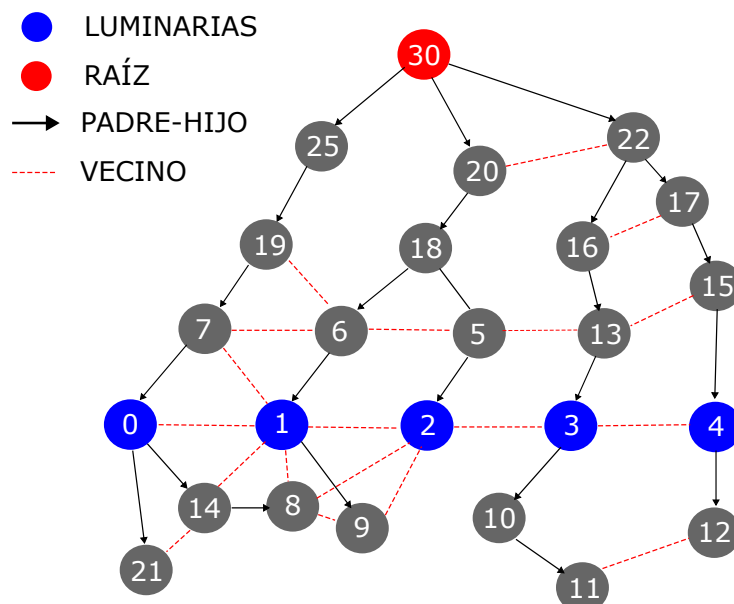


FIGURA 3.2: Red de ejemplo con cinco luminarias.

Como se mencionó, las cinco luminarias de la red representan una calle. Supongamos que un auto pasa y la luminaria 0 detecta movimiento. Como respuesta, la luminaria 0 enviará un mensaje a la luminaria 1 para que se encienda, idealmente antes de que el auto llegue a su proximidad. De acuerdo con el protocolo estándar RPL, al estar en modo de no

almacenamiento, este mensaje, con la luminaria 1 como destino, debe subir por el árbol hasta la raíz, que luego es la responsable de reenviarlo hacia el destino. En la práctica, esto implica múltiples niveles de transmisión, lo que aumenta la latencia; por ello, el objetivo es reducir este tiempo.

En P2P-MPL, se plantea la creación de dominios con una dirección asociada a cada uno. De esta forma, cuando la luminaria 0 detecte movimiento, la dirección de destino del mensaje será la dirección del dominio, en lugar de la dirección específica de la luminaria 1, permitiendo encender todas las luces de la calle simultáneamente.

El dominio mínimo incluirá únicamente los nodos de las luminarias correspondientes a una calle en particular, pero para mejorar la fiabilidad, se incorporarán nodos adicionales al dominio.

Supongamos que el dominio corresponde al de la Figura 3.3, donde los nodos marcados en verde son aquellos nodos que forman parte del mismo.

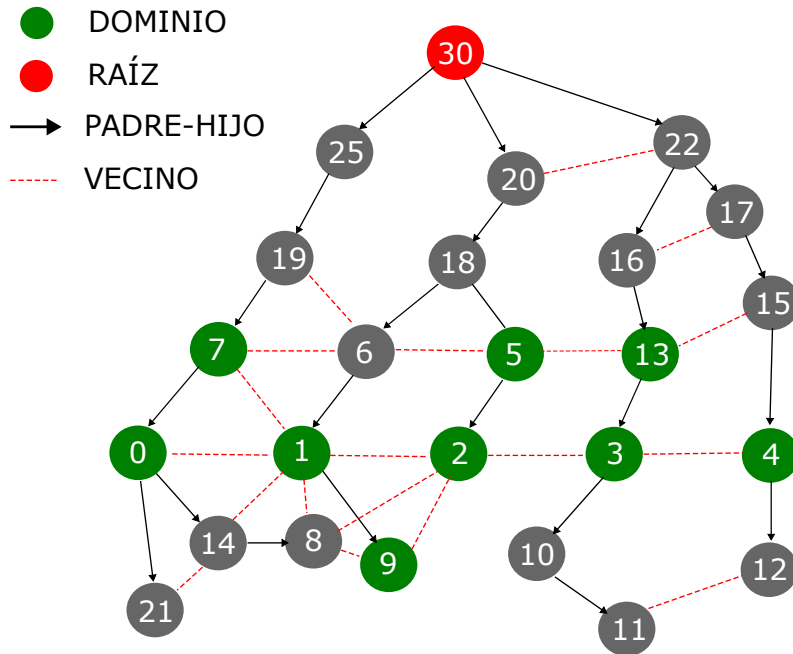


FIGURA 3.3: Dominio de ejemplo para la red presentada.

Con esta configuración, cuando la luminaria 0 detecte movimiento, enviará un mensaje donde la dirección de destino es la dirección del dominio al que pertenece. En este ejemplo, tanto el nodo 7 como la luminaria 1 recibirán el mensaje al ser vecinos de la luminaria 0 y formar parte del dominio. Ambos nodos continuarán reenviando el mensaje a sus vecinos dentro del dominio. Por ejemplo, la luminaria 1 reenviará el mensaje a los nodos 7, 2 y 9. No reenviará el mensaje de regreso a la luminaria 0, ya que lo recibió de ese mismo nodo, pero sí lo enviará a la luminaria 7. Al recibir el mensaje nuevamente, el nodo 7 no lo reenvía, evitando así bucles. Así, cada nodo en el dominio reenviará el mensaje una sola vez, asegurando que toda la calle se encienda en respuesta al movimiento detectado.

3.3 Multicast Protocol for Low-Power and Lossy Networks (MPL)

La solución propuesta, P2P-MPL, utiliza el **Protocolo Multicast para Redes de Baja Potencia y Alta Pérdida (MPL)** definido en el RFC 7731 [13] para enviar mensajes

dentro del dominio establecido. La idea es que, cada vez que una luminaria detecte movimiento y quiera avisar a la siguiente luminaria, a diferencia de RPL, en lugar de enviar el mensaje hasta la raíz de la red y luego redirigirlo a la luminaria de destino, el mensaje se enviará dentro del dominio utilizando este protocolo.

MPL es un protocolo de reenvío de mensajes multicast sobre IPv6, diseñado específicamente para las características de comunicación y limitaciones de recursos de redes de baja potencia y alta pérdida (LLNs). MPL utiliza un mecanismo de difusión controlado por **temporizadores trickle** (definido en RFC6206 [2]) para enviar mensajes multicast sin la necesidad de mantener tablas de enrutamiento.

El algoritmo *Trickle* permite que los nodos en medios compartidos con altas tasas de pérdida, como las LLNs, intercambien información de manera altamente robusta, eficiente en términos de energía, simple y escalable. Este algoritmo se basa en el uso de un intervalo de *Trickle*, un período de tiempo que regula cuándo y con qué frecuencia un nodo transmite información a sus vecinos.

El intervalo de *Trickle* se define dinámicamente y puede variar entre un valor mínimo y un valor máximo. Durante este intervalo, el nodo escucha los mensajes de otros nodos para verificar si la información que posee está sincronizada con la de sus vecinos. Si no detecta inconsistencias, espera a que termine el intervalo antes de transmitir nuevamente, lo que reduce significativamente el tráfico en la red. Por el contrario, si detecta inconsistencias (por ejemplo, un vecino no tiene un mensaje reciente), ajusta el intervalo al valor mínimo para permitir una difusión rápida de la información faltante.

El comportamiento del algoritmo está diseñado para operar en dos modos:

1. Propagación rápida de información nueva: Cuando hay cambios en la información, los nodos reducen el intervalo de *Trickle* al mínimo, propagando los mensajes de forma eficiente y con baja latencia.
2. Reducción de transmisiones innecesarias: En ausencia de cambios o inconsistencias, los nodos extienden el intervalo de *Trickle* al valor máximo, enviando solo unos pocos mensajes en largos períodos de tiempo, lo que ahorra energía y reduce el uso de ancho de banda.

Esta dinámica hace que *Trickle* sea ideal para aplicaciones en redes donde la eficiencia energética y la fiabilidad en la propagación de información son críticas. Al ajustar el intervalo de *Trickle* según las condiciones de la red, el algoritmo equilibra la necesidad de una comunicación rápida con la optimización del consumo de recursos.

Aunque MPL es un protocolo independiente, su solución a veces se considera una extensión para proporcionar soporte multicast en RPL.

En MPL, todos los nodos de la red pueden recibir un mensaje multicast siempre que estén registrados en un **grupo multicast**.

Dado que todos los nodos pueden retransmitir los paquetes multicast que reciben, es necesario implementar un mecanismo para evitar mensajes duplicados. Por ello, MPL incluye un número de secuencia en el encabezado de los paquetes para distinguir cada mensaje multicast y almacena en un búfer los mensajes recibidos más recientemente. Cuando un nodo recibe un mensaje multicast, debe verificar si ya lo recibió revisando su número de secuencia o su presencia en el búfer. Si el nodo identifica que ya ha recibido el mensaje, lo descarta. De lo contrario, registra el número de secuencia, lo almacena en el búfer, procesa la carga útil y lo retransmite a otros nodos.

MPL utiliza *trickle* para organizar tanto los mensajes de control como los mensajes de datos que se intercambian entre los nodos. Los nodos pueden emplear los mensajes de control para informar a sus vecinos sobre su conjunto de números de secuencia o el contenido de su búfer. Cuando un nodo identifica que un vecino no ha recibido un mensaje,

redefine su intervalo de *trickle* al valor mínimo para difundir rápidamente el paquete faltante. De esta forma, gracias al almacenamiento de los paquetes más recientes en un búfer y a la retransmisión local de paquetes perdidos, MPL puede ofrecer **alta fiabilidad** en la tasa de entrega de paquetes.

3.3.1 Términos clave en MPL

A continuación, se introducen algunos términos clave que son esenciales para comprender el funcionamiento de MPL:

- **Retransmisor MPL** (*MPL Forwarder*): Un enrutador que implementa el protocolo MPL. Este retransmisor cuenta con al menos una Interfaz MPL.
- **Suscriptor MPL** (*MPL Subscriber*): Un nodo que recibe mensajes multicast difundidos por los retransmisores.
- **Interfaz MPL** (*MPL Interface*): La conexión de un retransmisor MPL a un medio de comunicación, a través de la cual transmite y recibe mensajes de datos MPL (MPL Data Messages). Una Interfaz MPL tiene asignadas una o más direcciones unicast y está suscrita a una o más Direcciones de Dominio MPL (*MPL Domain Address*).
- **Dirección de Dominio MPL** (*MPL Domain Address*): Una dirección multicast que identifica al conjunto de Interfaces MPL dentro de un Dominio MPL.
- **Dominio MPL** (*Domain Address*): Una zona de alcance, según lo definido en RFC4007 [14], en la cual las Interfaces MPL están suscritas a la misma Dirección de Dominio MPL y participan en la difusión de mensajes de datos MPL.
- **Mensaje de Datos MPL** (*MPL Data Message*): Es un mensaje multicast utilizado para comunicar una carga útil multicast entre los retransmisores MPL dentro de un dominio MPL.

En los protocolos multicast tradicionales, normalmente se recurre a mecanismos de mantenimiento de topología para descubrir y gestionar las rutas hacia todos los suscriptores de un grupo multicast. Sin embargo, mantener esas topologías en redes LLN resulta costoso y a menudo no es factible debido a las limitaciones de recursos.

Por lo tanto, a diferencia de los protocolos multicast tradicionales, MPL evita la necesidad de construir o mantener cualquier topología de enrutamiento multicast, y en su lugar, difunde los mensajes multicast a todos los retransmisores MPL (*MPL Forwarders*) dentro de un dominio MPL (*MPL Domain*).

El objetivo de MPL es entregar mensajes multicast a todas las interfaces que están suscritas a la dirección de destino multicast dentro de un dominio MPL (suscriptor MPL). La especificación estándar de MPL no define cómo deben construirse los dominios MPL, dejando esta tarea a los administradores de la red.

3.3.2 Uso de MPL en P2P-MPL

P2P-MPL emplea este mecanismo para enviar mensajes desde una luminaria origen a todas las demás luminarias dentro de su dominio. Esto es posible ya que se ha recopilado previamente la información necesaria para crear un grupo de luminarias, es decir, el dominio. Además, este dominio ya ha sido instalado previamente en cada uno de las luminarias. Como resultado, todos los nodos luminarias están suscritos a la Dirección de Dominio MPL correspondiente a su dominio. Así, cuando una luminaria detecta movimiento, envía

un mensaje multicast en su dominio, y el resto de las luminarias dentro de ese dominio recibirán el mensaje, ya que la dirección de destino del mensaje corresponde a la Dirección de Dominio MPL.

3.3.3 Limitaciones del Protocolo MPL

El Protocolo Multicast para Redes de Baja Potencia y Alta Pérdida (MPL) se emplea para la transmisión de mensajes dentro del dominio establecido en la red. No obstante, MPL es únicamente un mecanismo para la difusión de mensajes multicast y no especifica cómo deben construirse o estructurarse los dominios. Por lo tanto, es necesario definir en detalle el proceso mediante el cual la entidad centralizada obtendrá la información topológica necesaria, cómo se conformará el dominio y, finalmente, cómo se implementará la configuración de cada nodo para garantizar su participación en el dominio adecuado. Esto se describe en las siguientes secciones.

3.4 Wi-SUN

3.4.1 Pila de protocolos de Wi-SUN

La tecnología Wi-SUN es un estándar de comunicación inalámbrica reconocido a nivel mundial, diseñado para redes de gran escala, largo alcance y baja potencia (LLNs) [15]. Desarrollado por la Wi-SUN Alliance, se basa en estándares abiertos como IEEE 802.15.4g [16], 6LoWPAN [17], [18], IPv6 [19], RPL [1] y UDP [20], lo que garantiza la interoperabilidad entre dispositivos de distintos fabricantes y allana el camino para implementaciones masivas de redes IoT.

La pila de protocolos se presenta en la Figura 3.4.

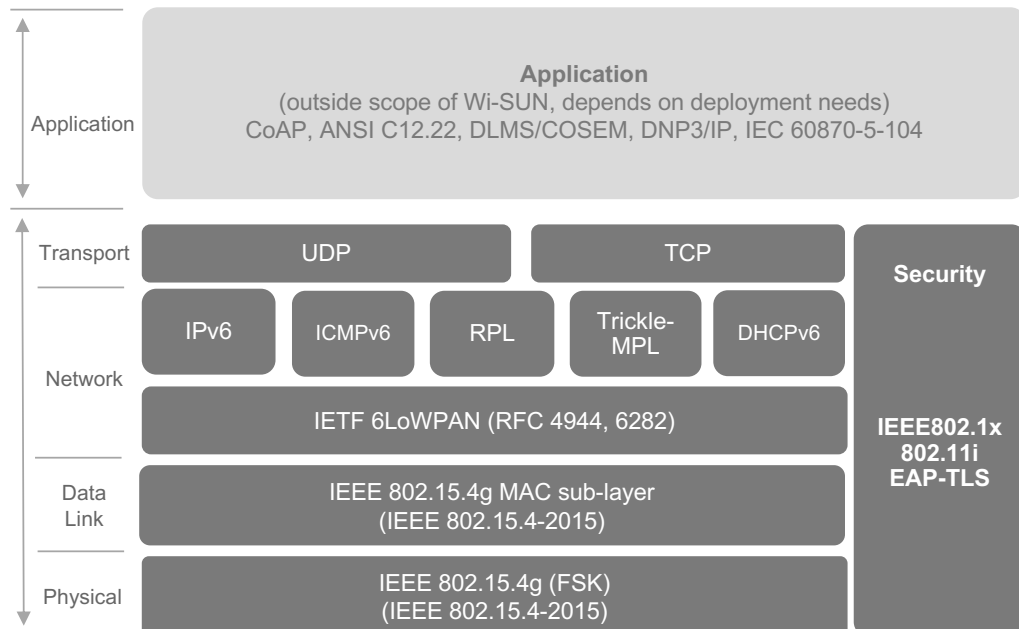


FIGURA 3.4: Pila de protocolos de Wi-SUN.

Gracias a su operación en bandas sub-GHz, Wi-SUN es especialmente adecuada para aplicaciones urbanas como medición inteligente de servicios, alumbrado público inteligente y monitoreo ambiental [21], [22].

Su topología en malla mejora la escalabilidad y confiabilidad de la red, permitiendo que los nodos se comuniquen con múltiples vecinos y asegurando una entrega de datos robusta incluso en entornos dinámicos o desafiantes.

Además, Wi-SUN soporta salto de frecuencia y selección adaptativa de canales, lo que proporciona resiliencia frente a interferencias y mejora la confiabilidad de la comunicación en entornos inalámbricos congestionados.

3.4.2 Capa MAC de Wi-SUN

La capa Medium Access Control (MAC) en una FAN Wi-SUN está diseñada para gestionar el acceso al medio y asegurar una comunicación eficiente en entornos con múltiples nodos [15]. Emplea el estándar IEEE 802.15.4-2015 [16], combinando acceso múltiple por detección de portadora con espera aleatoria (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)*) y salto de frecuencia (*Frequency Hopping (FH)*) para reducir colisiones y aumentar la confiabilidad.

CSMA/CA minimiza las colisiones de paquetes mediante un mecanismo de espera aleatoria antes de la transmisión, mientras que FH previene interferencias al cambiar dinámicamente de canal de radio según un cronograma predefinido.

Wi-SUN admite tanto transmisiones unicast como broadcast, cada una gobernada por mecanismos de planificación distintos, aunque el unicast es particularmente ventajoso en este contexto. A medida que aumenta la densidad de la red, la comunicación por broadcast se vuelve menos eficiente y más propensa a colisiones, mientras que el unicast ofrece una solución más confiable y escalable para la transmisión de datos.

La planificación unicast está adaptada a cada nodo individual, lo que requiere que cada uno cambie su canal de escucha de radio en cada intervalo *Unicast Dwell Interval (UDI)* para alinearse con el canal de su emisor asignado.

En cambio, el broadcast sigue un cronograma común compartido por un subconjunto de la red, llamado *Personal Area Network (PAN)*, que interconecta dispositivos dentro de un área geográfica limitada. Una FAN Wi-SUN puede estar compuesta por uno o más PANs.

Cabe destacar que cuando los cronogramas de unicast y broadcast se superponen, los nodos priorizan la escucha de transmisiones broadcast.

La Figura 3.5 ilustra los horarios de canal de unicast y broadcast en una red Wi-SUN.

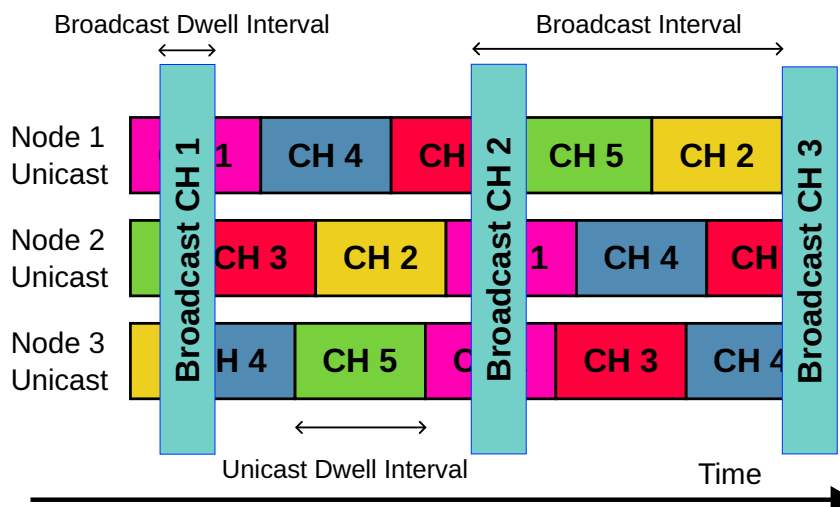


FIGURA 3.5: Ilustración de los horarios de canal para transmisiones unicast y broadcast en una red Wi-SUN FAN.

3.4.3 Operación multicast de RPL en una red Wi-SUN FAN

En una FAN Wi-SUN estándar, todas las transmisiones multicast a nivel IPv6 se traducen en transmisiones broadcast a nivel de enlace.

Esta solución presenta tres inconvenientes principales. El primero es la relación entre la latencia de los mensajes broadcast y el intervalo de broadcast (*Broadcast Interval (BI)*): cuanto menor es el BI, menor es la latencia, pero también se reduce la cantidad de ranuras disponibles para tráfico unicast. Aunque el valor de BI puede configurarse para una determinada FAN, normalmente es del orden de un segundo. Ajustar este valor para un caso de uso específico no es trivial, ya que depende del perfil de tráfico de todas las aplicaciones que utilizan la red.

El segundo inconveniente es que, a medida que aumenta el tráfico multicast, también lo hace la probabilidad de colisiones en cada ranura broadcast, la cual es compartida por todos los nodos de la FAN.

Por último, como los paquetes broadcast no son acuse de recibo (no tienen confirmación), las aplicaciones que requieren comunicaciones confiables deben implementar sus propios mecanismos de confiabilidad. Una estrategia posible consiste en introducir redundancia, enviando el mismo mensaje varias veces en la ranura de broadcast. Sin embargo, esto incrementa aún más la probabilidad de colisiones y la latencia.

Para abordar estos problemas, proponemos utilizar unicast a nivel de enlace (capa 2) para transmitir paquetes multicast a nivel de red (capa 3). En particular, en lugar de transmitir el paquete multicast a todos los vecinos mediante broadcast, cada mensaje multicast se reenvía como transmisiones unicast individuales a cada vecino que se sabe que actúa como nodo retransmisor (*forwarder*). Este método reduce significativamente la congestión del canal y la probabilidad de colisiones, lo que mejora la escalabilidad y eficiencia energética de la red.

Sin embargo, este enfoque requiere que cada nodo retransmisor tenga conocimiento de cuáles de sus vecinos también lo son. Esta información es proporcionada por la entidad centralizada encargada de configurar los grupos multicast.

3.5 Colección de datos

Antes de considerar cómo se forma el dominio y cómo se instala en cada nodo, es importante entender cómo se obtiene la información necesaria para formarlos. La raíz de la red, o más generalmente, la **entidad centralizada**, es la responsable de definir, instalar y mantener estos dominios dentro del DODAG a través de un grupo seleccionado de nodos. En adelante, me referiré a esta entidad como la "*entidad centralizada*".

Basándose en su conocimiento integral de la relación padre-hijo en la red, esta entidad puede formar una visión abstracta de toda la topología del DODAG. En el modo de no almacenamiento, la información topológica básica, es decir, el conocimiento de la estructura principal del DODAG, ya está disponible en la entidad centralizada.

Como se mencionó en el capítulo 2 (Estado del arte) más específicamente, en la sección 2.2, el borrador de Estado de enrutamiento iniciado por la raíz en RPL, también conocido como DAO Projection Draft [3], introduce extensiones del protocolo que enriquecen la información topológica disponible para la entidad, incluyendo relaciones entre nodos hermanos (*siblings*) que pueden ser útiles pero que no se aprovechan en la formación del DODAG principal. Para obtener esta información adicional, este documento añade la capacidad para que los nodos anuncien información complementaria sobre sus hermanos, lo cual permite a la entidad centralizada construir dominios con mayor información.

Este documento extiende la CMO (*Control Message Option*) para crear la **SIO**. El SIO es utilizado por un nodo compatible con RPL (*RPL Aware Node*, RAN) para anunciar una selección de sus vecinos candidatos como hermanos a la raíz. Esta opción se incluye

en los mensajes DAO que se envían directamente a la raíz en modo de no almacenamiento. Es posible colocar una o más SIO en estos mensajes.

Esta información es de gran importancia, ya que cada nodo en el dominio recibirá datos para la instalación del dominio, los cuales incluirán, entre otros aspectos, información sobre sus vecinos dentro del dominio. Así, de esta manera, la entidad centralizada obtiene conocimiento sobre los vecinos de cada nodo.

Por lo tanto, para que la entidad centralizada cuente con toda la información necesaria, se incluirá esta opción en los mensajes DAO enviados a la raíz.

De este modo, la entidad centralizada adquiere toda la información requerida para formar los dominios eficientemente.

3.6 Formación del dominio

Basándose en la información recopilada, la entidad centralizada organizará la red en dominios, correspondiendo cada dominio a una calle específica.

Aunque la configuración mínima de un dominio podría consistir únicamente en las luminarias, la solución propuesta busca mejorar la fiabilidad mediante el uso de distintas técnicas.

El enrutamiento *multipath* (o enrutamiento con múltiples caminos) implica establecer varios caminos distintos entre un origen y un destino dentro de la red. En lugar de depender de una única ruta, los paquetes de datos pueden transmitirse a través de diferentes trayectos que pueden operar en paralelo o servir como rutas de respaldo en caso de falla de la ruta principal. Esta estrategia aumenta significativamente la robustez y el rendimiento de la red.

Al comparar distintas alternativas de enrutamiento *multipath*, es fundamental considerar la calidad de los enlaces (o *link quality* en inglés). Evaluar la calidad de los enlaces desempeña un papel crucial en la selección de las rutas óptimas. Mediante esta evaluación, la red puede identificar los caminos más fiables, minimizando así la probabilidad de pérdida de paquetes y la necesidad de retransmisiones.

Dado que el enfoque se centra en soluciones *multipath*, el objetivo es establecer dos rutas desde cada luminaria de origen hacia cada destino. Es decir, desde cada luminaria hasta todas las demás. Esto implica calcular los dos caminos más cortos que maximicen la calidad de los enlaces desde cada luminaria de origen hasta sus destinos respectivos.

Se consideran tres métodos diferentes para construir los dominios.

Sea S_i el i -ésimo grupo de farolas. Dado que las farolas en cada grupo deben encenderse en un orden específico, podemos definir una función que proporciona el siguiente elemento del nodo n_k en S_i como $\mathcal{F}_{S_i}(n_k)$. Queremos calcular un conjunto de nodos conectados D_i que contenga todos los nodos en S_i . El conjunto D_i más pequeño es la unión de los caminos más cortos entre cada par de nodos consecutivos en S_i : $\hat{D}_i = \cup_{n_k \in S_i} \mathcal{P}(n_k, \mathcal{F}_{S_i}(n_k))$, donde $\mathcal{P}(n_k, n_j)$ es el camino más corto entre n_k y n_j .

Como la distancia típica entre farolas es mucho menor que el rango de transmisión de un nodo, n_k y $\mathcal{F}_{S_i}(n_k)$ son vecinos (es decir, el enlace correspondiente está en E). En este caso, el dominio más pequeño que contiene todos los nodos en S_i es el propio S_i .

Para aumentar la confiabilidad, agregamos nodos a cada dominio utilizando una de las siguientes estrategias (para simplificar la notación, sea $n_j = \mathcal{F}_{S_i}(n_k)$). Un ejemplo se muestra en la Figura 3.6:

1. **Vecino Común:** Para cada par de nodos consecutivos (n_k, n_j) , seleccionar todos los vecinos en común ($K_{n_k, n_j} = \{n_h | (n_k, n_h) \in E \text{ y } (n_h, n_j) \in E\}$) y elegir aquel que maximice el producto de la Tasa de Entrega de Paquetes (o en inglés *Packet Delivery Ratio* (*PDR*)) de los enlaces a n_k y n_j ($\text{argmax}_{n_h \in K_{n_k, n_j}} w(n_k, n_h)w(n_h, n_j)$), donde $w(n_l, n_m)$ es la PDR entre n_l y n_m).

2. **Eliminación de Enlaces:** Eliminar de E los enlaces en $\hat{D}_i$ y luego calcular los caminos más cortos entre las farolas consecutivas.
3. **Eliminación de Nodos:** Para cada par de nodos de farolas (n_j, n_k) en S_i , eliminar todos los demás nodos en S_i que formen parte del dominio mínimo inicial $\hat{D}_i$, luego calcular el camino más corto entre n_j y n_k , y agregar todos los nodos intermedios al dominio final $\hat{D}_{if}$.

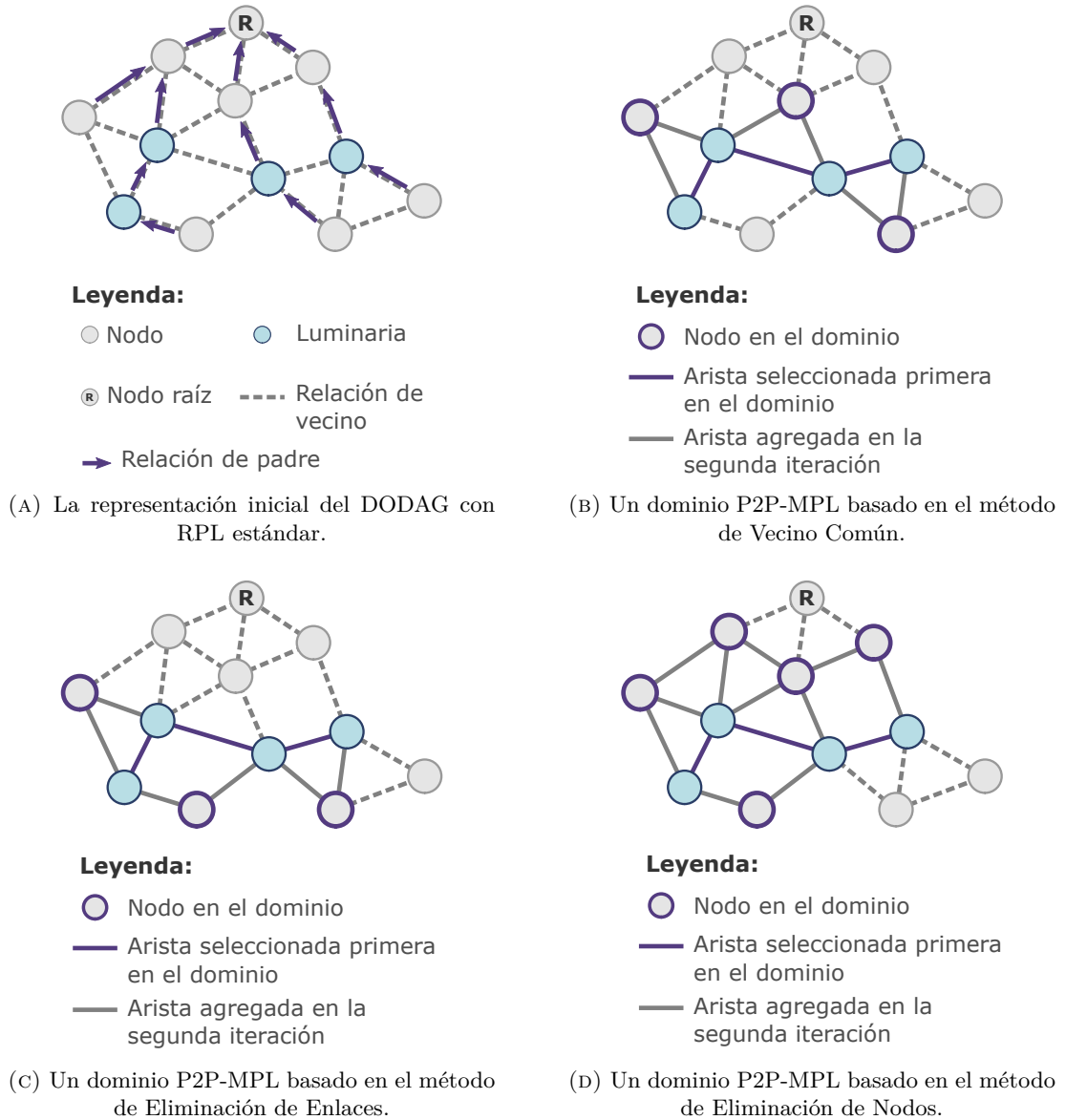


FIGURA 3.6: Los diferentes métodos utilizados para construir un dominio de multidifusión con redundancia.

En resumen, la técnica de eliminación de enlaces implica eliminar los enlaces utilizados en la primera ruta antes de calcular la segunda ruta más corta. Mientras que, en la alternativa de eliminación de nodos, los nodos que forman parte de la primera ruta se eliminan antes de calcular la segunda ruta más corta. Por último, para formar el dominio de vecino común, se selecciona el vecino común entre dos luminarias que maximice el producto de la Tasa de Entrega de Paquetes (PDR).

Consecuentemente, la inclusión de la nueva opción SIO en los mensajes DAO desempeña un papel crucial en el establecimiento de estos dominios, ya que facilita la identificación e integración de los nodos vecinos. Esto es especialmente relevante para la técnica de vecino común, que implica añadir un nodo vecino entre cada par de luminarias.

Consideremos la misma red mostrada previamente en la Figura 3.2, donde se tienen cinco luminarias numeradas del 0 al 4, representadas en azul.

Para entender cómo se construye cada dominio con las diferentes técnicas, nos enfocaremos en las primeras tres luminarias y en los nodos circundantes, como se observa en la Figura 3.7.

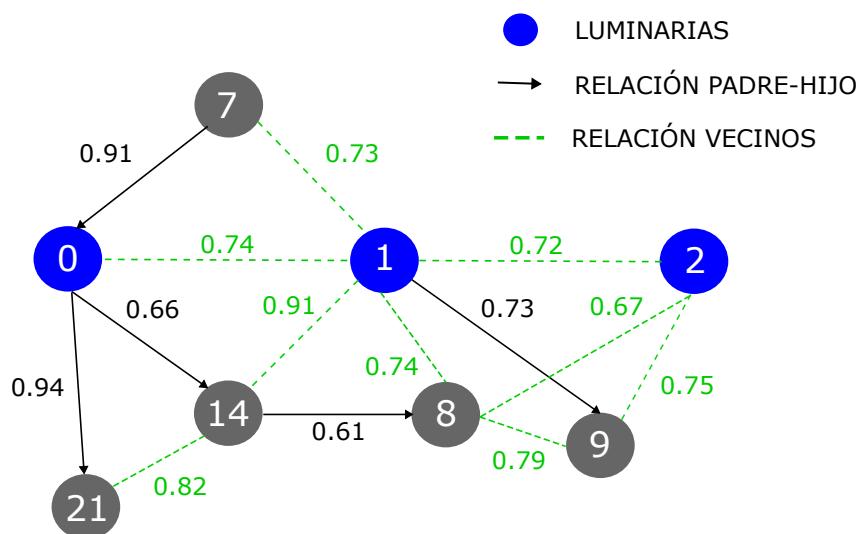


FIGURA 3.7: Vista ampliada de la red: luminarias seleccionadas y nodos adyacentes.

En la explicación de cada técnica, resulta fundamental tener en cuenta la calidad de los enlaces. La idea principal de la formación de dominios es establecer dos caminos desde cada luminaria de origen hacia cada una de las demás luminarias. La selección de estos dos caminos varía según cada técnica.

Para las dos primeras técnicas, eliminación de enlaces y eliminación de nodos, el objetivo es calcular los dos caminos más cortos que maximicen la calidad de enlace desde cada luminaria de origen hacia cada destino. La diferencia entre ambas técnicas radica en los elementos que se omiten al calcular el segundo camino. En el caso de la eliminación de enlaces, para el cálculo del segundo camino se excluyen los enlaces utilizados en el primer camino. De manera similar, en la técnica de eliminación de nodos, como el nombre indica, se omiten los nodos utilizados en el primer camino. En ambos casos, el objetivo sigue siendo calcular los dos caminos más cortos que maximicen la calidad del enlace.

Supongamos que queremos formar el dominio de acuerdo con la red de la Figura 3.7. El dominio mínimo consistirá únicamente de los tres nodos que representan las luminarias, es decir, los nodos azules. Sin embargo, por cada luminaria de origen se deberán calcular dos caminos posibles hacia cada destino, incorporando cada nodo de dichos caminos al dominio.

Si consideramos el cálculo de dos caminos posibles entre la luminaria 0 (origen) y la luminaria 2 (destino), en la Figura 3.8 se muestran los caminos disponibles.

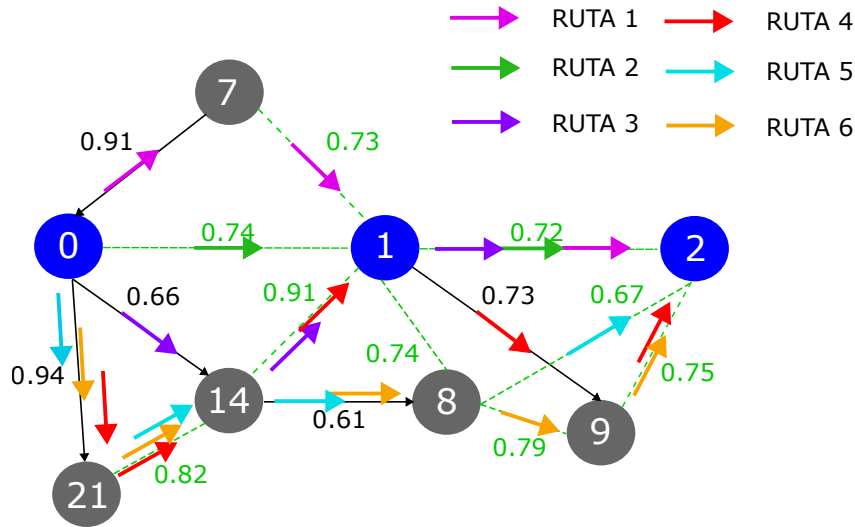


FIGURA 3.8: Posibles caminos entre la luminaria 0 y la luminaria 2.

El objetivo es identificar el camino más corto que maximice la calidad del enlace. Para adaptar esto a un algoritmo de ruta más corta podemos utilizar logaritmos, ya que maximizar el producto es equivalente a minimizar la suma de los logaritmos negativos de las calidades de los enlaces. Los cálculos para cada camino se detallan a continuación:

- Ruta 1 (Rosa): $0 \rightarrow 7 \rightarrow 1 \rightarrow 2$
 $= -\log(0.91) - \log(0.73) - \log(0.72) = 0.32$
- **Ruta 2 (Verde): $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2$**
 $= -\log(0.76) - \log(0.72) = \mathbf{0.26}$
- Ruta 3 (Violeta): $0 \rightarrow 14 \rightarrow 1 \rightarrow 2$
 $= -\log(0.66) - \log(0.91) - \log(0.72) = 0.36$
- Ruta 4 (Rojo): $0 \rightarrow 21 \rightarrow 14 \rightarrow 1 \rightarrow 2$
 $= -\log(0.94) - \log(0.82) - \log(0.91) - \log(0.73) - \log(0.75) = 0.41$
- Ruta 5 (Celeste): $0 \rightarrow 21 \rightarrow 14 \rightarrow 8 \rightarrow 2$
 $= -\log(0.94) - \log(0.82) - \log(0.61) - \log(0.67) = 0.50$
- Ruta 6 (Naranja): $0 \rightarrow 21 \rightarrow 14 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 2$
 $= -\log(0.94) - \log(0.82) - \log(0.61) - \log(0.79) - \log(0.75) = 0.56$

Dado que buscar el camino mínimo equivale a hallar el camino con mayor PDR (Tasa de Entrega de Paquetes), el mejor camino es el segundo, marcado en verde, que corresponde al enlace directo entre las luminarias.

Si aplicamos la técnica de eliminación de enlaces, tras encontrar este primer camino se eliminarán los enlaces utilizados en el cálculo, resultando en la red mostrada en la Figura 3.9.

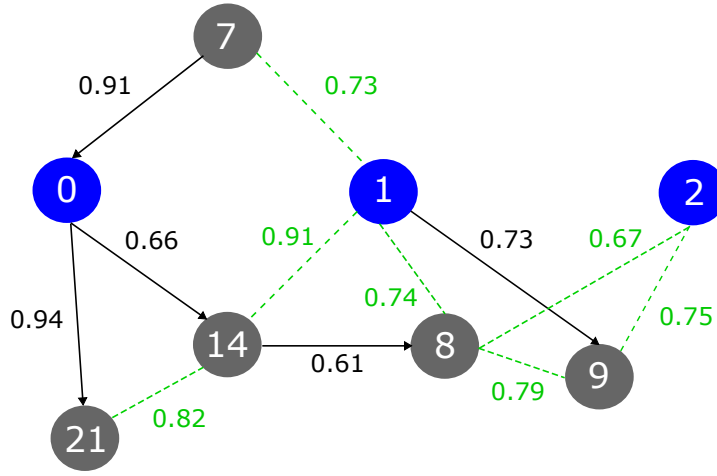


FIGURA 3.9: Red utilizada para calcular el segundo camino entre la luminaria 0 y la luminaria 2 utilizando la técnica de Eliminación de enlaces.

Esto limita las opciones de camino, eliminando algunas opciones de camino marcadas anteriormente. Ahora los caminos posibles son otros, los cuales se pueden observar en la Figura 3.10.

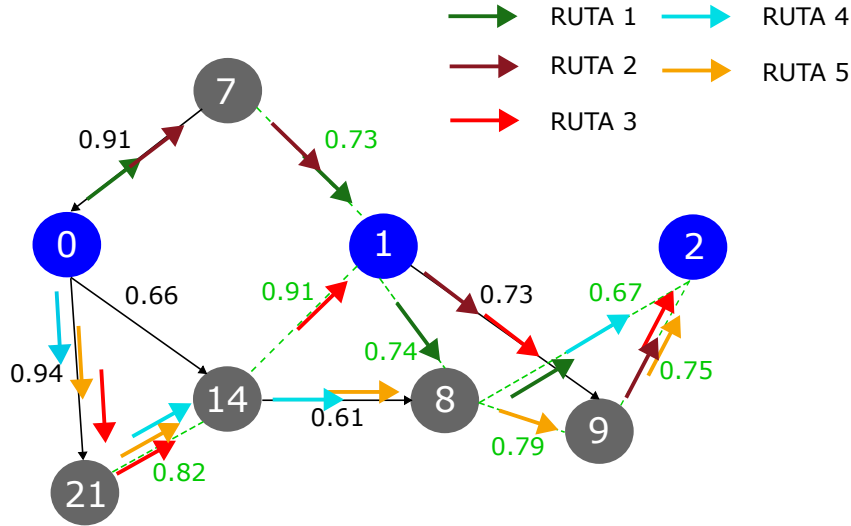


FIGURA 3.10: Posibles caminos entre la luminaria 0 y la luminaria 2.

Al realizar nuevamente los cálculos, el segundo camino con mayor PDR es el siguiente:

- Ruta 1 (Verde): $0 \rightarrow 7 \rightarrow 1 \rightarrow 8 \rightarrow 2$
 $= -\log(0.91) - \log(0.73) - \log(0.74) - \log(0.67) = 0.48$
- Ruta 2 (Marrón): $0 \rightarrow 7 \rightarrow 1 \rightarrow 9 \rightarrow 2$
 $= -\log(0.91) - \log(0.73) - \log(0.73) - \log(0.75) = 0.44$
- **Ruta 3 (Rojo):** $0 \rightarrow 21 \rightarrow 1 \rightarrow 9 \rightarrow 2$
 $= -\log(0.94) - \log(0.82) - \log(0.91) - \log(0.73) - \log(0.75) = \mathbf{0.42}$

- Ruta 4 (Celeste): $0 \rightarrow 21 \rightarrow 14 \rightarrow 8 \rightarrow 2$
 $= -\log(0.94) - \log(0.82) - \log(0.61) - \log(0.67) = 0.50$
- Ruta 5 (Naranja): $0 \rightarrow 21 \rightarrow 14 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 2$
 $= -\log(0.94) - \log(0.82) - \log(0.61) - \log(0.79) - \log(0.75) = 0.56$

Como resultado, el mejor camino es el marcado en rojo. De esta manera, se han encontrado los dos mejores caminos distintos para ir desde la luminaria 0 a la luminaria 2 sin reutilizar los mismos enlaces.

No obstante, aunque este segundo camino no reutiliza enlaces, repite nodos, en particular el nodo 1. Esto puede representar una desventaja en caso de que dicho nodo falle. Por este motivo, por otro lado, la técnica de eliminación de nodos propone omitir los nodos utilizados en el primer camino en lugar de los enlaces. En este caso, el algoritmo identifica el mejor camino inicial de la misma forma, pero, en vez de eliminar los enlaces, elimina los nodos utilizados (salvo la luminaria de origen y la de destino). La red resultante se muestra en la Figura 3.11.

Al descartar el nodo 1, se eliminan ciertos caminos, y algunos de los caminos antes posibles ya no están disponibles. Los caminos disponibles ahora se muestran en la Figura 3.11.

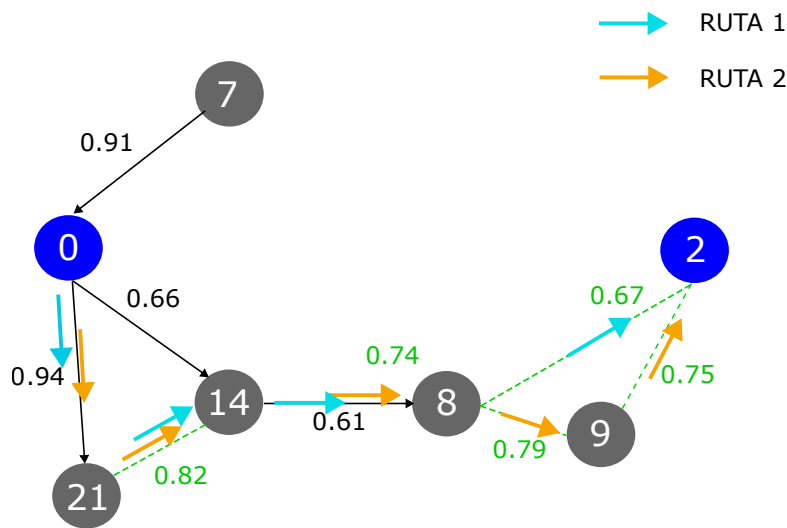


FIGURA 3.11: Red utilizada para calcular el segundo camino entre la luminaria 0 y la luminaria 2 utilizando la técnica de Eliminación de nodos.

Realizando nuevamente los cálculos, el segundo camino con mayor PDR es el siguiente:

- **Ruta 1 (Celeste):** $0 \rightarrow 21 \rightarrow 14 \rightarrow 8 \rightarrow 2$
 $= -\log(0.94) - \log(0.82) - \log(0.61) - \log(0.67) = \mathbf{0.50}$
- Ruta 2 (Naranja): $0 \rightarrow 21 \rightarrow 14 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 2$
 $= -\log(0.94) - \log(0.82) - \log(0.61) - \log(0.79) - \log(0.75) = 0.56$

A partir de este cálculo, el segundo mejor camino es el primero, marcado en celeste. Esto demuestra que se ha obtenido un camino distinto al calculado en el ejemplo anterior con la técnica de eliminación de enlaces.

Este procedimiento debe repetirse para cada luminaria de origen y cada destino.

Por otro lado, la técnica de dominio de vecino común es diferente de las anteriores, ya que no calcula dos caminos mínimos entre cada luminaria de origen y destino. En cambio,

selecciona el vecino común entre dos luminarias. Si existen múltiples opciones, se elige el vecino que maximiza el producto del PDR entre ambas luminarias.

Siguiendo con el mismo ejemplo, supongamos que queremos formar el dominio y seleccionar el vecino en común entre las luminarias 0 y 1, como se muestra en la Figura 3.12.

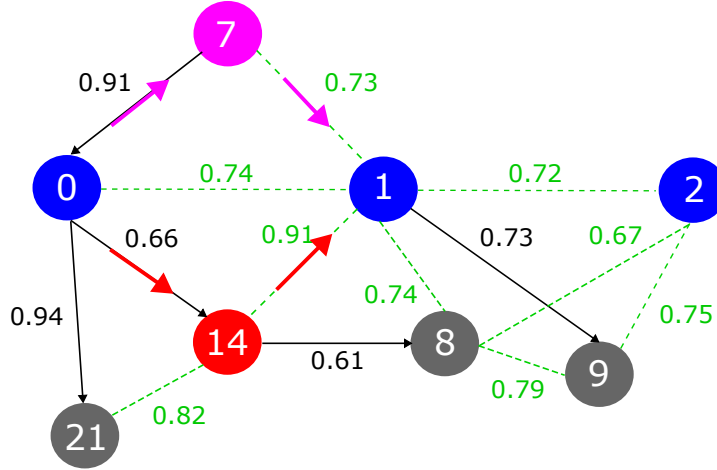


FIGURA 3.12: Vecinos en común entre las luminarias 0 y 1.

En este caso, hay dos opciones: el nodo 7 y el nodo 14. Dado que esta técnica selecciona el vecino común que maximiza el producto del PDR, los cálculos son los siguientes:

- **Vecino 7:** $0.91 * 0.73 = 0.664$
- **Vecino 14:** $0.66 * 0.91 = 0.601$

Por lo tanto, se selecciona el nodo 7 como vecino común y se añade al dominio. Este proceso se repite para cada par de luminarias. Por ejemplo, también se añade un vecino en común entre las luminarias 1 y 2. El dominio final obtenido se muestra en la Figura 3.13c.

Finalmente, los tres dominios posibles quedan compuestos de la siguiente manera:

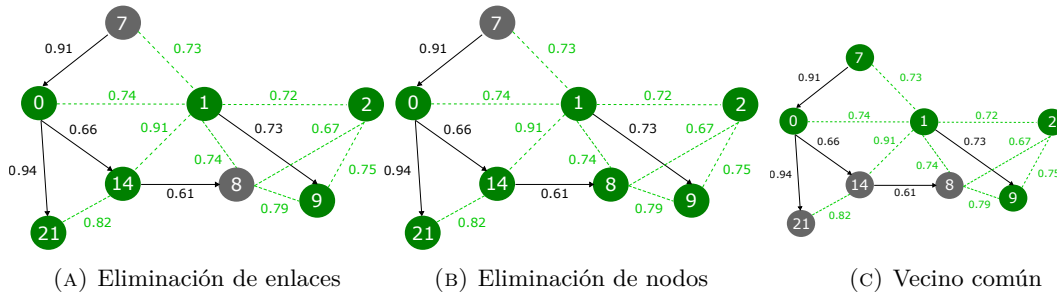


FIGURA 3.13: Dominios propuestos

- **Eliminación de enlaces:** $[0, 1, 2, 21, 14, 9]$
- **Eliminación de nodos:** $[0, 1, 2, 21, 14, 8, 9]$
- **Dominio de vecino común:** $[0, 1, 2, 7, 9]$

3.7 Instalación del dominio

Los paquetes de aplicación, que son los responsables de activar las luminarias, se enviarán dentro de un dominio de multidifusión utilizando, como fue mencionado previamente, el Protocolo Multicast para Redes de Baja Potencia y Alta Pérdida (MPL). Aunque MPL no especifica cómo se forman los dominios, adoptaremos las técnicas descritas en la sección anterior.

Una vez que la entidad centralizada ha formado un dominio, cada nodo debe contar con información específica para convertirse en parte de ese dominio y asegurar una comunicación adecuada.

La información esencial que cada nodo debe tener incluye:

1. En primer lugar, el nodo debe saber que forma parte del dominio y conocer su dirección específica de multidifusión (*MPL Domain Address*).
2. En segundo lugar, el nodo debe conocer su rol dentro del dominio, el cual puede ser como retransmisor (*forwarder*) o suscriptor (*subscriber*):
 - Un **retransmisor** es un router que implementa el protocolo MPL. Como su nombre sugiere, su función es reenviar los mensajes dentro del dominio.
 - Un **suscriptor** es un retransmisor que suscribe su interfaz (*MPL Interface*) a la dirección de multidifusión del dominio (*MPL Domain Address*).

En este caso particular, las luminarias actuarán como *suscriptores*, ya que ellas serán las que responderán al recibir el mensaje, es decir, encendiéndose. Por otro lado, el resto de los nodos dentro de los dominios tendrán el rol de *retransmisores*, ya que son nodos adicionales incorporados para mejorar la fiabilidad de la transmisión. Por este motivo, su único propósito es reenviar el mensaje dentro del dominio para garantizar que este llegue a las luminarias y que estas se enciendan.

3. Finalmente, el nodo debe tener una lista de nodos vecinos que también pertenecen al dominio. Los mismos son conocidos por la entidad centralizada debido a la incorporación del SIO en los mensajes DAO que se envían directamente a la raíz.

Por lo tanto, es fundamental que la solución propuesta establezca un mecanismo para distribuir esta información a los nodos.

Para este propósito, en el resto de este documento, nos referiremos a este conjunto de datos como **MDCD**: *Multicast Domain Configuration Data* (o Datos de Configuración de Dominio Multicast en español). Esta es la información necesaria para configurar un nodo como parte de un dominio de multidifusión.

Se consideraron diferentes soluciones para llevar estos datos a los nodos, cada una con sus ventajas y desventajas.

Inicialmente, la primera alternativa pensada fue utilizar un paquete dedicado en la capa 3. Los mensajes de control de RPL se detallan en la sección 6 de la RFC 6550 [1]. Estos mensajes son paquetes de capa 3, específicamente paquetes ICMPv6, de tipo 155. Por ejemplo, el código es 0x00 para DIS, 0x01 para DIO, 0x02 para DAO, entre otros. Otro ejemplo es el P-DAO. En el borrador de estado de enrutamiento iniciado por la Raíz en RPL, también conocido como DAO Projection Draft [3], se utiliza el código 0x09 para los mensajes P-DAO.

Entonces, para instalar el comportamiento del dominio multicast en un nodo, la primera alternativa propuesta crea un paquete de control propio llamado **Información de Configuración del Dominio** (DCI sus siglas en inglés provenientes de *Domain Configuration Information*), que utiliza otro código, por ejemplo, 0x12.

Sin embargo, en las redes existe el principio de independencia de capa de red. Cada capa tiene un propósito específico. En este caso, la capa 3, o capa de red, tiene la función de transportar un paquete desde el origen hasta el destino a través de nodos de retransmisión. Configurar un nodo como parte de un dominio multicast para encender una luminaria no pertenece a la capa de red, sino más bien a la capa de aplicación, ya que esta configuración no contribuye directamente a la función de la capa de red. Por lo tanto, se puede argumentar que esta parte de la solución pertenece a la capa de aplicación.

En consecuencia, en lugar de usar un paquete de capa 3 para informar a un nodo que forma parte de un dominio multicast, otra alternativa es utilizar un paquete en la capa de aplicación.

En este caso, se presentan dos alternativas distintas:

1. Un paquete en la capa de aplicación con una capa de aplicación personalizada, sobre UDP.
2. Un paquete en la capa de aplicación, pero en conjunto con una capa de aplicación estándar.

La solución propuesta, para instalar el dominio en los nodos, utiliza un paquete de la capa de aplicación en conjunto con un protocolo estándar de capa de aplicación estándar, respetando el principio de independencia de capa de red. En este caso, el protocolo más adecuado es Constrained Application Protocol (CoAP).

La principal ventaja de este enfoque es que se trata de un estándar y cuenta con un mecanismo integrado de confirmación y retransmisión. En cualquier solución, es crucial asegurarse de que el paquete llegue para que los dominios puedan configurarse correctamente. Si alguno de los paquetes se pierde, habrá un nodo que no formará parte del dominio cuando debería hacerlo. Luego, si el dominio no se configura adecuadamente, la solución propuesta no funcionará, ya que las luminarias no podrán comunicarse entre sí. Al añadir confirmaciones y retransmisiones en la capa de aplicación, se reduce considerablemente la probabilidad de pérdida del paquete de configuración.

La Figura 3.14 resume los tres enfoques diferentes para instalar el dominio en cada nodo.

Por simplicidad y para aprovechar los protocolos existentes siempre que sea posible, proponemos utilizar un mensaje CoAP [23] desde el controlador hacia los nodos en los dominios para distribuir la información de MDCD.

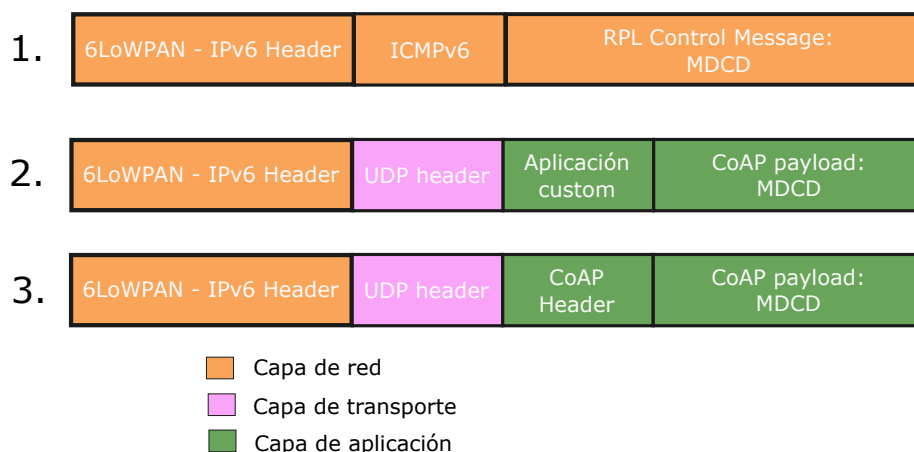


FIGURA 3.14: Tres posibles estructuras de paquetes para transportar los Datos de Configuración de Dominio Multicast (MDCD).

3.8 Extensiones a la solución

Esta aproximación inicial cumple con el objetivo de mejorar la latencia, dado que la luminaria que detecta movimiento no necesita enviar un mensaje a la raíz del DODAG cada vez que quiera enviar un mensaje al resto de las luminarias, como sería necesario siguiendo el estándar RPL. Adicionalmente, esta estrategia favorece la eficiencia energética, permitiendo que las luminarias permanezcan apagadas y solo se enciendan cuando una de ellas detecte movimiento.

Sin embargo, aunque esta primera aproximación cumple el objetivo, existen oportunidades de mejora.

En la solución propuesta, cada vez que una luminaria detecta movimiento, esta envía un mensaje dentro de su dominio de multidifusión, alcanzando a todas las luminarias del mismo, ya que la dirección de destino del mensaje es la dirección del dominio (*MPL Domain Address*). En consecuencia, todas las luminarias del dominio se encenderán, lo cual puede resultar ineficiente, especialmente en calles extensas. Esto sucede ya que todas las luminarias están subscriptas a la dirección del dominio, la cual es la dirección de destino del mensaje.

Encontrar un modo de evitar encender todas las luminarias es fundamental, ya que encender solo algunas resulta beneficioso en ciertos casos específicos. Por ejemplo, los siguientes casos:

- Si una persona o vehículo sale de su casa y no se conoce aún la dirección en la que se desplazará, es preferible encender solo unas pocas luminarias y esperar a que se determine la dirección en lugar de encender todas las luminarias, especialmente en calles largas.
- Incluso con la dirección conocida, no es necesario encender todas las luminarias de la calle, dado que el vehículo o persona podría detenerse en un punto específico, como un supermercado en la misma calle. En tal caso, tampoco es necesario encender la totalidad de las luminarias en esa dirección.
- Aún peor, en una intersección de calles, encender todas las luminarias en las cuatro direcciones sería ineficiente, especialmente si el vehículo o persona decide detenerse o tomar solo una de las calles.

Para abordar estos problemas, se propone una extensión a la solución previamente planteada.

3.8.1 Extensión

La entidad centralizada conoce la geolocalización de cada dispositivo, es decir, su posición específica en la red. Basándose en esta información, en el *MDCD*, la raíz no sólo enviará la lista de nodos vecinos de un nodo en el dominio, sino que también su ubicación relativa. Así, cada dispositivo conocerá la posición de cada uno de sus vecinos, es decir, cuáles están al este, oeste, norte o sur. Por supuesto, para que esto funcione, es necesario que la entidad centralizada cuente con la posición geográfica de cada nodo.

Con esta información, una luminaria puede decidir la dirección de envío de mensajes según la posición de sus vecinos, por ejemplo, enviando el mensaje hacia la izquierda o la derecha.

No obstante, este enfoque aún no resuelve el problema completamente. Por ejemplo, si una persona sale de su casa, la luminaria detectará el movimiento pero no conocerá la dirección de inmediato. Por lo tanto, es necesario enviar el mensaje en ambas direcciones, tanto hacia la izquierda como hacia la derecha.

Sin embargo, no queremos encender todas las luminarias de la calle. Especialmente, en calles largas, esto es muy ineficiente. Para evitar este problema, se introduce el concepto de límite de saltos a nivel de aplicación (*application hop limit*). Este parámetro permitirá, por ejemplo, que si el valor es 2, solo se enciendan las dos luminarias contiguas a la izquierda y las dos a la derecha. De esta manera, dependerá de la siguiente luminaria que detecte movimiento continuar con el encendido.

En conclusión, para abordar esta situación, es fundamental combinar el límite de saltos de aplicación con la detección de movimiento mediante sensores. Esto resulta clave, ya que encender solo algunas luminarias es útil en casos específicos mencionados anteriormente.

Consideremos el caso de una persona que sale de su casa. La luminaria detectará movimiento, pero aún no podrá determinar la dirección. Este escenario se ilustra en la Figura 3.15.

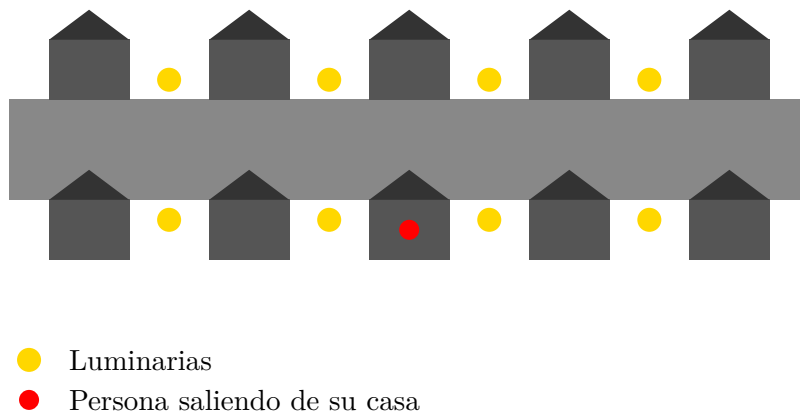


FIGURA 3.15: Persona saliendo de su casa.

El objetivo es no encender todas las luminarias de la calle. En este contexto, el límite de saltos de aplicación es un parámetro crucial. Combinado con el sensor de detección, únicamente las luminarias por las que continúe el vehículo o la persona se encenderán progresivamente.

3.8.2 Implementación

En términos de implementación, el límite de saltos de aplicación es un parámetro cuyo valor depende de la configuración particular de la red.

Es importante destacar que este límite de saltos se reducirá en uno únicamente por los suscriptores en el dominio (*MPL Subscribers*). Los nodos que actúan como retransmisores (*MPL Forwarders*) solo retransmitirán el mensaje, sin reducir el límite de saltos. Esto es esencial para lograr el objetivo de encender únicamente el número específico de luminarias, sin importar la cantidad de saltos que el mensaje deba realizar para alcanzarlas.

3.9 Conclusiones

En este capítulo, se presentó el protocolo Peer to Peer MPL (P2P-MPL), una solución diseñada para optimizar la comunicación en redes malladas inalámbricas utilizadas en entornos urbanos, como el control de luminarias. La solución aborda las limitaciones del protocolo RPL en modo de no almacenamiento, particularmente en el contexto de la latencia y el uso ineficiente de recursos al depender del nodo raíz para todas las comunicaciones.

La propuesta organiza los nodos en dominios lógicamente definidos y asigna una dirección específica a cada dominio. Este enfoque permite que las comunicaciones entre nodos

dentro de un mismo dominio sean locales, reduciendo significativamente el número de saltos necesarios y, por ende, la latencia nodo a nodo. Asimismo, se introdujeron métodos para construir dominios mediante estrategias de redundancia y calidad de enlaces, con el objetivo de garantizar tanto la eficiencia como la robustez en la transmisión de datos.

Finalmente, se detallaron los mecanismos de comunicación utilizados dentro de los dominios y su integración con las características de RPL, estableciendo un balance entre simplicidad, escalabilidad y confiabilidad. En el siguiente capítulo, se evaluará el desempeño de esta solución bajo diferentes escenarios simulados, para analizar su impacto en términos de latencia y fiabilidad.

Capítulo 4

Resultados simulados de casos de estudio

Para evaluar el rendimiento de P2P-MPL, se desarrolló un programa en Python para calcular el número total de transmisiones unicast y se realizó una comparación entre las siguientes soluciones:

- RPL estándar: cuando una luminaria detecta movimiento, envía un paquete unicast a cada una de las demás luminarias de su grupo. Los nodos reenvían los paquetes a través del DODAG en modo de no almacenamiento.
- RPL con Gateway: cuando una luminaria detecta movimiento, envía un paquete unicast a la raíz del DODAG, que se asume que contiene un gateway en la capa de aplicación. Al recibir un paquete de aplicación, este gateway envía un paquete unicast a cada una de las demás luminarias del grupo.
- Rutas proyectadas (*Projected Routes*): cada luminaria del grupo tiene instaladas dos pistas, o *tracks* en inglés (una para cada dirección), para comunicarse con las demás luminarias del mismo grupo. Cuando una luminaria detecta movimiento, utiliza estas pistas para enviar un paquete unicast a cada una de las demás luminarias de su grupo. Este enfoque es el descrito en el borrador de estado de enrutamiento iniciado por la Raíz en RPL, también conocido como *Destination Advertisement Object* (DAO) *Projection Draft* [3],

Las pistas en la alternativa de Rutas Proyectadas se calculan como los caminos más cortos entre cada par de luminarias dentro del mismo grupo. El camino más corto se determina utilizando el algoritmo de Dijkstra, basado en el Estimated Transmission Count (ETX) de los enlaces.

4.1 Configuración de red

Todos los cálculos fueron realizados bajo condiciones idénticas. Se creó un terreno con dimensiones específicas, donde las luminarias estaban dispuestas en paralelo y separadas por una distancia fija. Las simulaciones se realizaron utilizando un total de 11 luminarias,

cada una ubicada a una distancia de 50 m entre sí. En total, se consideró una red de 200 nodos, de los cuales 189 eran nodos “no luminarias”. Las dimensiones del terreno fueron de 650 m de ancho y 500 m de alto. Cada nodo tenía un rango de transmisión de 50 m, lo que permitía que cada luminaria pudiera conectarse solamente con sus vecinos inmediatos.

Para la creación de la red, primero se posicionaron todas las luminarias centradas en el terreno, dispuestas en paralelo y separadas por 50 m. Es decir, 11 luminarias fueron posicionadas cada 50 m en una línea horizontal en el medio del rectángulo. Posteriormente, los 189 nodos adicionales se distribuyeron de manera aleatoria dentro de las dimensiones del terreno. Uniformemente e independientemente se eligieron las coordenadas x e y entre 0 y 650 y 500, respectivamente. Para cada nodo, se identificaron como vecinos aquellos que se encontraban dentro del rango de transmisión, considerando las posiciones relativas de los nodos en el terreno. Es decir, aquellos nodos con distancia menor a 50 m fueron considerados vecinos. A cada par de nodos vecinos se les asignó aleatoriamente en el enlace un valor de PDR en el rango de $[0.5, 0.95]$.

La Figura 4.1 muestra un ejemplo de topología, incluyendo el DODAG, con un número limitado de nodos para mejorar la legibilidad.

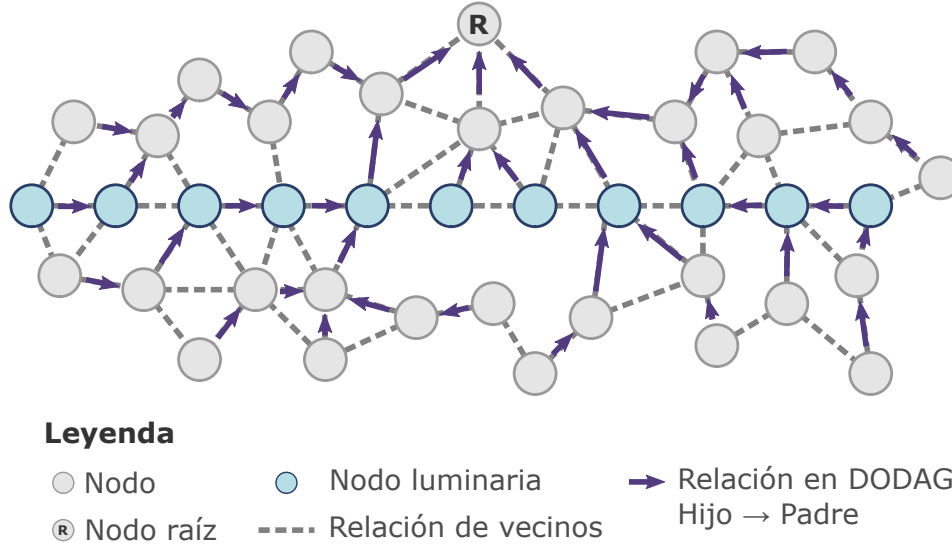


FIGURA 4.1: Una topología de ejemplo utilizada para calcular el número total de mensajes enviados.

Finalmente, se seleccionó como raíz un nodo aleatorio que no fuera una luminaria.

Con la raíz seleccionada, se replicó el funcionamiento de RPL para la formación del DODAG, tal como se describe en la subsección Construcción del DODAG (2.1.1) de la sección dedicada a RPL (2.1) en el Capítulo 2: Estado del arte. Básicamente, el nodo raíz inicia enviando un mensaje DIO. Los nodos ubicados dentro del rango de transmisión de la raíz reciben este mensaje, seleccionan un padre preferido y continúan retransmitiendo el DIO a los nodos dentro de su propio rango de transmisión. Para la selección del padre preferido, se utilizó la *Objective Function Zero (OF0)*, definida en el RFC 6552 [24].

La OF0 calcula el rango de un nodo basado en la suma del rango del padre preferido y las propiedades del enlace. La fórmula utilizada se muestra en la ecuación 4.1

$$R(N) = R(P) + \text{rank_increase} \quad (4.1)$$

Donde:

$R(N)$: Rango del nodo que recibió el DIO

$R(P)$: Rango del padre

$rank_increase$: incremento del rango, calculado como:

$$rank_increase = ((R_f \cdot S_p + S_r) \cdot MinHopRankIncrease)$$

Los parámetros utilizados fueron:

- $rank_factor$ (R_f): Entero positivo configurable que multiplica el efecto de las propiedades del enlace. Si no se configura, se asume un valor de 1. Para los cálculos, se utilizó $R_f = 1$.
- $step_of_rank$ (S_p): Depende de la calidad del enlace y utiliza el Expected Transmission Count (ETX) definido en el RFC 6551 [25]. Para los cálculos, se estimó como:

$$ETX = \frac{1}{link\ quality} \quad (4.2)$$

$$S_p = \frac{100}{ETX} = 100 \times link\ quality \quad (4.3)$$

- $stretch_of_rank$ (S_r): Incremento máximo permitido al $step_of_rank$. Para los cálculos, se utilizó $S_r = 0$.
- $MinHopRankIncrease$: Número arbitrario utilizado como incremento mínimo del rango. Se utilizó un valor de 256.

Para simplificar la implementación, se consideró que los DIOs siempre se entregaban con éxito. La calidad de enlace aleatoria sólo se utilizó para la selección de padres, con ETX calculado como $ETX = 1/PDR$.

La formación del DODAG, descrita previamente en este capítulo, se ilustra en la Figura 4.2. Este diagrama muestra los pasos clave involucrados en la construcción de la topología jerárquica del DODAG, destacando las relaciones entre los nodos y su organización en torno a la raíz.

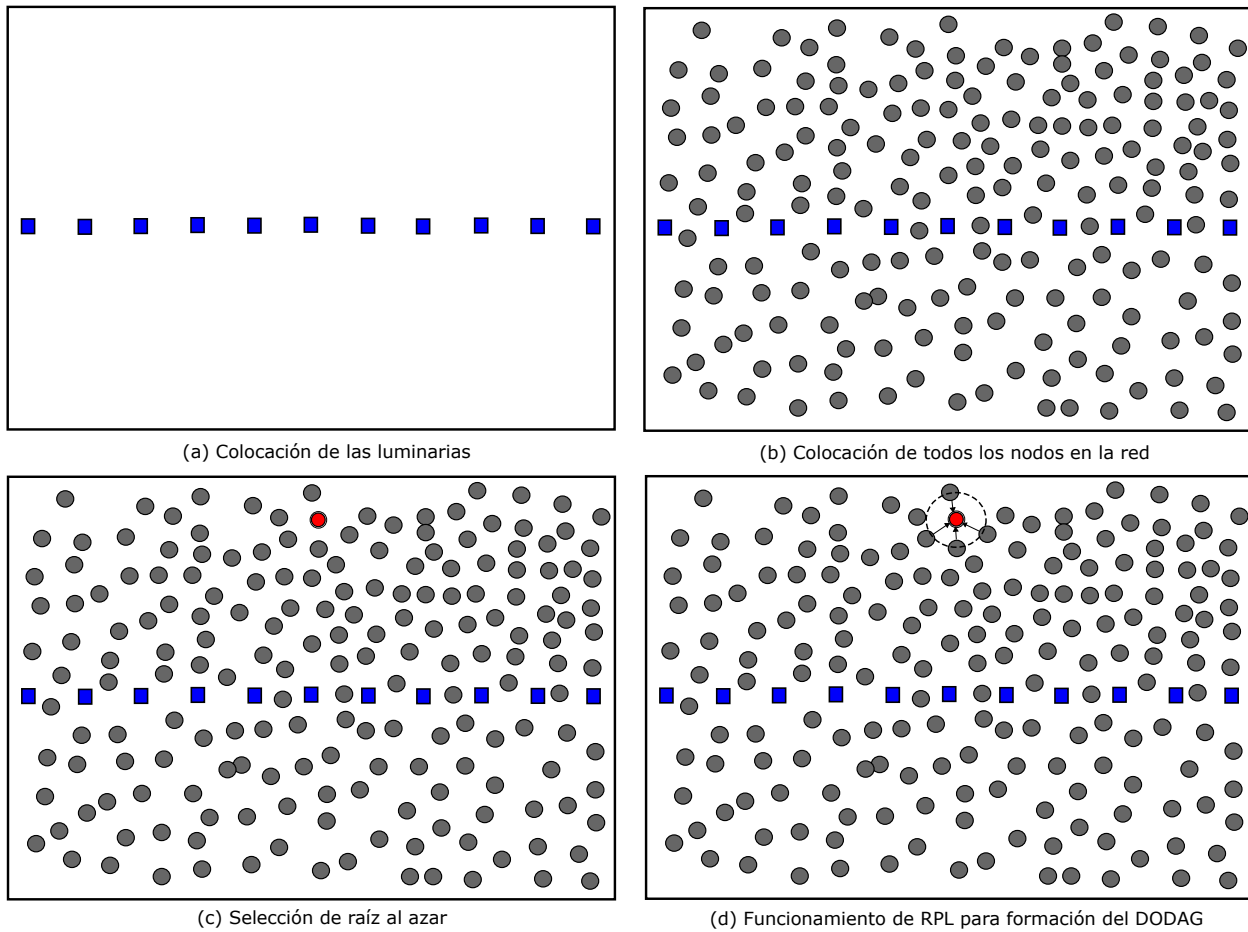


FIGURA 4.2: Ejemplo de formación del DODAG.

En la Figura 4.2a, primero se ubican todas las luminarias, representadas como cuadrados azules, separadas por una distancia fija de 50 m. En el segundo paso, mostrado en la Figura 4.2b, se distribuyen de manera aleatoria el resto de los nodos sobre un terreno de 650 m de ancho y 500 m de alto. Posteriormente, en la Figura 4.2c, se selecciona al azar un nodo raíz entre aquellos que no son luminarias. Finalmente, el proceso de formación del DODAG comienza: en la Figura 4.2d se observa la primera ola de mensajes DIO enviados por la raíz hacia los nodos dentro de su rango de transmisión, los cuales terminan seleccionándola como su padre preferido.

De esta manera, se construyó un DODAG compuesto por 200 nodos, de los cuales 11 son luminarias. Esta red se utilizó para realizar cálculos, como por ejemplo, el número de transmisiones necesarias para encender todas las luminarias desde una luminaria origen. Estos cálculos permitieron comparar las distintas alternativas propuestas.

Para todos los cálculos se usaron las mismas configuraciones de la red, las cuales son las siguientes:

- **Ancho del terreno:** 650 m.
- **Altura del terreno:** 500 m.
- **Número total de nodos:** 200.
- **Número de luminarias:** 11.
- **Separación entre luminarias:** 50 m.
- **Rango de transmisión:** 50 m.

Primero consideramos las técnicas de un solo camino, para cada uno de los tres métodos mencionados anteriormente, además de nuestra estrategia propuesta P2P-MPL. Esto significa que las pistas y dominios se construyen con el menor número posible de nodos. Luego, extendemos las pistas y dominios para contener múltiples caminos, con el fin de aumentar la fiabilidad.

4.2 Soluciones basadas en una única ruta

Para comenzar, esta sección se enfocará en las soluciones basadas en una **única ruta**, es decir, aquellas en las que una luminaria envía un mensaje a otra luminaria siguiendo una única ruta predeterminada.

Por este motivo, se construyeron las rutas y los dominios de multidifusión calculando el camino más corto entre cada par de luminarias vecinas. Dado que estas siempre pueden comunicarse directamente, debido a la configuración descrita anteriormente, las rutas y el dominio de multidifusión contienen únicamente a las luminarias. Se realizó una comparación entre P2P-MPL con RPL Simple, RPL con Gateway y Rutas Proyectadas, calculando el número total de transmisiones de paquetes cuando una luminaria necesita notificar a todas las demás sobre la presencia de un coche o un peatón.

Con RPL Simple, RPL con Gateway y Rutas Proyectadas, la luminaria que detecta el movimiento envía un paquete unicast a cada una de las otras diez luminarias, mientras que con P2P-MPL envía un único paquete multicast.

En el caso de RPL Simple, cada uno de los diez mensajes unicast utiliza el DODAG para llegar al nodo raíz y luego a las luminarias. RPL con Gateway reduce el número de mensajes enviando un solo mensaje desde la luminaria fuente hasta el nodo raíz, que luego enviará un mensaje unicast a cada una de las luminarias.

En la Figura 4.3 se ilustra el funcionamiento de RPL y de su versión con Gateway (*RPL with Gateway*) para la misma red utilizada como ejemplo a lo largo del documento. En este caso, la luminaria 0 detectó movimiento y debe enviar un mensaje al resto de las luminarias para que se enciendan.

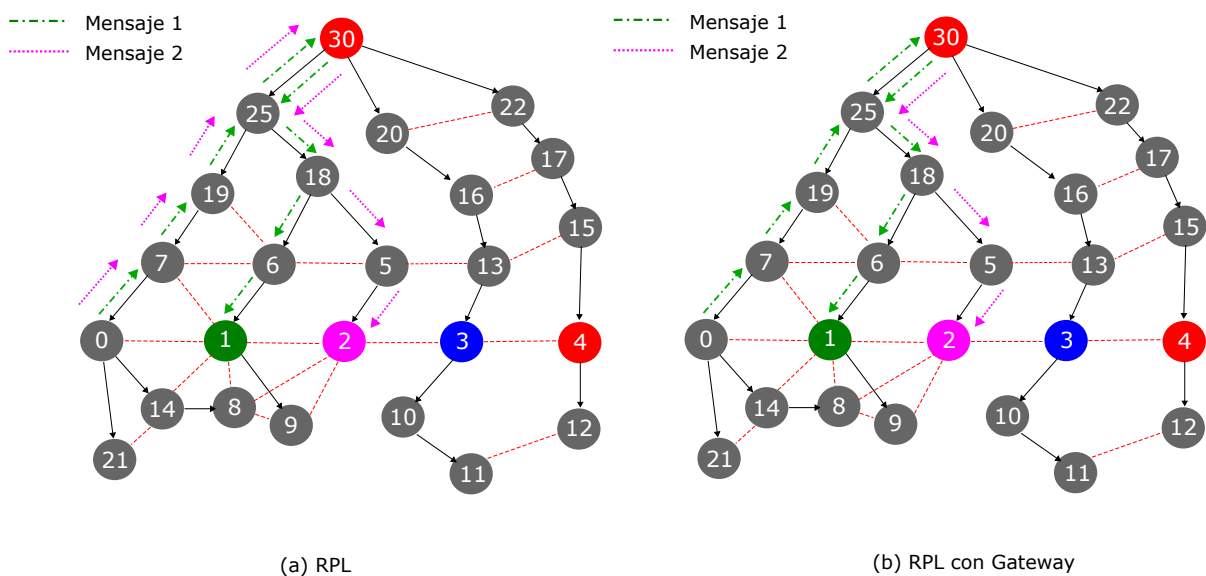


FIGURA 4.3: Ejemplo de envío de mensaje en un grupo de luminarias desde la luminaria 0 como origen al luminaria 1 para encenderlo. (a) muestra el envío usando la alternativa de RPL y (b) usando la versión con gateway.

En la Figura 4.3a se muestra el modo de operación de RPL, que implica el envío de un mensaje por cada luminaria en el grupo. Si n es la cantidad de luminarias, se deben enviar $n - 1$ mensajes desde la luminaria origen hacia la raíz. Luego, por cada mensaje recibido, la raíz reenvía un mensaje unicast a la luminaria correspondiente, que es el destino final. En cambio, la Figura 4.3b representa el funcionamiento de RPL con Gateway. En este caso, la luminaria origen envía un único mensaje a la raíz, la cual es responsable de distribuir mensajes unicast a cada luminaria destino.

Por el otro lado, tanto para la alternativa de Rutas Proyectadas como P2P-MPL, se calcularon los caminos más cortos desde cada par de luminarias vecinas. Como las mismas se pueden comunicar directamente, dada la configuración descrita anteriormente, las pistas y los dominios quedaron compuestos exclusivamente por nodos luminarias.

En la Figura 4.4 se observa el comportamiento tanto de Rutas Proyectadas como de la solución propuesta P2P-MPL, bajo el supuesto de que estamos considerando soluciones basadas en ruta única.

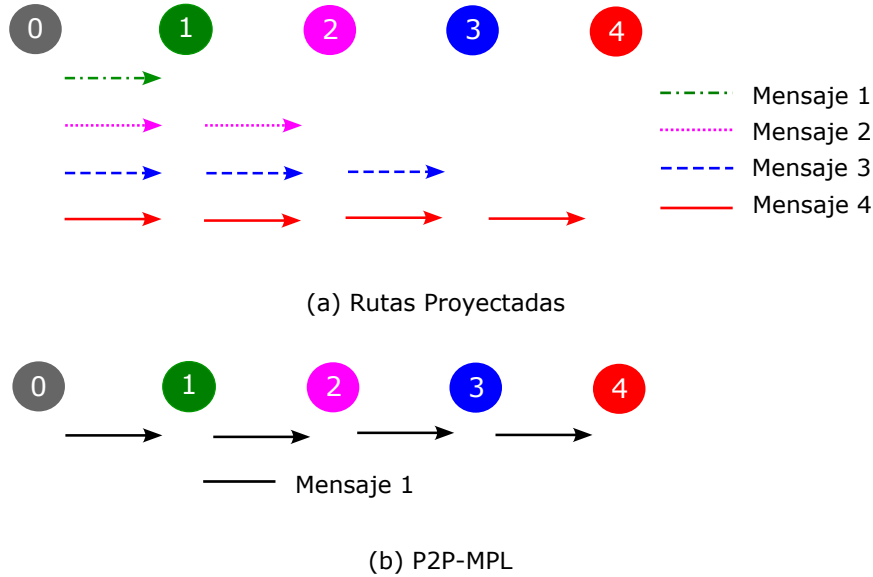


FIGURA 4.4: Ejemplo de envío de mensaje en un grupo de luminarias desde la luminaria 0 como origen a todo el resto de las luminarias. (a) muestra el envío usando la alternativa de Rutas Proyectadas y (b) usando la solución propuesta P2P-MPL.

La Figura 4.4a representa el modo de operación de Rutas Proyectadas. En esta alternativa, se instala una pista en cada luminaria, con todas las demás luminarias como destinos. De esta manera, en total, se instalan n pistas, cada una con $n - 1$ destinos. Por ejemplo, si la luminaria 0 detecta movimiento, debe enviar un mensaje a cada una de las demás luminarias. Esto implica $n - 1$ mensajes, donde cada uno tiene como origen la luminaria 0 y como destino una luminaria distinta. El número total de transmisiones requeridas se calcula siguiendo la ecuación 4.4.

$$\text{Número de transmisiones} = \frac{n(n - 1)}{2} \quad (4.4)$$

Donde n es el número de luminarias.

Por el otro lado, la Figura 4.4b ilustra el funcionamiento de la alternativa de P2P-MPL. En este caso, al estar considerando rutas únicas, el dominio está compuesto exclusivamente por nodos luminarias, es decir, el dominio mínimo. El número de transmisiones requeridas en este caso es significativamente menor, dado por la ecuación 4.5.

$$\text{Número de transmisiones} = n - 1, \quad n : \text{número de luminarias} \quad (4.5)$$

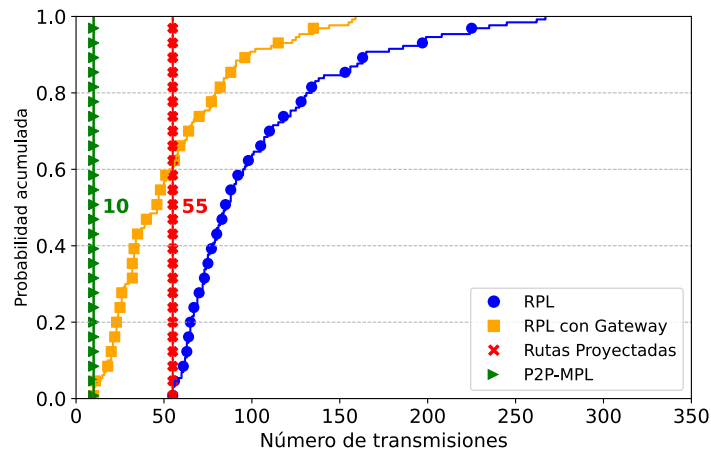
4.2.1 Número de transmisiones

Se calculó el número mínimo total de transmisiones requeridas utilizando cada estrategia para 500 topologías diferentes, cada una con su propio nodo raíz aleatorio. Además, es importante mencionar que se asumió que no hay pérdida de paquetes.

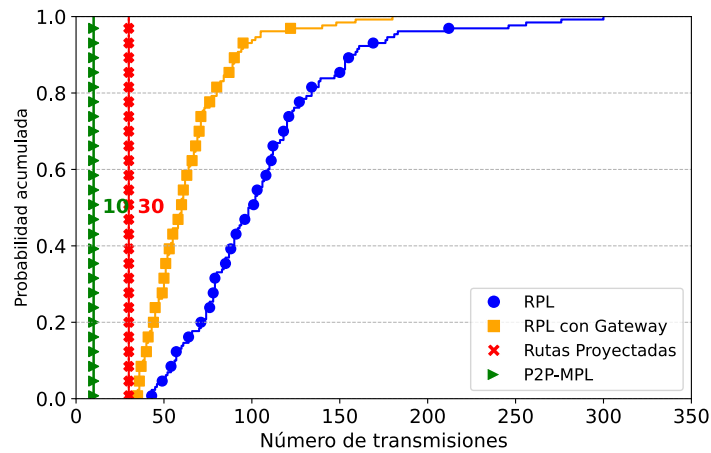
La Figura 4.5a muestra la CDF del número total de transmisiones cuando la farola más a la izquierda envía un mensaje, y la Figura 4.5b muestra el caso cuando la fuente es la farola en el medio.

Como se esperaba, el número total de transmisiones es independiente de la topología para P2P-MPL y las Rutas Proyectadas. P2P-MPL tiene el menor número posible de transmisiones, ya que un solo mensaje multicast es reenviado por cada farola.

El número de transmisiones para las Rutas Proyectadas depende de la ubicación de la farola fuente: cuando está en uno de los extremos, el número de transmisiones se maximiza, mientras que si está en el medio, se minimiza, ya que cada mensaje unicast tiene que recorrer menos saltos para llegar al destino.



(A) La farola más a la izquierda es la fuente.



(B) La farola en el medio es la fuente.

FIGURA 4.5: CDF del número de transmisiones para todos los enfoques considerados utilizando un solo camino. La diferencia entre ambas figuras es cuál farola es la fuente del mensaje.

En la Figuras 4.5a y 4.5b se utiliza la *CDF* (*Cumulative Distribution Function*) para visualizar la comparación de las transmisiones requeridas entre los distintos métodos analizados. Específicamente, se evaluó la situación bajo un escenario ideal de 100% de PDR (*Packet Delivery Ratio*), proporcionando un contexto donde no existen pérdidas de paquetes. Este enfoque permite una comparación directa entre los métodos en términos de eficiencia de transmisiones. Para obtener los resultados, se corrió una simulación 500 veces, siempre utilizando la misma configuración de red y formando un DODAG de acuerdo con la metodología previamente explicada. En cada iteración, se calculó la cantidad de transmisiones necesarias para cada alternativa, y con esta información, se generó la CDF para cada caso analizado.

Aunque RPL con Gateway muestra una mejora con respecto a la versión estándar de RPL, persiste una brecha significativa en comparación con las dos alternativas propuestas: Rutas Proyectadas y P2P-MPL. Ambas alternativas logran reducir sustancialmente el número de transmisiones necesarias para activar todas las luminarias. De hecho, el número total de transmisiones necesarias para RPL Estándar, y aún para RPL con Gateway, demuestra que estas soluciones no son adecuadas para el tráfico P2P en una red de malla. Estos resultados muestran que P2P-MPL y la alternativa de Rutas Proyectadas tienen, con diferencia, el mejor rendimiento en términos de número total de transmisiones. Si bien esta es una métrica clave, dada su influencia sobre el consumo energético y la carga de la red, no es la única. La entrega confiable de paquetes es otro indicador esencial que debe considerarse.

En el caso de soluciones de ruta única, tanto la alternativa de Rutas Proyectadas como P2P-MPL mantienen un número constante de transmisiones, independiente de la luminaria origen. Basado en estos resultados, podemos concluir que la solución propuesta P2P-MPL supera a la alternativa de Rutas Proyectadas en términos de menor número de transmisiones requeridas para soluciones de ruta única. No obstante, cabe destacar que este análisis no considera ciertos factores críticos, como la confiabilidad de la red. El uso exclusivo de una única ruta entre origen y destino introduce riesgos significativos, como la posible inutilización de enlaces debido a condiciones climáticas adversas (viento, lluvia, etc.) o la desconexión de un nodo de la red, entre otras cosas. En la siguiente sección, abordaremos el uso de múltiples rutas, una técnica bien establecida, para mejorar la fiabilidad de la red.

En resumen, estos resultados evidencian de manera clara las mejoras que ofrecen las alternativas propuestas frente a RPL y su versión con Gateway en términos de eficiencia de transmisiones. Sin embargo, este análisis es sólo parcial. En la próxima sección, se explorarán las versiones de rutas múltiples de estas alternativas, con el objetivo de encontrar una solución que no solo minimice el número de transmisiones, sino que también garantice una mayor fiabilidad de la red.

4.3 Protocolos de enrutamiento basados en rutas múltiples

Luego de los resultados obtenidos en la sección de soluciones basadas en ruta única, esta sección se centra en mejorar las técnicas de Rutas Proyectadas y P2P-MPL mediante la implementación de enrutamiento basado en rutas múltiples. Esto implica añadir más nodos de retransmisión a la pista y al dominio, respectivamente, aumentando la robustez y el desempeño de la red.

El enrutamiento de rutas múltiples consiste en establecer múltiples caminos distintos entre un origen y un destino dentro de una red. En lugar de depender de una única ruta, los paquetes de datos pueden transmitirse a través de diversas rutas, ya sea en paralelo o como respaldo en caso de que falle la ruta principal. Este enfoque mejora significativamente la fiabilidad y el rendimiento de la red. Aplicamos este enfoque a P2P-MPL y a las Rutas

Proyectadas añadiendo más nodos de retransmisión al dominio y a la pista. Por las razones mencionadas anteriormente, RPL Estándar y RPL con Gateway no fueron incluidos en esta evaluación.

Un aspecto crítico al comparar alternativas de enrutamiento de rutas múltiples es la calidad de los enlaces. Evaluar la calidad de los enlaces permite seleccionar caminos óptimos, reduciendo la probabilidad de pérdida de paquetes y la necesidad de retransmisiones.

En la sección anterior de Soluciones basadas en una única ruta (4.2), se demostró que la solución propuesta P2P-MPL obtuvo los mejores resultados en términos de número de transmisiones, seguida por la alternativa de Rutas Proyectadas. Para esta sección, se analizaron cinco enfoques diferentes para evaluar estas dos alternativas en el contexto de rutas múltiples.

Al ser el foco las alternativas basadas en rutas múltiples, el objetivo principal es establecer dos rutas desde cada luminaria origen hasta todas las luminarias destino. En el caso de P2P-MPL, esto implica integrar nodos adicionales al dominio mínimo, el cual originalmente sólo incluía las luminarias. Como fue mencionado previamente en el Capítulo 3 de Peer to Peer MPL (P2P-MPL) en la sección de Formación del dominio (3.6), se implementaron tres métodos diferentes para construir los dominios:

1. **Eliminación de enlaces:** Se eliminan los enlaces utilizados en la primera ruta antes de calcular la segunda ruta más corta.
2. **Eliminación de nodos:** Se eliminan los nodos que forman parte de la primera ruta antes de calcular la segunda ruta más corta.
3. **Dominio de vecino común:** Se selecciona un vecino común entre dos luminarias que maximice el producto de la Tasa de Entrega de Paquetes (PDR).

Estos tres métodos se evaluaron usando la alternativa propuesta P2P-MPL.

Por otro lado, en el caso de la alternativa de Rutas Proyectadas, como fue mencionado, se requiere una pista para cada luminaria origen, con todas las demás luminarias como destinos. Para calcular estas pistas, se determinan los dos caminos más cortos que maximizan la calidad del enlace desde cada luminaria origen hacia todas las luminarias destino. Para lograrlo, se crea un nuevo grafo con los mismos nodos y aristas, asignando un peso de $1/\text{calidad del enlace}$ a cada arista. Posteriormente, se aplica el algoritmo de Dijkstra para encontrar los caminos más cortos en cada caso.

Además, la configuración utilizada en esta sección es idéntica a la mencionada en la sección 4.1 (Configuración de red), con la misma configuración y formación del DODAG. Sin embargo, se consideraron dos escenarios distintos:

1. **Comunicación directa:** Cada luminaria sólo puede comunicarse con sus vecinos inmediatos (anterior y siguiente). Dado que las luminarias están separadas por 50 m, el rango de transmisión de cada nodo se limita a 50 m, al igual en la sección anterior.
2. **Rango extendido:** Cada luminaria puede comunicarse con sus dos vecinos anteriores y dos vecinos siguientes. En este caso, el rango de transmisión de cada nodo se amplía a 100 m, lo que introduce nuevas posibilidades de conexión y caminos.

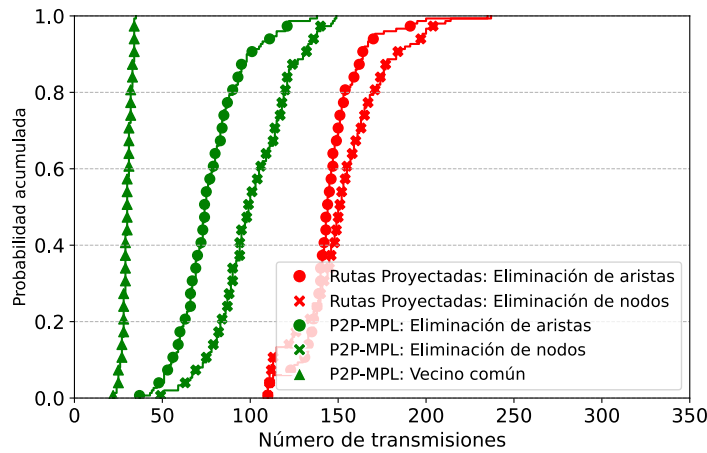
En los siguientes apartados, se presentan y analizan los resultados obtenidos para cada método en ambos escenarios, destacando el impacto del rango de transmisión en la eficiencia y la confiabilidad del enrutamiento.

4.3.1 Comunicación directa

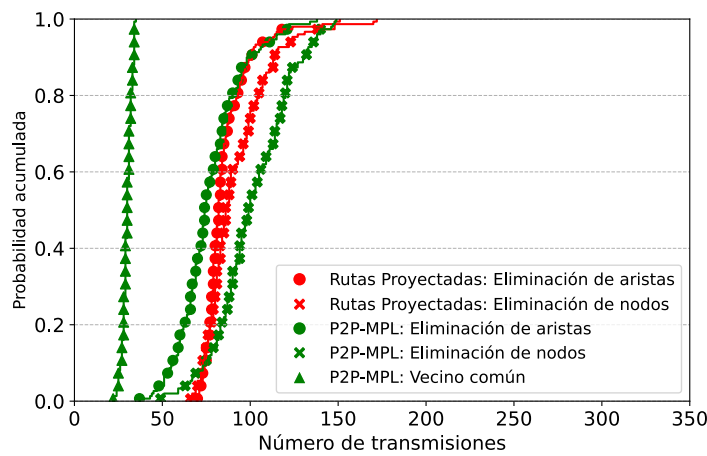
Primero, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas bajo el esquema de comunicación directa entre las luminarias. Posteriormente, se incluirán los resultados obtenidos con el rango de transmisión extendido, a modo de comparación.

Número de transmisiones

Al igual que en secciones anteriores, se midió la cantidad de transmisiones necesarias para que una luminaria de origen logre activar al resto de las luminarias en la red. Los resultados obtenidos para las cinco alternativas evaluadas se presentan en las Figuras 4.6a y 4.6b, para las luminarias 0 y 5, respectivamente.



(A) La farola más a la izquierda es la fuente.



(B) La farola en el medio es la fuente.

FIGURA 4.6: CDF del número de transmisiones para todos los enfoques considerados utilizando rutas múltiples y comunicación directa. La diferencia entre ambas figuras es cuál farola es la fuente del mensaje.

Para analizar los resultados, se emplearon gráficos de Función de Distribución Acumulada (*CDF*, por sus siglas en inglés). Estos gráficos permiten observar la cantidad de transmisiones requeridas por las diferentes metodologías en las simulaciones realizadas. Como fue previamente explicado también en la sección anterior, se realizaron 500 simulaciones. En cada caso, se generó una red con las mismas configuraciones dadas (cantidad de nodos, luminarias, distancias, etc.). Para cada red, se calcularon las dos posibles pistas y los tres dominios mencionados en capítulos previos, utilizando los métodos explicados. A partir de esto, se determinó, en cada alternativa, la cantidad de transmisiones necesarias para encender todas las luminarias desde una luminaria de origen, es decir, la cantidad de transmisiones requeridas para alcanzar todas las luminarias y activarlas. Finalmente, con los resultados de las 500 simulaciones, se generó el gráfico de CDF.

Los resultados demuestran una clara superioridad de P2P-MPL, particularmente al emplear el Dominio de Vecino Común, en términos de cantidad de transmisiones. Esta alternativa requiere significativamente menos transmisiones para activar todas las luminarias cuando una de ellas detecta movimiento, en comparación con las demás alternativas evaluadas.

Una vez más, P2P-MPL supera a las Rutas Proyectadas, ya que en estas el nodo origen debe enviar un paquete unicast diferente a cada destino. La diferencia entre ambas soluciones es menor cuando la luminaria central es la fuente, ya que en este caso la distancia al resto de las luminarias es más corta. Se deben enviar dos paquetes multicast: uno hacia las luminarias de la izquierda y otro hacia las luminarias de la derecha.

Fiabilidad

El principal objetivo del enfoque *multipath* es mejorar la confiabilidad, aunque esto implique un mayor número de transmisiones en comparación con las técnicas de camino único.

Se cuantificó la confiabilidad utilizando tres indicadores de rendimiento. El primero es la probabilidad de que todas las luminarias reciban el mensaje desde cualquier fuente. Esta métrica se ha evaluado mediante una simulación de Monte Carlo.

El segundo indicador es el número de nodos que deben eliminarse del grafo del dominio para desconectar una o más luminarias, llamado *Minimum Vertex Cut*.

Por último, también se consideró el número de aristas que deben eliminarse para provocar la desconexión de una o más luminarias, llamado *Minimum Edge Cut*.

Estos últimos dos indicadores ayudan a identificar puntos únicos de falla en la topología.

Probabilidad de encender todas las luminarias

Se calculó la probabilidad de que todas las luminarias reciban un mensaje desde la luminaria de origen y, en consecuencia, se enciendan. Esta métrica fue calculada para los tres dominios posibles: eliminación de aristas, eliminación de nodos y dominio de vecino común. El objetivo de esta medición es evaluar la fiabilidad de cada uno de los enfoques propuestos.

Para ello, se utilizó una simulación Monte Carlo. Una simulación de Monte Carlo es un método utilizado para modelar la probabilidad de diferentes resultados en un proceso que no puede preverse fácilmente debido a la intervención de variables aleatorias. En este tipo de simulación, se asigna un valor aleatorio a la variable con incertidumbre; luego, el modelo se ejecuta y se obtiene un resultado. Este proceso se repite múltiples veces, asignando diferentes valores a la variable en cuestión. Una vez completada la simulación, los resultados se promedian para obtener una estimación.

En este caso, en lugar de simular el envío de mensajes y encontrar una solución analítica, el objetivo fue generar gráficos aleatorios y verificar si todas las luces de calle estaban conectadas. Este proceso se repitió muchas veces y los resultados fueron promediados.

Los pasos del algoritmo son los siguientes:

1. Se genera un gráfico aleatorio.
 - Los nodos siempre son los mismos.
 - Cada enlace tiene una probabilidad de éxito.
2. Para cada arista, se decide de manera aleatoria si se incluirá en el gráfico aleatorio o no.

3. Una vez generado el gráfico aleatorio, el algoritmo verifica si todas las luminarias están conectadas. En otras palabras, si existe un camino desde cada luminaria hasta las demás.
 - Si existe un camino, se cuenta como un éxito.
 - Si no existe un camino, se cuenta como un fracaso.
4. Este proceso se repite muchas veces.
5. El resultado final es el promedio.
 - Según la ley de los grandes números, si repetimos este proceso muchas veces, el resultado debe converger.

En este caso, al igual que en todos los cálculos presentados, se corrió la simulación 500 veces, generando una red y formando el DODAG de acuerdo con la configuración previamente explicada.

Para cada una de las 500 topologías generadas, se conservaron únicamente los nodos y se agregó un enlace entre cada par de nodos cuya distancia fuera menor a 50 m, con una probabilidad igual al PDR de ese enlace en la topología original. De esta manera, se obtuvo un nuevo grafo donde los nodos vecinos no siempre estaban conectados.

Luego, se verificó si existía un camino que conectara todas las luminarias dentro del grupo; si esto ocurría, se contaba como un éxito. Esto es equivalente a una simulación a nivel de paquetes.

El proceso de generación de enlaces se repitió 500 veces para cada topología, y la probabilidad de que todas las luminarias recibieran el mensaje se estimó como la fracción de grafos en los que existía un camino conectando todas las luminarias. A partir de estos resultados, se construyó una gráfica CDF.

La Figura 4.7 muestra la CDF de la fracción de veces en que existió un camino entre cada par de luminarias en cada topología.

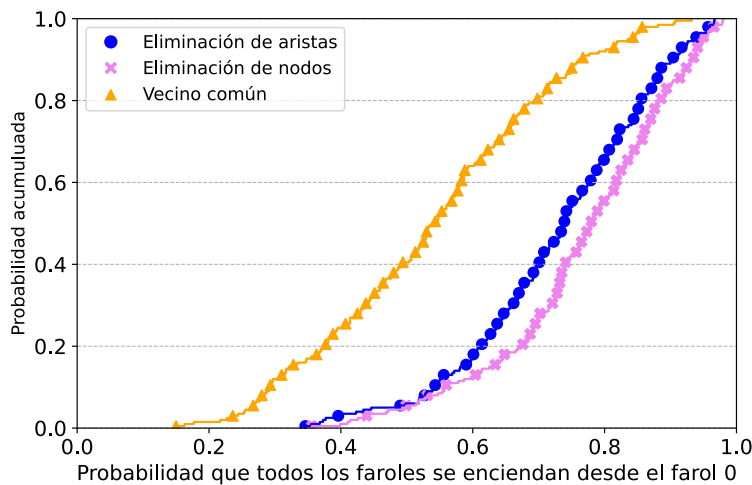


FIGURA 4.7: CDF de la probabilidad de que todas las luminarias en el dominio reciban el mensaje de cualquier luminaria con los diferentes enfoques considerando rutas múltiples.

Debido a la naturaleza de la simulación de Monte Carlo, los resultados no están vinculados a una luminaria de origen específica; es decir, o todas las luminarias tienen conexión dentro del dominio, o no la tienen, sin importar el nodo desde donde se origina el mensaje.

Respecto a los resultados, el Dominio de Eliminación de nodos mostró la mayor probabilidad de que todas las luminarias recibieran el mensaje, seguido por el Dominio de Eliminación de aristas y, finalmente, el Dominio de Vecino Común.

Esto indica que, aunque el Dominio de Vecino Común utiliza menos transmisiones, no es tan robusto, lo que resulta en una menor probabilidad de entrega de paquetes. Este resultado es lógico, ya que este dominio incluye menos nodos, al estar compuesto únicamente por las luminarias y sus vecinos comunes. En contraste, el Dominio de Eliminación de nodos incluye la mayor cantidad de nodos, ya que evita la repetición de nodos entre los dos caminos diferentes de una luminaria a otra.

Para profundizar en el estudio de la robustez de P2P-MPL, se calcularon dos métricas adicionales relacionadas con la fiabilidad y la robustez de un dominio: el corte mínimo de aristas (*Minimum Edge Cut*) y el corte mínimo de vértices (*Minimum Vertex Cut*). Este análisis se realizó sobre 100 topologías generadas con la misma configuración.

Corte de mínimo de aristas

El mínimo de aristas representa el menor número de aristas que deben ser eliminadas para desconectar un dominio.

Los resultados obtenidos se pueden observar en el Cuadro 4.1.

CUADRO 4.1: Corte mínimo de aristas en los distintos dominios

Probabilidad según alternativa	Aristas removidas para desconexión		
	1	2	3
Eliminación de aristas	19	80	1
Eliminación de nodos	19	80	1
Vecino común	69	31	0

Es importante destacar que el Dominio de Vecino Común es el menos robusto, ya que al eliminar una sola arista, existe un 69% de probabilidad de que el dominio se desconecte. En comparación, tanto el Dominio de Eliminación de aristas como el Dominio de Eliminación de nodos presentan una probabilidad del 19% de que el dominio se desconecte. Cabe señalar que estos dos últimos dominios obtienen los mismos resultados en cuanto a la probabilidad de desconexión del dominio.

Corte mínimo de vértices

Por otro lado, el corte mínimo de vértices se refiere al número mínimo de nodos que deben ser eliminados para desconectar el dominio.

Los resultados se pueden observar en el Cuadro 4.2.

CUADRO 4.2: Corte mínimo de vértices en los distintos dominios

Probabilidad según alternativa	Nodos removidos para desconexión	
	1	2
Eliminación de enlaces	73	27
Eliminación de nodos	31	69
Vecino común	100	0

Es importante señalar que el Dominio de Vecino Común es el menos robusto, ya que basta con remover un único nodo para desconectar el dominio. En cambio, el Dominio de

Eliminación de aristas es el segundo más robusto, mientras que el Dominio de Eliminación de nodos es el más robusto de los tres. Este comportamiento era esperado, ya que este último forma el dominio buscando los dos caminos más cortos que, además, son *node-disjoint* (sin nodos compartidos entre caminos). Esto da lugar a un dominio con una mayor cantidad de nodos, lo que significa que se deben eliminar más nodos para desconectar el dominio.

4.3.2 Alcance extendido

Como se mencionó anteriormente, se realizaron cálculos adicionales sobre la misma red con características idénticas, pero en esta ocasión, se alteró el alcance de transmisión de las luminarias.

En los resultados previos, se asumió que cada luminaria solo podía comunicarse con su predecesor y sucesor inmediato. El objetivo, en este caso, es simular un escenario más realista, donde cada luminaria pueda comunicarse con sus dos luminarias anteriores y dos siguientes. En consecuencia, en lugar de utilizar un alcance de transmisión de 50 m, ahora se considera un alcance de 100 m para cada nodo, dado que la distancia entre luminarias es de 50 m. Esto permite simular un caso más cercano a la realidad, ya que las luminarias suelen tener un mayor alcance de comunicación que solo con la luminaria anterior y siguiente. Sin embargo, cabe destacar que el rango de comunicación considerado sigue estando por debajo del rango típico disponible, cuyo orden de magnitud puede ser de alrededor de 1 km.

Para este nuevo escenario, se midieron las mismas métricas con el fin de comparar cada alternativa. Además, cada métrica fue calculada de la misma manera explicada.

Número de transmisiones

Los resultados obtenidos para el número de transmisiones requeridas a través de las cinco alternativas se muestran en las Figuras 4.8 y 4.9, para las luminarias 0 y 5, respectivamente.

Aunque el enfoque de Rutas Proyectadas muestra ahora una mejora en comparación con P2P-MPL, esta última solución propuesta con el Dominio de Vecino Común nuevamente obtiene los mejores resultados en términos de número de transmisiones. Al igual que en el escenario en el que las luminarias solo podían comunicarse directamente, esta alternativa requiere menos transmisiones para encender todas las luminarias desde un único origen.

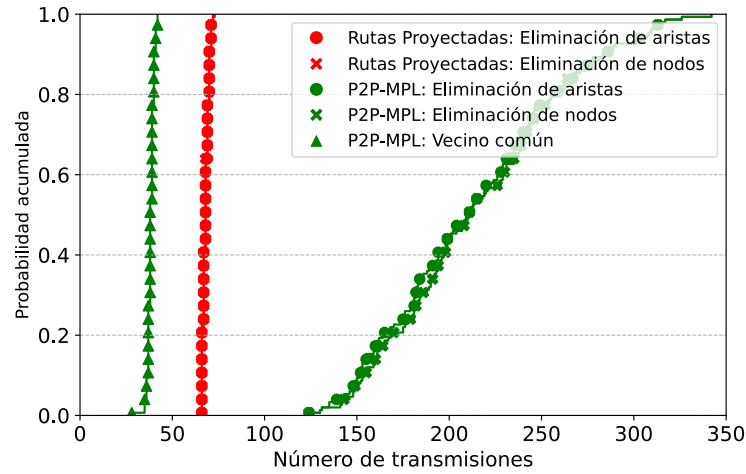


FIGURA 4.8: CDF del número de transmisiones para todos los enfoques considerando rutas múltiples y alcance extendido para la luminaria 0.

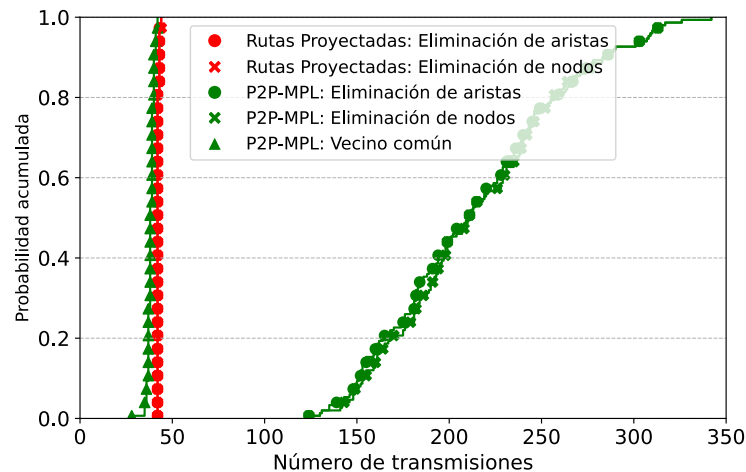


FIGURA 4.9: CDF del número de transmisiones para todos los enfoques considerando rutas múltiples y alcance extendido para la luminaria 5.

Fiabilidad

Para evaluar la fiabilidad en el caso de alcance extendido, las mismas métricas fueron medidas de la misma manera explicada previamente.

Probabilidad de encender todas las luminarias

En particular, se calculó la probabilidad de que todas las luminarias reciban un mensaje enviado desde cualquier nodo de luminaria como origen. Nuevamente, se empleó una simulación de Monte Carlo. Los resultados no se muestran, ya que en todas las técnicas evaluadas la probabilidad de que cada nodo reciba el mensaje es cercana a $1 - 10^{-5}$.

A diferencia del caso de comunicación directa entre las luminarias, donde se mostró que el Dominio de Vecino Común era el menos robusto, en este escenario, la probabilidad de que el mensaje llegue a todas las luminarias y, en consecuencia, se enciendan es de aproximadamente 100%. Este resultado demuestra que este dominio es una opción confiable y robusta.

Corte de mínimo de aristas

El Cuadro 4.3 muestra los resultados obtenidos para el corte mínimo de aristas en una red con las características dadas.

CUADRO 4.3: Corte mínimo de aristas en los distintos dominios

Probabilidad según alternativa	Aristas removidas para desconexión					
	1	2	3	4	5	6
Eliminación de aristas	0	12	27	36	22	3
Eliminación de nodos	0	13	26	36	22	3
Vecino común	0	0	100	0	0	0

Corte mínimo de vértices

Por último, el Cuadro 4.4 muestra los resultados obtenidos para el corte mínimo de vértices en una red con las características dadas.

CUADRO 4.4: Corte mínimo de vértices en los distintos dominios

Probabilidad según alternativa	Nodos removidos para desconexión					
	1	2	3	4	5	6
Eliminación de enlaces	0	15	39	36	8	2
Eliminación de nodos	0	16	39	35	8	2
Vecino común	0	100	0	0	0	0

Al igual que en el caso de la comunicación directa, el Dominio de Eliminación de nodos es la opción más robusta entre las alternativas consideradas. El segundo más robusto es el Dominio de eliminación de aristas y, por último, el Dominio de Vecino Común. Sin embargo, en este caso más realista, donde una luminaria puede comunicarse no solo con su anterior y siguiente, el Dominio de Vecino Común mostró una mejora en la robustez, manteniéndose como el dominio con el menor número de transmisiones necesarias para enviar un mensaje al resto de las luminarias y que estas se enciendan.

4.4 Resultados de las simulaciones

En ambos casos, tanto de comunicación directa como de alcance extendido, el Dominio de Vecino Común demostró ser el más eficiente en términos de la cantidad de transmisiones necesarias para encender todas las luminarias dentro de un dominio. Sin embargo, en lo que respecta a robustez, obtuvo los peores resultados en comparación con el Dominio de Eliminación de Aristas y el Dominio de Eliminación de Nodos. Este último destacó por su mayor robustez en las tres métricas evaluadas, seguido por el Dominio de Eliminación de Aristas y, finalmente, el Dominio de Vecino Común. No obstante, en el caso de alcance extendido, que representa un escenario más realista, el Dominio de Vecino Común mostró una mejora significativa en su robustez, alcanzando una probabilidad cercana al 100% de encender todas las luminarias desde una luminaria de origen.

Capítulo 5

Conclusión

Esta tesis abordó una problemática central en redes malladas de baja capacidad LLNs: la ineficiencia de la comunicación punto a punto (P2P) en el protocolo RPL, particularmente en aplicaciones que requieren respuestas rápidas y precisas, como los sistemas de iluminación inteligente. Se ha demostrado que este tipo de aplicación requiere técnicas especializadas para limitar la cantidad de saltos y, por lo tanto, mantener la latencia acotada. Mientras que las técnicas de enrutamiento tradicionales en redes malladas no pueden cumplir con los requisitos de baja latencia de esta aplicación, el uso de dominios de multidifusión dedicados resulta una alternativa viable para satisfacer todas las restricciones.

A través de un análisis exhaustivo del estado del arte y la implementación de simulaciones detalladas, se diseñó y evaluó una solución basada en la comunicación local en dominios para optimizar la latencia nodo a nodo. Este protocolo se denominó **Peer-to-Peer MPL: P2P-MPL**. Los resultados obtenidos destacaron que esta solución propuesta no solo reduce significativamente la cantidad de transmisiones necesarias en la comunicación P2P, sino que también mejora la eficiencia general del enrutamiento al disminuir la dependencia de la raíz en la gestión de mensajes. No obstante, los nodos que participan en los dominios de multidifusión deben ser cuidadosamente seleccionados, de modo que se garantice una alta fiabilidad de extremo a extremo sin un consumo excesivo de ancho de banda. Para ello, la técnica utilizada en la formación de dominios debe considerar cuidadosamente el rango de comunicación disponible en la red, ya que las relaciones de vecindad son un factor clave en la gestión de la confiabilidad.

Si bien este estudio se ha centrado en redes malladas inalámbricas con un rango relativamente corto, siempre teniendo en mente tecnologías de comunicación de rango medio a largo, los resultados indican que en estos escenarios es deseable añadir nodos reenviadores de multidifusión para mejorar la fiabilidad, en particular con la técnica de Eliminación de Nodos. En contraste, en escenarios con mayor rango de comunicación, más nodos de iluminación son vecinos entre sí y los caminos alternativos surgen naturalmente, proporcionando redundancia.

Estos hallazgos deberían conducir a estudios futuros en los que se desarrolle una solución más escalable.

Finalmente, los resultados de esta investigación no solo contribuyen al avance de las redes de iluminación inteligente, sino que también abren puertas para futuras aplicaciones

en otras áreas del Internet de las Cosas, donde la eficiencia en la comunicación P2P sigue siendo un desafío crucial.

5.1 Trabajo futuro

Existen diversas direcciones prometedoras para continuar y expandir el trabajo presentado en esta tesis. Una de las principales líneas de investigación futura consiste en extender las simulaciones realizadas a topologías dinámicas, donde los nodos estén en movimiento o las configuraciones de la red cambien constantemente. Esto permitiría evaluar la capacidad de la solución propuesta para adaptarse a escenarios más realistas y complejos.

Otra dirección importante es la validación experimental en entornos reales. Implementar la propuesta en una red física con hardware de bajo consumo y recursos limitados permitiría analizar el impacto de factores prácticos, como interferencias en la comunicación y fallas en los enlaces, en el desempeño del sistema.

Asimismo, sería valioso explorar la aplicabilidad de la solución en nuevos casos de uso dentro del ecosistema IoT. Ejemplos incluyen sensores industriales, dispositivos médicos conectados y ciudades inteligentes, donde las mejoras en la latencia punto a punto podrían tener un impacto significativo en el rendimiento global de los sistemas.

Además, sería interesante integrar mecanismos de optimización energética a la solución. Esto garantizaría que la reducción en la latencia no implique un aumento en el consumo energético de los nodos, preservando así la eficiencia y la duración de las baterías.

Por último, una línea de trabajo futuro sería adaptar y evaluar la propuesta en el contexto de otros protocolos de enrutamiento. Esto permitiría generalizar los beneficios de la solución a una mayor variedad de redes malladas de baja capacidad, ampliando aún más su alcance y aplicabilidad.

Bibliografía

- [1] R. Alexander, A. Brandt, J. Vasseur et al., *RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*, RFC 6550, mar. de 2012. DOI: 10.17487/RFC6550. dirección: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc6550>.
- [2] T. G. O. H. J. K. J. Levis P.; Clausen, *The Trickle Algorithm*, RFC 6206, 2011. DOI: 10.17487/RFC6206. dirección: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc6206>.
- [3] P. Thubert, R. Jadhav y M. Richardson, «Root initiated routing state in RPL,» Internet Engineering Task Force, Internet-Draft draft-ietf-roll-dao-projection-34, nov. de 2023, Work in Progress, 88 págs. dirección: <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-roll-dao-projection/34/>.
- [4] E. M. Goyal, E. Baccelli, M. Philipp, A. Brandt y J. Martocci., *Reactive Discovery of Point-to-Point Routes in Low-Power and Lossy Networks*, RFC 6997, ago. de 2013. DOI: 10.17487/RFC6997. dirección: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc6997>.
- [5] C. E. Perkins, S. Anand, S. Anamalamudi y B. R. Liu, «Supporting Asymmetric Links in Low Power Networks: AODV-RPL,» Internet Engineering Task Force, Internet-Draft draft-ietf-roll-aodv-rpl-18, ago. de 2023, Work in Progress, 44 págs. dirección: <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-roll-aodv-rpl/18/>.
- [6] C. Perkins, E. Belding-Royer y S. Das., *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*, RFC 3561, 2003. DOI: 10.17487/RFC3561. dirección: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc3561>.
- [7] M. Zhao, I. W.-H. Ho y P. H. J. Chong., *An Energy-Efficient Region-Based RPL Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*. 2016. DOI: 10.1109/JIOT.2016.2593438. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7516707>.
- [8] Y. C. Jiwon Jung e Y. Kwon, *Location-Aware Point-to-Point RPL in IndoorIR-UWB Networks*, mayo de 2020. DOI: 10.3390/electronics9050861.
- [9] Y. Kim y J. Paek., *NG-RPL for Efficient P2P Routing in Low-Power Multihop Wireless Networks*, oct. de 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3028771.
- [10] M. Mahyoub, A. S. H. Mahmoud, M. Abu-Amara y T. R. Sheltami., *NG-RPL for Efficient P2P Routing in Low-Power Multihop Wireless Networks*, nov. de 2020. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3038696.
- [11] Y. Kim y J. Paek., *IoTorii: Outperforming RPL with scalable routing*, mayo de 2020. DOI: 10.21227/cjw4-kr75.

- [12] M. O. Farooq y D. Pesch., *ERPL: An Enhanced Peer-to-Peer Routing Mechanism for Low-Power and Lossy Networks*, oct. de 2018. DOI: 10.23919/WMNC.2018.8480918. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8480918>.
- [13] J. Hui y R. Kelsey, *Multicast Protocol for Low-Power and Lossy Networks (MPL)*, RFC 7731, feb. de 2016. DOI: 10.17487/RFC7731. dirección: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7731>.
- [14] B. Haberman, B. Zill, E. Nordmark, T. Jinmei y D. S. E. Deering, *IPv6 Scoped Address Architecture*, RFC 4007, mar. de 2005. DOI: 10.17487/RFC4007. dirección: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc4007>.
- [15] «IEEE Standard for Wireless Smart Utility Network Field Area Network (FAN),» *IEEE Std 2857-2021*, págs. 1-182, 2021. DOI: 10.1109/IEEESTD.2021.9464888.
- [16] *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011), 2016.
- [17] G. Montenegro, N. Kushalnagar y D. Culler, «Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks,» IETF, RFC 4944, 2007.
- [18] J. Hui y P. Thubert, *Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks*, RFC 6282, 2011.
- [19] S. Deering y R. Hinden, *Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification*, RFC 2460, 1998.
- [20] J. Postel, *User Datagram Protocol*, RFC 768, 1980.
- [21] *AN1330: Silicon Labs Wi-SUN Mesh Network Performance*, Technical Article, Silicon Laboratories, 2023.
- [22] R. Almeida, *How Wi-SUN FAN Improves Connected Infrastructures*, Technical Article, Texas Instruments, 2020.
- [23] Z. Shelby, K. Hartke y C. Bormann, *The Constrained Application Protocol (CoAP)*, RFC 7252, jun. de 2014. DOI: 10.17487/RFC7252.
- [24] P. Thubert, *Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)*, RFC 6552, mar. de 2012. DOI: 10.17487/RFC6552. dirección: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc6552>.
- [25] K. P. M. K. N. D. Dominique Barthel JP Vasseur, *Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks*, RFC 6551, mar. de 2012. DOI: 10.17487/RFC6551. dirección: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc6551>.