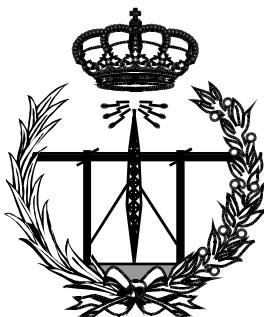


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Encaminamiento en redes inalámbricas
malladas para minimizar la exposición de
los usuarios a los campos
electromagnéticos**

**(Design and Implementation of an EMF-aware
Routing Scheme for Wireless Mesh Networks)**

Para acceder al Título de

***Graduado en
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Julián Igareda Laso

Julio - 2015

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Julián Igareda Laso

Director del TFG: Ramón Agüero Calvo y Luis Francisco Diez Fernández

Título: “Encaminamiento en redes inalámbricas malladas para minimizar la exposición de los usuarios a los campos electromagnéticos”

Title: “Design and Implementation of an EMF-aware Routing Scheme for Wireless Mesh Networks ”

Presentado a examen el día: 27 de Julio de 2015

para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Tazón Puente, Antonio

Secretario (Apellidos, Nombre): García Gutiérrez, Alberto Eloy

Vocal (Apellidos, Nombre): Agüero Calvo, Ramón

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº
(a asignar por Secretaría)

Agradecimientos

A lo largo de los años que llevo vividos me he percatado que la búsqueda de grandes resultados en los diferentes aspectos de la vida se antoja imposible sin el apoyo y la colaboración de otras personas. Es por ello, que me gustaría dedicar unas palabras a las que han dedicado parte de su tiempo a concederme el placer de llegar a donde estoy ahora.

A los profesores que he tenido en este periodo universitario, me considero afortunado en este aspecto, y más teniendo en cuenta lo difícil que resulta trasladar los conocimientos al resto de personas que presentamos comportamientos tan heterogéneos.

A los integrantes del grupo de ingeniería telemática de la universidad de Cantabria, que desde el primer día me han tratado como uno más y siempre con la máxima disponibilidad para ayudar en cualquier aspecto. Con ambientes de trabajo así, estoy seguro que obtenéis y obtendréis grandes resultados.

A mis tutores Ramón Agüero Calvo y Luis Francisco Diez Fernández, por la dedicación y atención recibida durante este periodo y el sin fin de preguntas respondidas. Ha sido un placer trabajar con vosotros.

Por último, y por eso no menos importantes, sino todo lo contrario, a mi familia, novia y amigos, por el apoyo continuo desde el primer instante que decidí cambiar de rumbo y afrontar esta formación universitaria. Con ellos se puede afrontar cualquier reto que se ponga por delante.

Resumen

Resulta incontestable que hoy en día las comunicaciones de carácter inalámbrico poseen un alto grado de aceptación, con una notable penetración entre los sistemas de telecomunicaciones, que van desde soluciones de telefonía móvil hasta redes de uso personal como Bluetooth, WIFI, Estas circunstancias han desembocado en una cierta preocupación sobre los posibles efectos adversos en la salud que puedan tener este tipo de redes, dado que, aunque utilizan radiación que no está considerada ionizante, crean una cierta exposición electromagnética sobre los usuarios. Esto se ha convertido en una cuestión que genera cierta controversia en la sociedad y es por ello por lo que nace el proyecto Low EMF Exposure Networks (LEXNET). En él, se trata de catalogar, desarrollar e implementar mecanismos para la reducción de la exposición electromagnética a la que se ve sometida el usuario, sin conllevar una reducción ni en la calidad de servicio (Quality of Service (QoS)), ni en la de experiencia (Quality of Experience (QoE)).

Este trabajo fin de grado se enmarca en este proyecto. Primeramente se planteará un estudio teórico, que permita abordar la problemática de este tipo de entornos, para posteriormente afrontar el diseño e implementación de un algoritmo basado en la teoría de grafos. Por último, y para extrapolar su aplicación a un entorno más realista, se desarrollará un protocolo de enrutamiento novedoso. Se demuestra que, utilizando un enfoque similar al empleado por estrategias de encaminamiento para balancear la carga e incorporando un control de potencia dinámico, se consigue, no solo distribuir de manera más ecuánime la exposición por todo el área en la que se despliega una red, sino que se logra además un descenso del valor medio, y todo esto sin que se vea comprometida la calidad de servicio que es percibida por el usuario final.

Palabras clave — *Proyecto LEXNET, Redes inalámbricas, Redes multisalto, Campos electromagnéticos, Balanceo de carga, Teoría de grafos, Problemas de flujo de coste mínimo, Cycle Canceling Algorithm (CCA), Control de potencia de transmisión, Solución Cross layer, Protocolos de enrutamiento, Mecanismos de descubrimiento, Network Simulator 3 (NS-3), Simulación.*

Abstract

Nowadays, it goes without saying issue that wireless communications have a high acceptance and large penetration within telecommunication systems. From solutions that involve mobile phones to personal networks, such as, Bluetooth, WIFI, etc. These circumstances have also brought a growing concern over their possible health risks. Although they use non ionising radiation, these networks can indeed induce some electromagnetic exposure over users. This has therefore become a controversial social issue. The LEXNET project is proposed to tackle this concern. In particular it aims to measure, develop and deploy mechanisms to reduce the exposure to electromagnetic fields, without jeopardizing the QoS and QoE.

This BSc thesis is carried out within the LEXNET framework. First, a theoretical approach will allow us to tackle the problem over this type of environments, and proposes an algorithm based on graph theory. Afterwards, and in order to extrapolate its use on more realistic environments, we have developed a novel routing protocol. The Reward Base Routing Protocol (RBRP) protocol features a *cross-layer* based dynamic power adaptation scheme and based on techniques previously exploited by load balancing solutions, is able to fairly distribute the exposure to Electromagnetic Field (EMF) within the whole area and, in fact, achieve a reduction of the average value, without jeopardizing the QoS perceived by the end users.

Key words — *LEXNET project, Wireless networks, Multi-hop networks, Electromagnetic fields, Charge balanced, Graph theory, Minimum cost flow problems, CCA, Transmission power control, Cross layer solution, Routing protocols, Discovery Mechanisms, NS-3, Simulation.*

Índice general

	Página
Índice general	I
Índice de tablas	II
Índice de figuras	III
1 Introducción	1
2 Algoritmo	5
2.1. Consideraciones previas	5
2.2. Modelado	8
2.2.1. Transformación de grafos	8
2.3. Descripción del problema	9
2.3.1. Elección del algoritmo de partida	10
2.3.2. Resolución de caso un práctico	12
2.3.3. Implementación algoritmo	15
2.4. Análisis	16
2.4.1. Configuración estática	18
2.4.2. Configuración dinámica	21
2.5. Conclusión Algoritmo	24
3 Protocolo RBRP	25
3.1. Consideraciones previas	25
3.1.1. Ajuste dinámico de potencia	26
3.1.1.1. Caracterización de escenarios	27
3.2. Funcionamiento	32
3.2.1. Estructura de los mensajes	32
3.2.2. Estructura de datos	34
3.2.3. Operación	36
3.2.3.1. Descubrimiento de vecinos	36
3.2.3.2. Descubrimiento de ruta	36
3.2.3.3. Notificación de cambio de coste	37
3.2.4. Lógica	40
3.2.4.1. Lógica descubrimiento de vecinos	40
3.2.4.2. Lógica descubrimiento de ruta	41
3.2.4.3. Notificación de cambio de coste	45
3.3. Simulación	46
3.3.1. Algoritmo Vs. RBRP	48
3.3.2. RBRP Vs. AODV	51
4 Conclusiones finales	57
4.1. Lineas de trabajo futuras	58
Acrónimos	61
Referencias	63

Índice de tablas

Tabla	Página
2.1. Configuración topología estática	18
2.2. Configuración de costes	23
3.1. Configuración escenario de caracterización	28
3.2. Configuración escenario Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV)	29
3.3. Resultados ajuste dinámico de potencia	31
3.4. Chip CC2420	32
3.5. Configuración escenario para algoritmo y protocolo	49

Índice de figuras

Figura	Página
1.1. Proyecto LEXNET	2
2.1. Ejemplo simple ruta multi-salto.	6
2.2. Ejemplo de grafo genérico.	6
2.3. Ejemplo de grafo con costes.	7
2.4. Red Ejemplo inicial alternancia de rutas.	7
2.5. Red Ejemplo estático contra alternancia de rutas.	8
2.6. Ejemplo de transformación del grafo	9
2.7. Creación de origen y destino virtual	11
2.8. Grafo inicial.	12
2.9. Grafo transformado.	13
2.10. Asignacion arbitraria de flujo	13
2.11. 1º Red residual.	14
2.12. 2º Red residual	14
2.13. Flujo final en grafo transformado	15
2.14. Flujo final en grafo real	15
2.15. Diagrama de flujo implementación algoritmo.	17
2.16. PDF de la exposición en cada nodo en la topología α	19
2.17. PDF de la exposición en cada nodo en la topología β	20
2.18. Exposición media por experimento	21
2.19. Potencia media por ruta	22
2.20. Exposición media al final de un experimento en cada configuración	23
2.21. Potencia media por ruta, configuración dinámica	24
3.1. Trama RBRP.	25
3.2. Distribución normal, $\mu = 0 \sigma^2 = 1$	27
3.3. Caracterización de escenarios	28
3.4. Caracterización distancia vs <i>throughput</i>	28
3.5. Caracterización cobertura potencia dinámica	29
3.6. Solución <i>Cross-Layer</i> para paquetes recibidos	30
3.7. Solución <i>Cross-Layer</i> para paquetes transmitidos	30
3.8. CDF de la potencia Tx media para paquetes de datos	31
3.9. RBRP-ROUTE-DISCOVERY y RBRP-ACK-ROUTE-DISCOVERY	33
3.10. Estructura mensaje RBRP-REPORT-COST	33
3.11. Estructura mensaje RBRP-HELLO	34
3.12. Campos de datos definidos en la tabla de rutas.	35
3.13. Campos de datos definidos en la tabla de vecinos.	35
3.14. Procedimiento de descubrimiento de ruta.	37
3.15. Diagrama temporal descubrimiento de ruta.	38
3.16. Diagrama temporal cambio de coste.	39
3.17. Función de modelado del coste de exposición.	39
3.18. Diagrama de flujo para la recepción de <i>hello</i>	41
3.19. Diagrama de flujo para el inicio del descubrimiento de ruta	42
3.20. Diagrama de flujo para la recepción de un descubrimiento de ruta	43
3.21. Diagrama de flujo para la recepción de confirmación de ruta	44
3.22. Diagrama de flujo para inicio de cambio de coste	45
3.23. Diagrama de flujo para recepción <i>hello</i> cambio de coste	46

3.24. Diagrama de flujo para recepción cambio de coste	47
3.25. Algoritmo en modo monitor	48
3.26. Modelado de coste K	50
3.27. Comparación CDF potencia transmitida, Algoritmo y protocolo	51
3.28. Comparación CDF número de nodos usados por simulación, Algoritmo y protocolo	52
3.29. Comparación CDF potencia de transmisión varios protocolos	52
3.30. Comparación PDF potencia de transmisión varios protocolos	53
3.31. Mapa de calor exposición varios protocolos	55

Introducción

Resulta evidente que las comunicaciones inalámbricas han venido creciendo a un ritmo muy elevado en los últimos años, y se espera que siga siendo así en el medio plazo. A pesar de que no es razonable plantear un escenario diferente, han aparecido, en paralelo, opiniones que muestran cierta preocupación por el efecto negativo que la exposición de los usuarios a los campos electromagnéticos puede tener [Tes+14] [TNS10]. Es por ello que resulta adecuado estudiar la posibilidad de mejorar los procedimientos actuales de gestión de las redes inalámbricas para que se pueda reducir dicha exposición, sin que el usuario perciba un empeoramiento de la calidad de experiencia en sus servicios.

Es cierto que hoy en día no se han identificado efectos adversos para la salud causados por los campos electromagnéticos no ionizantes, pero esta temática crea cierta controversia en la sociedad y es objeto de múltiples estudios [OMS15]. Hasta el punto de desembocar en leyes que prohíben su uso en ciertas áreas de interés (guarderías, colegios, ...) [ley15]. Debido a esta preocupación social, algunas autoridades internacionales [ICN], nacionales y locales han desarrollado diferentes manuales de buenas prácticas en lo que concierne a estos aspectos.

Lo anteriormente expuesto es precisamente el *leitmotiv* del proyecto europeo LEXNET [LEX12], que se centra inicialmente en el desarrollo de una metodología para caracterizar la exposición electromagnética a la que se ve sometida el público en general, y posteriormente en el desarrollo de mecanismos que permitan reducirla. Una muestra de ello se puede observar en la Figura 1.1, donde las soluciones que se presentarán en este trabajo se pueden englobar en la parte relacionada a una mejor gestión de la arquitectura de red e interfaz radio, con la finalidad de reducir dicha exposición.

Diecisiete operadores de telecomunicaciones, proveedores, centros de investigación e instituciones académicas (entre ellas la Universidad de Cantabria (UC)) colaboran en el proyecto LEXNET, un proyecto respaldado por la Comisión Europea bajo el Séptimo Programa Marco (FP7), que persigue reducir al menos un 50 % la exposición del público a campos electromagnéticos, sin que ello conlleve una pérdida en la calidad de los servicios ofrecidos a los usuarios.

Una de las alternativas de comunicación que mayor atención ha acaparado recientemente son las topologías multi-salto. A pesar de que su origen data de 1997 (redes Mobile Ad hoc Network (MANET)), el escenario típico de aplicación

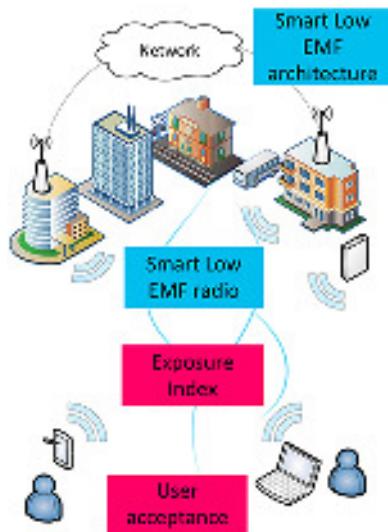


Fig. 1.1: Proyecto LEXNET

ha variado sensiblemente, pasando de los escenarios bélicos y desastres naturales que originaron la investigación de este tipo de redes, a casos de uso que se centran en la expansión de la cobertura de estaciones base de manera económica y sencilla. MANET se encarga de la estandarización de protocolos de enrutamiento para redes *Ad hoc*, entre los que se puede distinguir entre diferentes tipos, atendiendo a su forma de operar:

- Protocolos preventivos: Mediante la difusión periódica de paquetes de control se mantiene actualizada la información topológica de la red, en este grupo se encuentran el protocolo Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)(extendido a OLSRV2, abril 2014 RFC 7181) y el Topology dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF).
- Protocolos reactivos: La topología de la red solo se *descubre* cuando es necesaria, aquí aparecerán los protocolos Dynamic Source Routing (DSR), AODV y Dynamic MANET On-demand (DYMO), entre otros.

Es importante destacar, por ejemplo, la relevancia de este tipo de despliegues en las cada vez más extendidas redes de sensores inalámbricos o el papel que se les otorga en las nuevas especificaciones de la tecnología LTE (comunicaciones *Device-to-Device*).

La motivación de este trabajo parte de la idea presentada en el proyecto LEXNET, y su elaboración queda englobada en el paquete de trabajo número 5 (WP5), donde se estudian topologías de red que permitan reducir el nivel de exposición, permitiendo llevar a cabo comunicaciones eficientes y de bajo coste, manteniendo a su vez los niveles de calidad de servicio. Este trabajo busca reducir dos de las variables con las que se modela el grado de exposición a la que se ven sometida los usuarios (medido gracias al Exposure Index (EI) [Wia+14] y la Specific Absorption Rate (SAR) [Suw+12]): El tiempo de exposición y la potencia de transmisión.

En el Capítulo 2 de este trabajo se realizará una caracterización de los escenarios con los que se desea trabajar, identificando cada uno de los factores que jugarán un papel importante en la solución. Se definirán los objetivos buscados,

y cómo se deben modelar los grafos con lo que se trabajará. Seguidamente, y una vez puestas todas estas piezas juntas, se desarrollará un algoritmo que parte de un problema de flujo de coste mínimo (Minimum Cost Flow) (MCF), que se apoya en el algoritmo CCA como punto de partida. Se describirá su operación paso a paso sobre un caso sencillo, para que pueda ser seguido visualmente por el lector, y se comentarán las fases referentes a la implementación del algoritmo, que ha sido realizado en el lenguaje de programación C++. A la finalización de este capítulo se verán los resultados que esta solución ofrece en comparación con otras de uso frecuente.

En el Capítulo 3, con el objetivo de lograr una extrapolación a un entorno más realista, en el cual cada uno de los nodos no disponga del apoyo de una unidad gestora central que les ofrezca una solución de enrutamiento basada en el algoritmo, se planteará un protocolo de enrutamiento denominado RBRP que, utilizando métricas que tengan en cuenta tanto la potencia de transmisión como la exposición acumulada, y combinando estrategias de balanceo de carga y control de potencia, consigue reducir la exposición electromagnética. En este capítulo se introducirá el entorno de simulación empleado (NS-3) y las técnicas de control de potencia que se han implementado, basadas en soluciones *Cross layer* y un entrenamiento previo del escenario. Seguidamente se abordará desde una visión clásica las características principales del protocolo, como son la estructura de sus mensajes y datos, operación y lógica. Finalmente, se realizarán varias simulaciones, con el objetivo de comparar, el protocolo aquí presentado (RBRP) con el algoritmo tratado anteriormente, y adicionalmente, con otros protocolos más extendidos, como puede ser el AODV.

Algoritmo

Desde un enfoque teórico, este capítulo está basado en la elaboración de un algoritmo de encaminamiento a *medida*, que trabaja sobre redes malladas inalámbricas y que tiene como objetivo la reducción de la exposición electromagnética a la que se ven sometidos los usuarios.

Inicialmente, la sección 2.1 mostrará una serie de características generales de las redes con las que se trabajará, definiendo los costes a considerar e identificando la finalidad buscada en el algoritmo a implementar. Esta será el provocar una alternancia entre las rutas disponibles para cada flujo de tráfico, para lo que se plantea un problema de optimización que busca encaminar la información (paquetes) por aquellas rutas que incurran en una exposición menor, teniendo en cuenta, además de la que se generará por el mero hecho de estar utilizando un conjunto de nodos para reenviar paquetes, aquella que se corresponde a la que se ha ido acumulando anteriormente.

Antes de plantear el problema a resolver, en la sección 2.2 se propone un modelo novedoso, basado en teoría de grafos, en el se abordará un modelado previo que ha de ser tenido en cuenta en todos en los grafos que se corresponden con la red *multi-salto*. Posteriormente, en la sección 2.3, se identificará el tipo de problema a tratar, quedando englobado dentro de los pertenecientes a MCF y, como paso para encontrar las rutas óptimas, se modifica el algoritmo CCA, adaptándolo para resolver el problema planteado.

Como punto de unión de todos los conceptos, en la sección 2.3.2, se describirá paso por paso una resolución de un ejemplo sencillo. La parte correspondiente a la sección 2.3.3 marca los metodología seguida para la implementación de la solución, mediante el lenguaje de programación C++.

Por último, la Sección 2.4 describe los principales resultados obtenidos a partir de la evaluación del algoritmo, comparando su comportamiento con el de otras alternativas más tradicionales.

2.1. Consideraciones previas

Partiendo de la idea del tipo de redes con las que se va a trabajar y sus características, según las cuales uno o varios nodos fuente tratan de enviar un

determinado tráfico de datos hacia uno de los posibles destinos (gateways), con indiferencia de cual de ellos sea, se realiza en esta sección, un breve análisis de los factores que influyen en el planteamiento a realizar.

Este tipo de redes utiliza una infraestructura *Device-to-Device*, basada en una filosofía de red *multisalto*, en la que que pueden entrar en juego todos los nodos de la red, con independencia de que sean o no fuente-destino del tráfico. La Figura 2.1 lo ilustra en un caso sencillo, en el cual el nodo identificado como S trata de enviar tráfico a D (gateway), el cual está situado fuera de su radio de cobertura, por lo que utilizará el soporte de I , que sí tiene dentro de su cobertura tanto a S como a D , para que sea el encargado de reenviar el tráfico que recibe de S , actuando como intermediario de la comunicación.

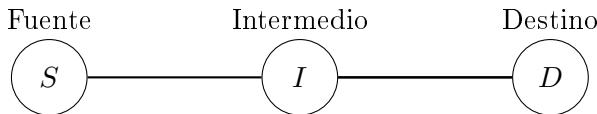


Fig. 2.1: Ejemplo simple ruta multi-salto.

Extrapolando el sencillo ejemplo anterior a redes de mayor complejidad, se partirá del grafo representativo de la red, un conjunto $G = (N, E, s, g)$, donde N es un subconjunto de nodos, E representa el subconjunto de enlaces no orientados, $s \in V$ representa las fuentes de flujo existentes en el grafo, y g se corresponde con los posibles destinos (Figura 2.2). Se asume que cualquiera de los nodos podrá desempeñar el rol de fuente, y utilizar los nodos necesarios para llegar a cualquiera de los posibles destinos.

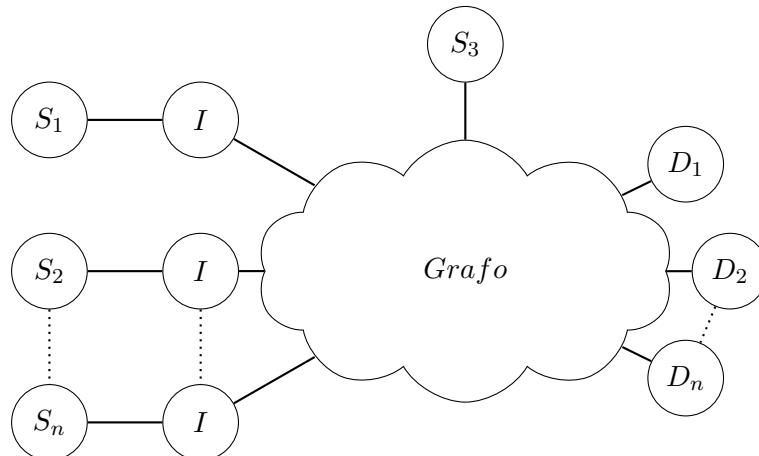


Fig. 2.2: Ejemplo de grafo genérico.

Una vez abordados estos aspectos, la finalidad que se persigue en el diseño de esta solución es la reducción de la exposición electromagnética a la que se somete al usuario. Con estos factores se puede definir una serie de parámetros.

- Exposición acumulada K : este coste se asigna a cada nodo de la red, y representa el coste asociado a la exposición que dicho nodo ha generado hasta un instante concreto de tiempo (T). Resaltar que su valor es independiente del tráfico que atraviesa el nodo en cada momento.

- Potencia de transmisión P : Potencia necesaria para que un nodo pueda transmitir un paquete al siguiente salto y se asocia, por tanto, a cada uno de los

enlaces. Se considera que este coste crece de manera proporcional al número de flujos que atraviesan un arco del grafo en un momento determinado.

De manera gráfica, y continuando con el caso inicial, la Figura 2.3 muestra cómo se introducen estos factores en los escenarios: Destacar que los enlaces pasan a ser orientados, solventando de esta manera una posible diferencia de costes dependiendo del sentido de la comunicación y, a su vez, favoreciendo la resolución del problema, como se verá posteriormente.

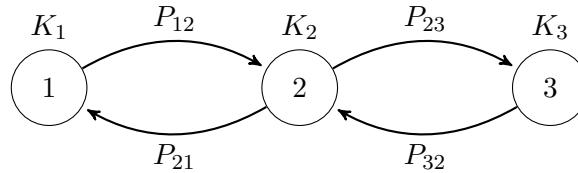


Fig. 2.3: Ejemplo de grafo con costes.

Una de las características principales de estas redes, como se ha indicado anteriormente, es que cada uno de los nodos puede ser partícipe en la comunicación, siendo este de los elementos claves a la hora de la consecución del objetivo planteado en este trabajo. Aparece así un objetivo claro para la solución final, que no será otro que la alternancia entre las diferentes rutas disponibles para los flujos de tráfico, evitando en cierta manera los denominados *puntos calientes* en términos de exposición acumulada.

A continuación se plantea mediante un caso sencillo, y un ejemplo ilustrativo de lo comentado con anterioridad. Se considera la red de Figura 2.4, con una fuente de tráfico S y un solo destino D ; la comunicación puede involucrar a cualquiera de los nodos intermedios I . Por otra parte, los arcos indican las diferentes opciones de rutas entre la fuente y el destino, y se ha asignado a cada nodo su correspondiente K_n .

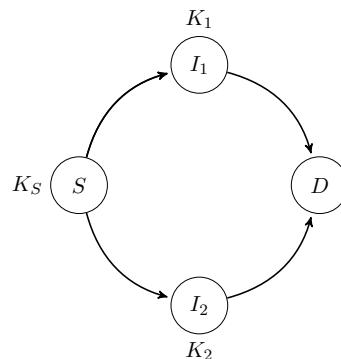


Fig. 2.4: Red Ejemplo inicial alternancia de rutas.

Si la solución se basara en una estrategia más tradicional, en la que inicialmente se selecciona una ruta y que mantiene constante durante todo el tiempo, se tendría un escenario como el que refleja la Figura 2.5a, en el que, aparecerán una serie de *puntos calientes*, concretamente los situados en las cercanías tanto del nodo fuente y del nodo I_1 , debido al uso constante de la misma ruta, en los que se acumulará más exposición electromagnética (EMF) y, por lo tanto se tienen valores más altos dentro del área objetivo.

Ahora bien, si la solución estuviera basada en un planteamiento más dinámico, es decir, teniendo en cuenta la evolución temporal de todos los costes

definidos, y se habilita la posibilidad de escoger entre todas las rutas disponibles, se consigue la perseguida alternancia entre los diferentes caminos. Usándose en este caso ambas rutas (la duración temporal en una o otra vendrá fijada por los valores de los costes), se conseguirá a priori una reducción de la exposición acumulada en el área objetivo, ya que los valores de K de los nodos intermedios serán menores que en el caso anterior, como puede apreciarse en la Figura 2.5b, donde $K_{I1a} > K_{I1b}$, apareciendo exposición en K_2 , pero no llegando en ningún caso a los valores de K anteriores.

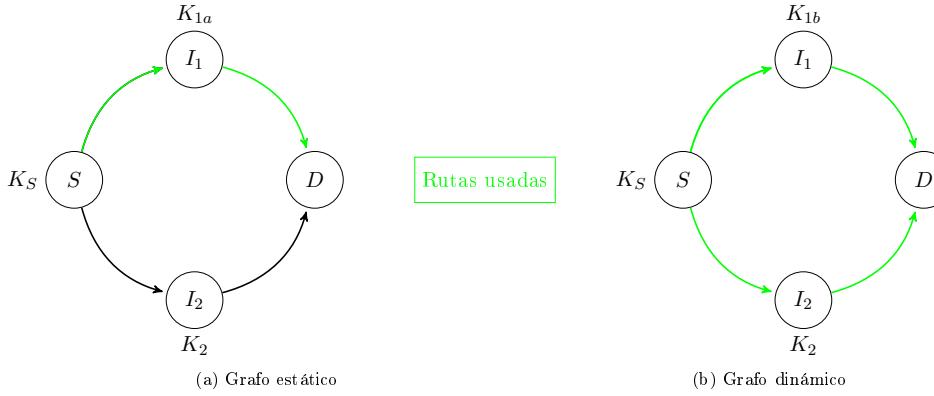


Fig. 2.5: Red Ejemplo estático contra alternancia de rutas.

2.2. Modelado

Anteriormente se han sentado las bases de los factores y aspectos generales con los que se va a trabajar. A continuación se planteará un análisis más exhaustivo, con vistas de aportar una solución final al problema y se describe además la transformación previa de la red necesaria ante un supuesto caso real.

Centrando la atención en el objetivo que persigue este proyecto, se trabajará con un modelo de red basado en la teoría de grafos, que tendrá en cuenta la exposición acumulada en los nodos y la potencia transmitida por los mismos. El objetivo principal que se persigue es la posterior definición de algoritmos que optimicen ambos parámetros de manera conjunta y que así sirvan como referencia para el análisis del comportamiento de protocolos de encaminamiento que consideren como métrica a optimizar la exposición a campos electromagnéticos generados por la transmisión de los paquetes.

2.2.1. Transformación de grafos

Como se ha visto anteriormente, la red se modela como un grafo $G = (N, E)$ y se consideran dos costes diferenciados que, atendiendo al parámetro que representan, se imputan a los arcos o a los nodos que componen la red, P y K respectivamente.

Debido a la localización y naturaleza de estos parámetros, y atendiendo a los requerimientos generales al trabajar con teoría de grafos, es necesario llevar a cabo una transformación del grafo inicial, de modo que se puedan utilizar variaciones de algoritmos conocidos para resolver el problema que aquí se plantea, minimizar ambos costes de manera conjunta. En concreto, una vez definidos los nodos reales, se introducirán una serie de arcos virtuales a los que atribuir el cos-

te K de cada nodo. Así, cada nodo se transforma en dos vértices virtuales, para poder discriminar entre los tráficos entrante y saliente. Es decir, dado un nodo V , éste se descompone en dos, V' y V'' , que son los puntos de entrada y salida de tráfico en el nodo original V , respectivamente; éstos se conectarán por un arco cuyo coste se corresponde con la exposición acumulada en V hasta ese momento, K ; de la misma manera tendrá asociada una capacidad lo suficientemente grande para poder asumir todo el flujo existente en la red. De este modo, el nodo V' tiene los mismos arcos entrantes que tenía V , llevando asociado el coste correspondiente a la potencia de transmisión necesaria para mandar un paquete sobre dicho enlace, y como único arco saliente el que lo conecta con V'' (con coste K). Del mismo modo, V'' tiene como arcos salientes los que tenía originalmente V , con un coste asociado a la potencia de transmisión, y como único enlace entrante el que sale de V' .

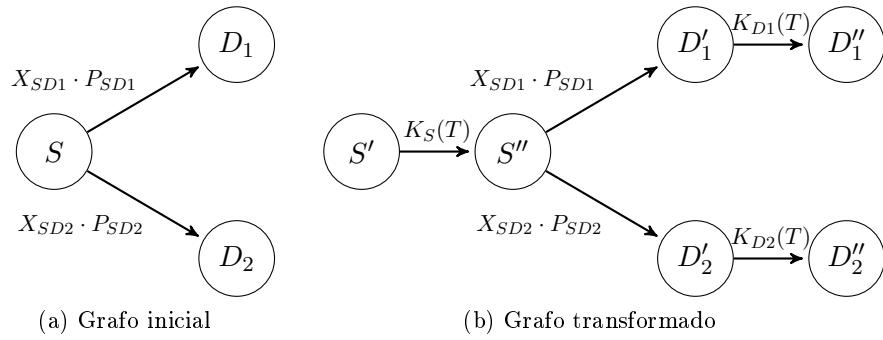


Fig. 2.6: Ejemplo de transformación del grafo

Para ilustrar lo expuesto anteriormente, se presenta la transformación aplicada a un sencillo grafo de 3 nodos, Figura 2.6. Como puede observarse, los costes en los arcos se corresponden inicialmente con la potencia necesaria para comunicarse con los diferentes vecinos, aplicando un factor de escala en función del flujo que atraviesa el arco, véase la Figura 2.6a. Tal como muestra la Figura 2.6b, tras aplicar la transformación propuesta, aparecen nuevos arcos, con el coste de la exposición acumulada en los nodos originales. Por otro lado, se puede observar que el tamaño del grafo inicial aumenta, tanto en el número de vértices, como de arcos. Si se parte de un grafo $G = (N, E)$, se obtiene un grafo transformado $G' = (N', E')$ en el que $|N'| = 2 \cdot |N|$ y $|E'| = |N| + |E|$.

2.3. Descripción del problema

Una vez descrita la transformación que se lleva a cabo sobre el grafo, esta sección presenta el problema de optimización que se plantea para establecer las rutas óptimas, y que tiene en cuenta tanto la exposición acumulada como la potencia de transmisión de los nodos. Asimismo, se analizarán un conjunto de algoritmos existentes, de manera que se pueda identificar aquel que se tomará como base para resolver el problema, y para establecer una referencia a la hora de establecer el protocolo de encaminamiento.

Dada la estructura del grafo de partida, en el que el coste relacionado con la potencia de transmisión es proporcional al flujo total en cada enlace, el problema se plantea inicialmente como un MCF [Ahu+93], que tiene como finalidad

distribuir un flujo entre un conjunto de nodos fuente y destino, minimizando el coste global.

Un problema MCF, dado un grafo dirigido $G = (N, E)$, presenta la formulación que se muestra a continuación.

$$\min \sum_{\forall(i,j) \in E} c_{ij} \cdot x_{ij}$$

Sujeto a:

$$\sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji} = b(i), \forall i \in N \quad (2.1)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad x_{ij} \leq u_{ij}, \quad \forall (i, j) \in E \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^n b(i) = 0 \quad (2.3)$$

Donde c_{ij} y u_{ij} representan el coste por unidad de flujo y la capacidad del enlace, para $(i, j) \in E$, respectivamente. Por otro lado, $b(i)$ se corresponde con el flujo originado ($b(i) > 0$) o recibido ($b(i) < 0$) en cada nodo. Finalmente, x_{ij} (variable a optimizar) representa el flujo que se envía por cada enlace $(i, j) \in E$. Así, la restricción 2.1 asegura que el balance de flujo en cada nodo coincide con la generación/demanda del mismo (cuando sea origen o destino), siendo nulo si se trata de un nodo intermedio. La restricción 2.2 impide que el flujo en cada enlace no supere la capacidad del mismo; finalmente, para validar la solución del problema, se establece que el balance total de flujo en la red sea nulo, a través de la restricción 2.3.

2.3.1. Elección del algoritmo de partida

Existen diferentes soluciones a este problema, atendiendo a las propiedades que se pretendan potenciar. En este trabajo, dado que se centra en el modelado y no tanto en el algoritmo para resolverlo, se ha optado por una solución tradicional como es el CCA [Gar+09]. En este caso se hace uso de la propiedad que establece que una solución x^* es óptima si, y solo si, el grafo residual $G(x^*)$ no contiene ningún ciclo negativo [Ahu+93]. La funcionalidad básica del algoritmo se muestra en el pseudocódigo 1, en el que r_{ij} representa la capacidad residual del arco (i, j) .

Algoritmo 1 Algoritmo *Cycle Canceling*

Entrada: $G(N, \mathcal{E})$

- 1: Establecer un flujo x posible en la red
 - 2: **MIENTRAS** $G(x)$ contenga un ciclo negativo **hacer**
 - 3: Identificar un ciclo negativo W
 - 4: $\delta := \min\{r_{ij} : (i, j) \in W\}$
 - 5: Aumentar δ unidades de flujo en el ciclo W y actualizar $G(x)$
 - 6: **FIN MIENTRAS**
-

Una consideración importante para la resolución del problema, es que este algoritmo se aplica tradicionalmente sobre redes con una única fuente de tráfico (con balance de flujo negativo) y un destino (con balance de flujo positivo). Para poder considerar múltiples fuentes y destinos, y acondicionarlo al problema que se busca solucionar, se han definido un par de nodos origen/destino virtuales, de modo que la capacidad de los enlaces desde el origen virtual a cada una de las

fuentes sea 1 (esto es, solo puede utilizarse por un flujo), asegurando así que cada fuente original de tráfico genere efectivamente una unidad de flujo (que es lo que tienen asignado); además el coste asignado a este enlace será 0, de manera que el algoritmo no sufra ninguna penalización por su uso. Por último, cabe reseñar el sentido del enlace virtual añadido, siendo en este caso desde el origen virtual a cada uno de los orígenes reales, garantizando así que los orígenes virtuales solo son generadores de tráfico $b(i) > 0$. En el caso del destino virtual, no se ha limitado la capacidad de los enlaces que le unen con los nodos destinos originales, dado que no se ha impuesto ninguna restricción en cuanto al balanceo de carga en los destinos, de manera que pueda ser seleccionado cualquiera de ellos, según convenga en cada instante. En referencia a su coste se fija un valor de 0, por el motivo explicado anteriormente, y el sentido del enlace va desde el destino real hacia el virtual, garantizando que en dicho nodo $b(i) > 0$, esto es solo es destino de tráfico. Se muestra una representación gráfica de lo expuesto en la Figura 2.7.

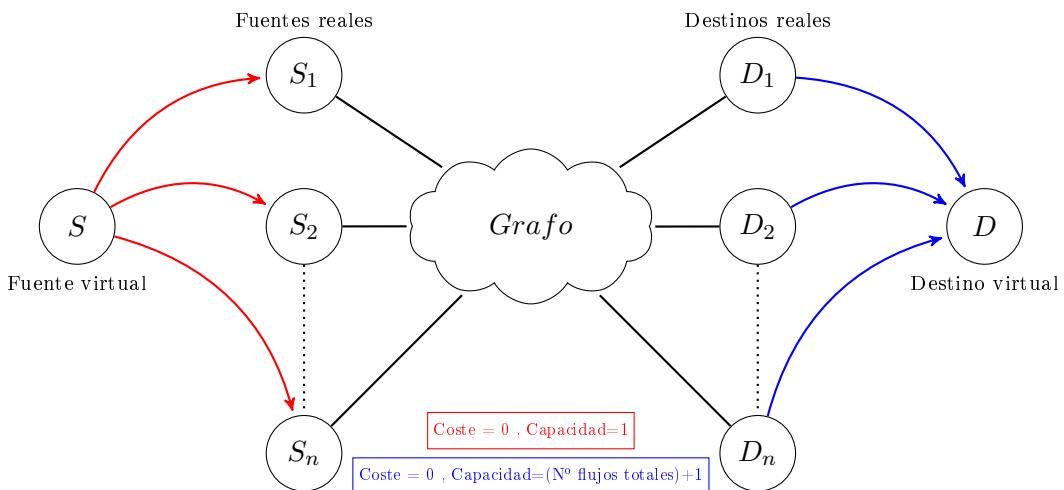


Fig. 2.7: Creación de origen y destino virtual

Cabe destacar que, debido a la transformación del grafo presentada con anterioridad, aparecen enlaces cuyos costes no crecen linealmente con el flujo que atraviesa dicho arco, sino que permanecen constantes, ya que modelan la exposición acumulada hasta ese momento, por lo que la función de utilidad quedaría como recoge la ecuación 2.4.

$$\min \left(\sum_{\forall (i,j) \in E} c_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{\forall (i,j) \in E} k_{ij} \right) \quad (2.4)$$

Esta modificación se ha considerado en la implementación del algoritmo, por lo que la eficacia de la solución obtenida tiene cierto carácter empírico. En las secciones posteriores, y una vez realizados los análisis de resultados, se observará que, efectivamente, el algoritmo implementado se comporta de manera adecuada. En términos de implementación, se ha modulado el valor de la exposición acumulada para K , de manera que, al multiplicarlo por el flujo que atraviesa el arco, siempre presente el mismo coste.

2.3.2. Resolución de caso un práctico

A fin de un mejor entendimiento por parte del lector de esta memoria, en lo que se refiere al funcionamiento del algoritmo y las modificaciones que se han planteado al mismo para la adecuación/resolución del problema que se ha planteado, en esta sección se abordará la resolución de un sencillo caso práctico. Se hará hincapié en los pasos y acciones más relevantes, a fin de llegar a un resultado final de manera paulatina.

Se comienza planteando la resolución de un caso sencillo, mediante un grafo formado solamente por 4 nodos. Para dotar al ejemplo de una de las características comentadas con anterioridad, la posibilidad de trabajar tanto con múltiples fuentes como destinos, dos de estos nodos desempeñarán un rol de orígenes de flujo (nodos 1 y 2) y los otros dos restantes de sumideros (posibles destinos (gateways); nodos (3 y 4), como puede apreciarse en la Figura 2.8. Los posibles enlaces están representados mediante arcos, los cuales tienen asignado un coste que extrapolado a un caso real, hacen referencia a la potencia de transmisión, P , coste estático que se mantiene constante con el tiempo y es directamente proporcional al flujo que lo atraviesa. Por otro lado, cada arco también tiene asignado una capacidad, que atendiendo a las características de las redes con las que se trabajarán (*multisalto*), será infinita, esto es, se presupone a priori que todos los nodos son capaces de tratar todo el tráfico existente en la red. Para que el algoritmo tenga solución y no existan en problemas a la hora de la ejecución, se asigna un valor concreto a esta capacidad, que no es otra que $u_{ij} = (N^o \text{Total de flujos} + 1)$, consiguiendo así que los enlaces sean capaces de asumir todos los flujos existentes.

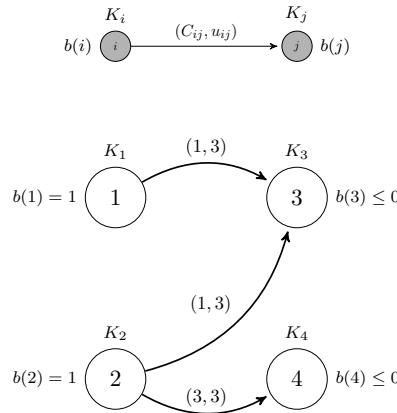


Fig. 2.8: Grafo inicial.

En la Figura 2.9, se puede observar el primero de los pasos que se han de realizar y que fue tratado anteriormente. En el se observa la transformación completa del grafo, desde el desdoblamiento de cada uno de los nodos que lo forman, hasta la creación de la fuente y destino virtuales. En el primero de ellos, se ve como cada uno de los nodos reales se convierte en dos, N' y N'' , N' ; ambos están unidos por un nuevo arco, que refleja el coste correspondiente a la exposición acumulada en dicho nodo hasta un instante T (K_N). Se ve como aparece en el grafo la fuente virtual S , que asume coge el rol de único origen de flujo, siendo $b(S) = N^o \text{ Total de flujos}$ (en este caso $b(S) = 2$). S se enlaza con las fuentes reales del grafo inicial con sendos arcos, con coste 0 y capacidad 1. Respecto a la creación del destino virtual, D desempeña el rol de único destino posible, siendo $b(D) = -N^o \text{ Total de flujos}$ (en este caso $b(D) = -2$), y se

conecta con cada uno de los posibles destinos (gateways), mediante enlaces de coste 0 y capacidad infinita (en este caso $u = 3$); se consigue así que cualquiera de los destinos pueda ser seleccionado, sin imponer ningún criterio adicional.

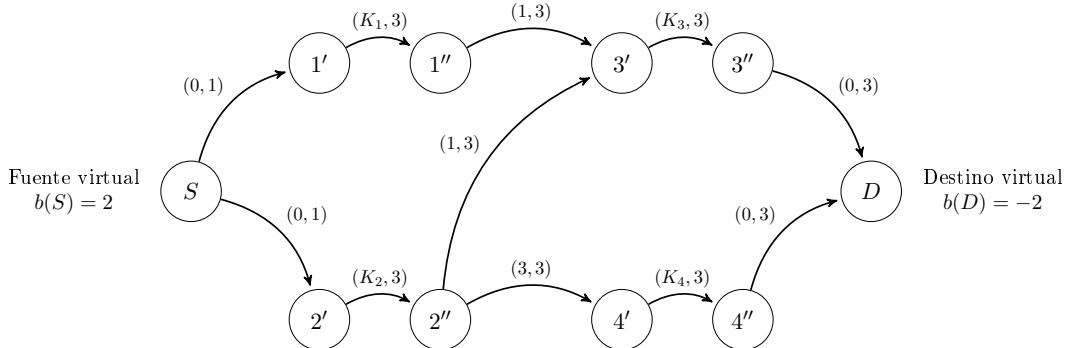


Fig. 2.9: Grafo transformado.

Una vez que se tiene el grafo con el que realmente va a trabajar el algoritmo, ya se está en disposición de empezar a realizar los pasos descritos en el pseudocódigo 1; el primero de ellos no es otro que la asignación arbitraria de una/s ruta/s posible/s para cada flujo. En la Figura 2.10, se observa una posible configuración de estas rutas y el valor del flujo que llevan cada uno de los arcos, siendo el coste total asociado a estos caminos el mostrado en la ecuación 2.5.

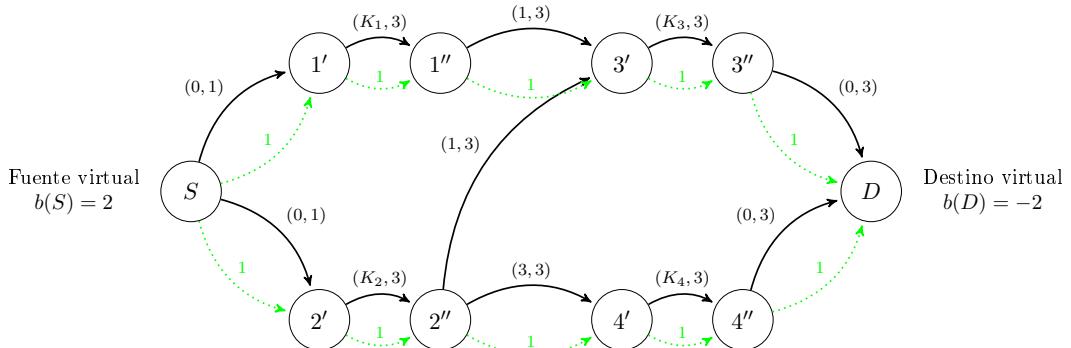


Fig. 2.10: Asignación arbitraria de flujo

$$\begin{aligned}
 \text{Coste total} &= \sum_{\forall(i,j) \in E} c_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{\forall(i,j) \in E} k_{ij} \\
 &= [(c_{S1'} + c_{1''3'} + c_{3''D} + c_{S2'} + c_{2''4'} + c_{4''D}) \cdot x] + k_1 + k_3 + k_2 + k_4 \\
 &= (0 + 1 + 0 + 0 + 3 + 0) \cdot 1 + k_1 + k_3 + k_2 + k_4 \\
 &= 4 + k_1 + k_3 + k_2 + k_4
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Inicialmente, y contando que los diferentes valores que pueda tomar K_i ; 0 para k_3 y k_4 , dado que ambos son destinos; constante para k_1 y k_2 , debido a que son los orígenes del tráfico, el coste total quedaría como refleja la ecuación 2.6. Cabe reseñar que estos valores de K se deben, en esta situación concreta, a la simplicidad y configuración del grafo con el que se está trabajando, y tendrían que tratarse de manera independiente en casos más complejos.

$$\text{Coste total} = 4 + \text{Constante} \quad (2.6)$$

A priori, y tras una inspección visual (dada por la poca densidad del grafo), se puede observar como la solución anterior no es la óptima.

Avanzando en la ejecución, en la Figura 2.11 se procede a establecer la red residual y a localizar algún ciclo negativo, en este caso concreto el formado por $4' \rightarrow 2'' \rightarrow 3' \rightarrow 3'' \rightarrow D \rightarrow 4'' \rightarrow 4'$ (indicado con color rojo), con un coste asociado de $(-3 + 1 + k_3 + 0 + 0 - k_4)$, esto es, teniendo en cuenta que k_3 y k_4 son 0, -2. El siguiente paso sería encontrar la capacidad mínima del ciclo, con la finalidad de acomodar el flujo a través de la ruta marcada por dicho ciclo. En el ejemplo $\text{Cap min} = 1$.

Posteriormente se calcula nuevamente la red residual, considerando el flujo introducido en el ciclo negativo. Esta modificación queda reflejada en la Figura 2.12, donde se procede nuevamente a la búsqueda de algún ciclo negativo; en este caso no existe ninguno, dando por concluida la ejecución del algoritmo.

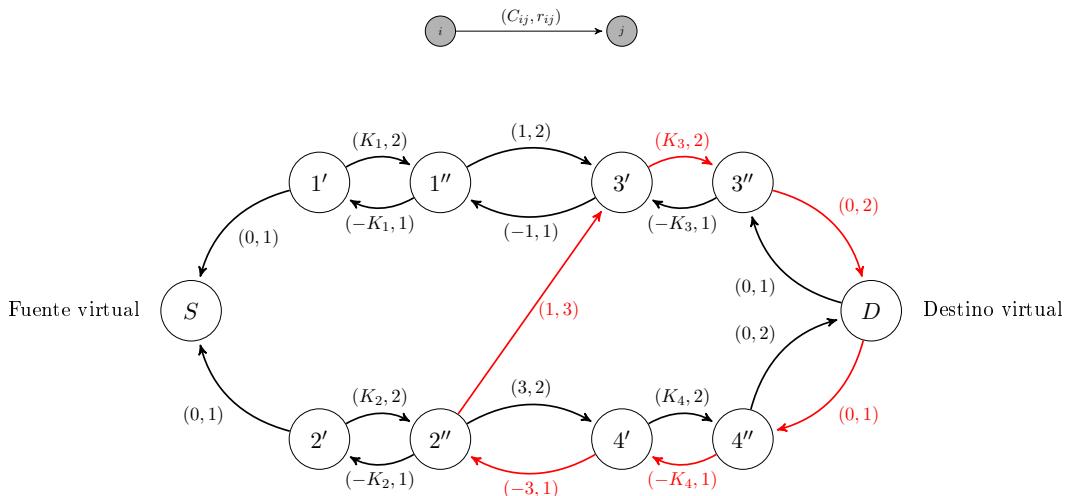


Fig. 2.11: 1º Red residual.

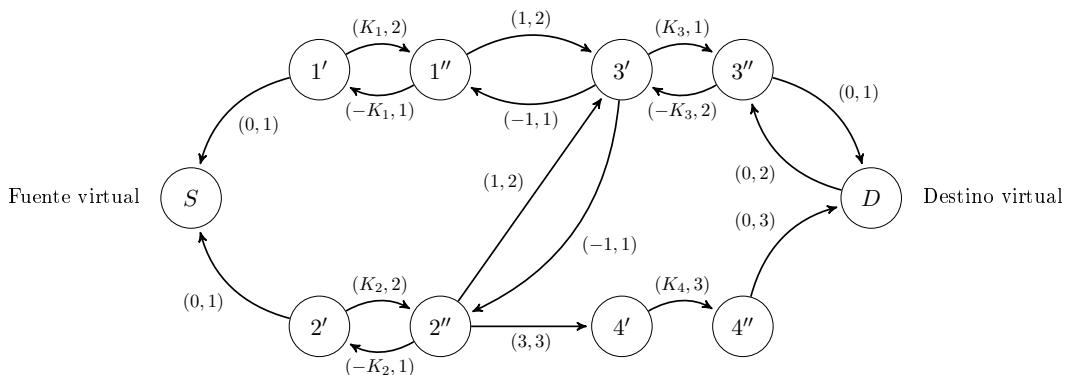


Fig. 2.12: 2º Red residual

Una vez en este punto, y aprovechando las propiedades de las redes residuales, es sencillo localizar las rutas utilizadas por los dos flujos existentes en la red, así como las unidades que atraviesan cada salto. La Figura 2.13 es un reflejo de

ello, en la que las rutas tienen de coste global mostrado en la ecuación 2.7, que, como cabría esperar, es menor al visto anteriormente (ecuación 2.6).

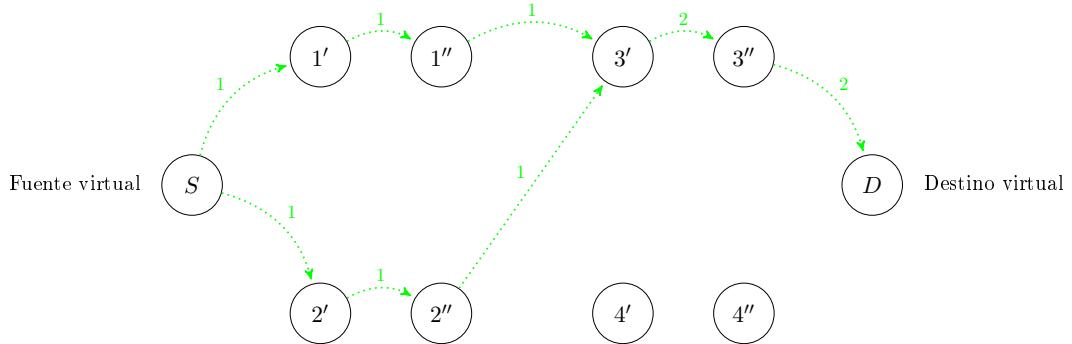


Fig. 2.13: Flujo final en grafo transformado

$$\begin{aligned}
 \text{Coste total} &= [(c_{S1'} + c_{1''3'} + c_{S2'} + c_{2''3'}) \cdot 1 + (c_{3''D}) \cdot 2] + k_1 + k_2 + k_3 \\
 &= (0 + 1 + 0 + 1) \cdot 1 + (0) \cdot 2 + k_1 + k_2 + k_3 \Rightarrow (k_3 = 0, \text{es destino}) \\
 &= 2 + k_1 + k_2 \Rightarrow (k_1 \text{ y } k_2, \text{constantes}) \\
 &= 2 + \text{Constante}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Como último paso para la finalización del sencillo ejemplo, solo quedaría deshacer la transformación del grafo, y extraer las rutas óptimas a la red original, como puede verse en la Figura 2.14, que pone de manifiesto que resulta más interesante el uso del destino 3 por ambas fuentes de tráfico ($b(3) = -2$).

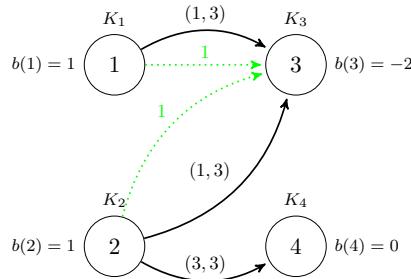


Fig. 2.14: Flujo final en grafo real

2.3.3. Implementación algoritmo

Una vez descritos los conceptos y herramientas necesarios para la búsqueda de una solución óptima, en este apartado se realizará una breve descripción de los pasos de la herramienta implementada, la cual se ha implementado en el lenguaje de programación C++.

El esquema de desarrollo se basa en el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 2.15. Se empieza introduciendo una serie de parámetros correspondientes a los nodos que conforman el grafo original, concretamente su identificador, tipo/rol que desempeñan (fuente, intermedio o destino), la exposición acumulada hasta ese momento K , y sus respectivos vecinos, con la correspondiente potencia de transmisión P necesaria para llegar a cada uno de ellos. Esto se ha planteado así

para facilitar una futura implementación en una red real, donde cada nodo, no tiene porqué conocer todo el grafo que conforma la red, sino únicamente conocerá a sus vecinos, y tendría que ser encargado de formar el grafo completo una vez se hallan registrado todos los nodos, como puede apreciarse en el siguiente paso en el diagrama 2.15, correspondiente al proceso de creación del grafo.

Como se vio anteriormente, el grafo deberá ser transformado antes de ser ejecutado por el algoritmo, lo que se lleva a cabo en el siguiente proceso (Transformación grafo). Una vez situados en este punto, es cuando realmente comienza la ejecución del algoritmo, como se vio en el pseudocódigo 1, donde se comienza con un proceso para acomodar el flujo, basado en un algoritmo de búsqueda Breadth First Search (BFS), en el cual, aprovechando las características de los grafos con los que se trabaja, se seleccionará como nodo raíz la fuente virtual, avanzando en la búsqueda hasta localizar un posible destino. Esta operación se repite hasta completar el acomodo de cada uno de los flujos existentes, eliminando en cada iteración el enlace usado entre fuente la virtual y la real. Como medida preventiva adicional se comprueba que se ha podido acomodar el flujo deseado y, por lo tanto, se puede seguir con la ejecución.

Como siguientes fases, se realizan cada uno de los pasos vistos anteriormente, esto es, cálculo de la red residual (siguiendo las características generales de las mismas [Ahu+93]), búsqueda de los ciclos existentes en el grafo, mediante la realización de un algoritmo Depth First Search (DFS) o búsqueda en profundidad, a partir de la fuente virtual; en este caso, cada vez que se encuentra un ciclo, se chequea el coste de recorrerlo, y si resulta negativo, se acomoda el flujo correspondiente a la capacidad mínima del mismo, volviendo a calcular el grafo residual, y repitiendo el proceso de nuevo. Una vez comprobados la totalidad de ciclos y el grafo está libre de ciclos negativos, se procede a recuperar el grafo original y a calcular las rutas óptimas, que serán devueltas como parámetro de salida.

2.4. Análisis

En esta sección se presentan los principales resultados obtenidos durante la evaluación del algoritmo propuesto, trabajando con redes de mayor complejidad. De esta manera se busca determinar un impacto más realista sobre redes más pobladas, que posean un mayor número de fuentes de tráfico y de destinos, en comparación con lo visto hasta el momento.

El análisis que se expone se estructura en dos partes diferenciadas: la Sección 2.4.1 describe el comportamiento puesto de manifiesto por el algoritmo sobre topologías de red estáticas, lo que permitirá comparar sus prestaciones con alternativas que se basen en métricas tradicionales, en concreto con un algoritmo cuyo objetivo sea la minimización de la potencia total transmitida, utilizando para ello una solución clásica, en el que el coste de cada salto se corresponde con la potencia necesaria para lograr transmitir los paquetes al siguiente nodo. Por otro lado, la Sección 2.4.2 estudia el comportamiento de la solución propuesta en escenarios más complejos, en los que la evolución temporal de la exposición en los nodos adquiere una mayor relevancia; también se analizará la influencia de las posibles configuraciones del algoritmo desarrollado sobre el comportamiento que ofrece.

En ambos supuestos, el procedimiento consiste en ir aplicando los diferentes algoritmos sobre una red de manera secuencial; para ello se ‘emula’ la genera-

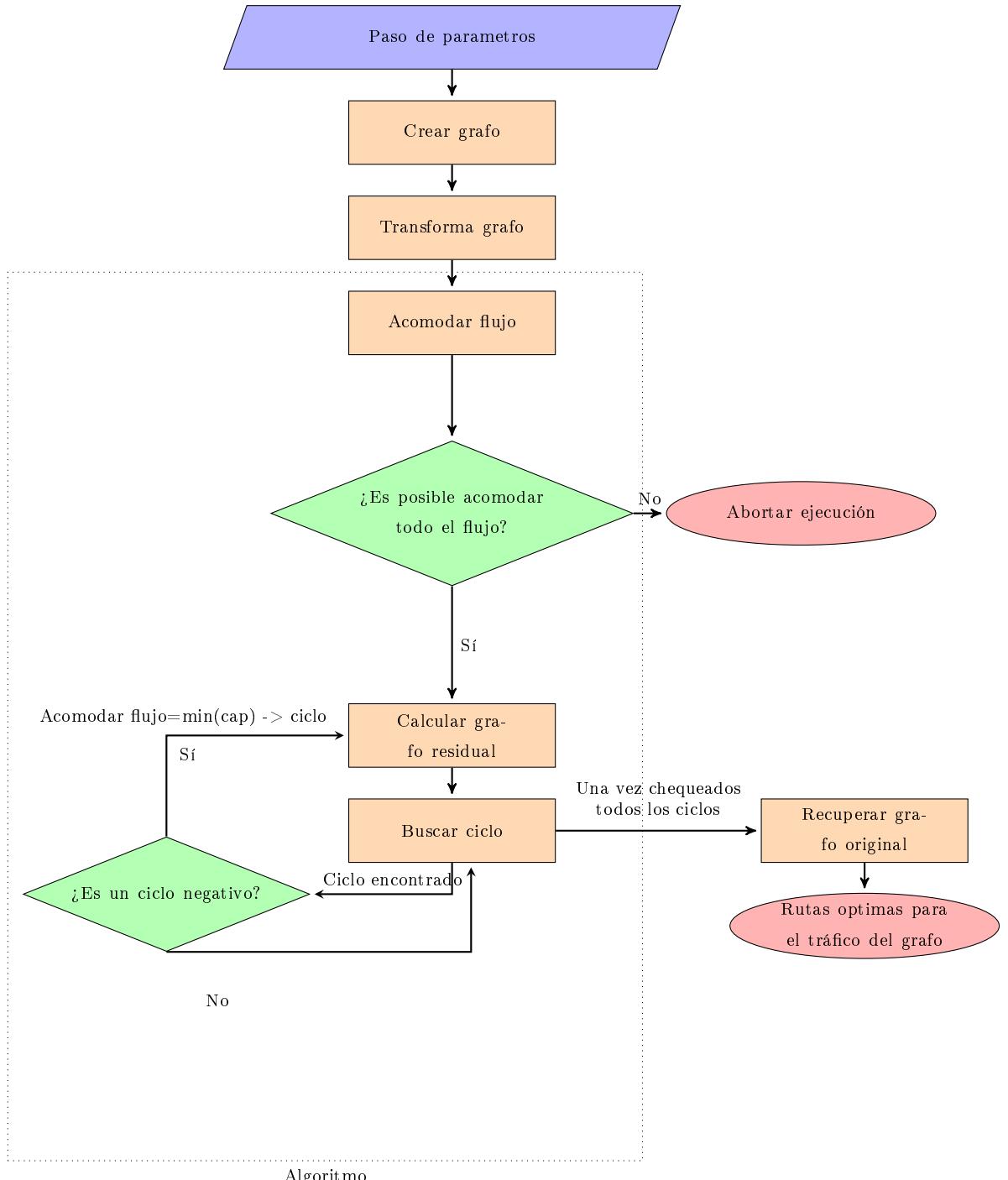


Fig. 2.15: Diagrama de flujo implementación algoritmo.

ción de flujos de tráfico (asumiendo que todos ellos son idénticos) y, por tanto, cada ejecución se corresponde con la búsqueda de rutas en instantes discretos, actualizando la situación de la red (exposición acumulada) antes de utilizar los algoritmos en la siguiente iteración, reflejando la evolución temporal que seguiría un protocolo. Esta metodología permite utilizar una implementación *a medida*, que considere la evolución temporal debida a los diferentes flujos de tráfico, sin la necesidad de disponer de herramientas más pesadas, que ralentizarían de manera notable el tiempo necesario para llevar a cabo el análisis.

Hay que tener en cuenta que la exposición acumulada se corresponde con un parámetro físico (típicamente medido en valores de campo eléctrico), mientras que en el algoritmo propuesto se modela a través del valor de K , que podría estimarse por ejemplo a partir de los paquetes transmitidos por un nodo durante una ventana temporal concreta. Considerando que los flujos que se están utilizando son iguales, se ha establecido que, en cada ejecución, todos los nodos que fueron seleccionados para formar parte de una ruta en la ejecución anterior (a excepción del destino) incrementen su exposición en un valor constante E , antes de proceder a ejecutar el algoritmo en la iteración actual.

2.4.1. Configuración estática

En este primer análisis se evalúa la capacidad del algoritmo propuesto de encontrar rutas que optimicen de manera conjunta las métricas de potencia transmitida y de exposición acumulada.

En concreto, se han estudiado escenarios en los que se han desplegado aleatoriamente (según un proceso de *Poisson*) 50 nodos en superficies cuadradas, cuyo lado se ha ido variando paulatinamente, para modificar la densidad y, por tanto, el grado de conectividad del grafo subyacente; se ha mantenido constante el radio de cobertura de los nodos en 15 m. La Tabla 2.1 resume los parámetros de este primer análisis; en cada topología (correspondiéndose con cada valor del lado) se han analizado los resultados que se observaron al modificar el número de fuentes (y, por tanto, de flujos). En todos los escenarios se han fijado 4 posibles destinos, que se corresponden con elementos de acceso a la red, de manera que sea indiferente que la ruta se conecte con uno u otro destino, siempre que se consiga establecer un camino hacia cualquiera de ellos. Esta suposición, que se alinea de manera adecuada con la definición del destino virtual descrita anteriormente, podría reflejar una situación real en la que un usuario simplemente pretenda encontrar una ruta válida hacia algún *gateway* disponible, sin que tenga ninguna preferencia a priori por alguno de ellos.

Tabla 2.1: Configuración topología estática

	Topología			
	α	β	γ	δ
Fuentes	{2, 4}	{2, 4}	{2, 4, 6, 8}	{2, 4, 6, 8}
Área m ²	120 × 120	130 × 130	140 × 140	150 × 150

Para analizar la evolución de la exposición se ha ejecutado el algoritmo, en todos los casos, 100 veces consecutivas, modificando el valor de exposición en función de las rutas establecidas en la iteración anterior; así, los nodos que hayan formado parte de una ruta durante T unidades temporales durante el experimento presentarán una exposición acumulada $E \cdot T$. Además, para asegurar la validez estadística de los resultados, se han llevado a cabo 100 experimentos independientes para cada una de las configuraciones. Se ha asumido que el coste asociado a la potencia de transmisión es proporcional a la distancia entre nodos, siendo su valor máximo 16 dBm. Por tanto, el cálculo del coste de la potencia en el enlace (i, j) se puede expresar como $P_{ij} = \frac{d_{ij}}{15} \cdot 16$, donde d_{ij} se corresponde con la distancia entre los nodos. Por su parte la exposición provocada por cada flujo que atraviesa un nodo durante una ventana temporal, incrementa el coste K de dicho nodo en 5 unidades.

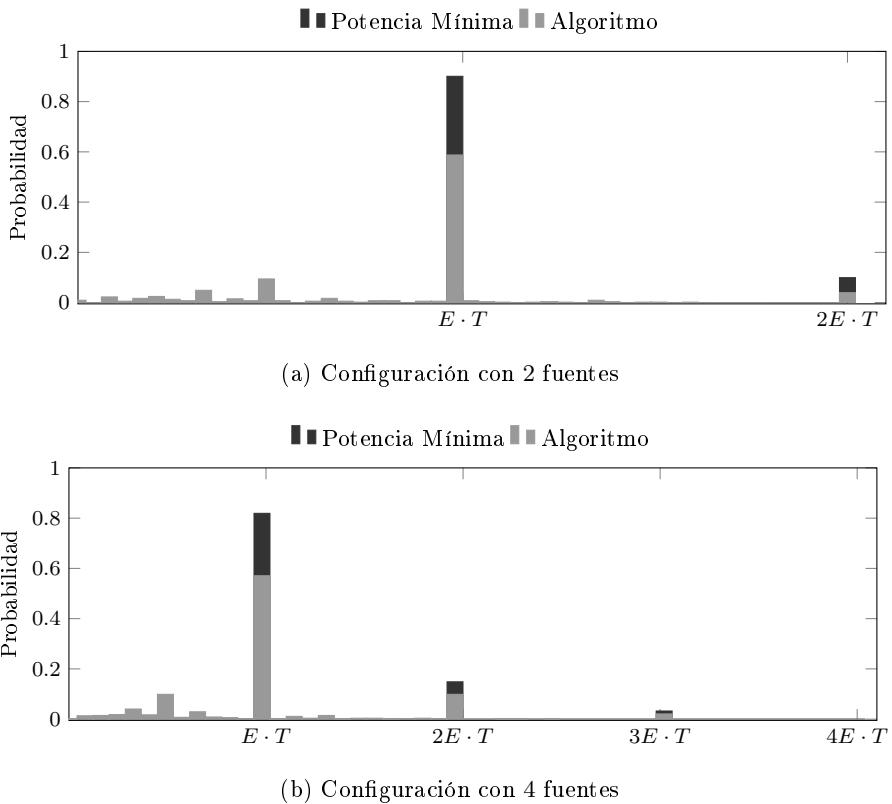


Fig. 2.16: PDF de la exposición en cada nodo en la topología α

En primer lugar se ha estudiado la exposición acumulada en los diferentes nodos a lo largo de un experimento, comparando el comportamiento del algoritmo propuesto con el de la solución clásica que determina las rutas de mínima potencia. La Figura 2.16 muestra la Función densidad de probabilidad (Probability Density Function) (PDF) de la exposición de los nodos para ambos algoritmos, utilizando la topología α con 2 y 4 fuentes. El valor $E \cdot T$ se corresponde con la exposición que se acumularía en un nodo que siempre hubiera formado parte de una ruta durante un experimento de duración T pasos, mientras que múltiplos de este valor reflejan situaciones en las que un nodo ha formado parte de más de una ruta. Como puede observarse, el algoritmo de mínima potencia, con un carácter claramente estático, únicamente presenta una probabilidad mayor de 0 en los múltiplos de $E \cdot T$, como cabría esperar, dado que la potencia de transmisión permanece constante en el tiempo y, por lo tanto, las rutas seleccionadas inicialmente permanecerán en uso durante todo el experimento. Por su parte, el algoritmo propuesto consigue balancear la exposición (y de manera colateral la carga); la consecuencia más visible es la reducción que se produce en la probabilidad de que un nodo participe, de manera continuada, en una única ruta. Cuando se utilizan 2 fuentes de tráfico, la reducción es cercana al 30%, mientras que al aumentar el número de fuentes a 4 existen más nodos generando exposición y, la ganancia es ligeramente inferior, situándose cerca del 20%. Esto se debe a que los nodos que acumulen una mayor exposición, serán evitados en las siguientes iteraciones y, por tanto, la exposición se repartirá de manera más equitativa entre los nodos que tienen alguna posibilidad de participar en las rutas.

Se observa que dicha mejora es más acusada en los casos en los que se trabaja con grafos más densos (Topología (α)), dado que el número de nodos que pueden

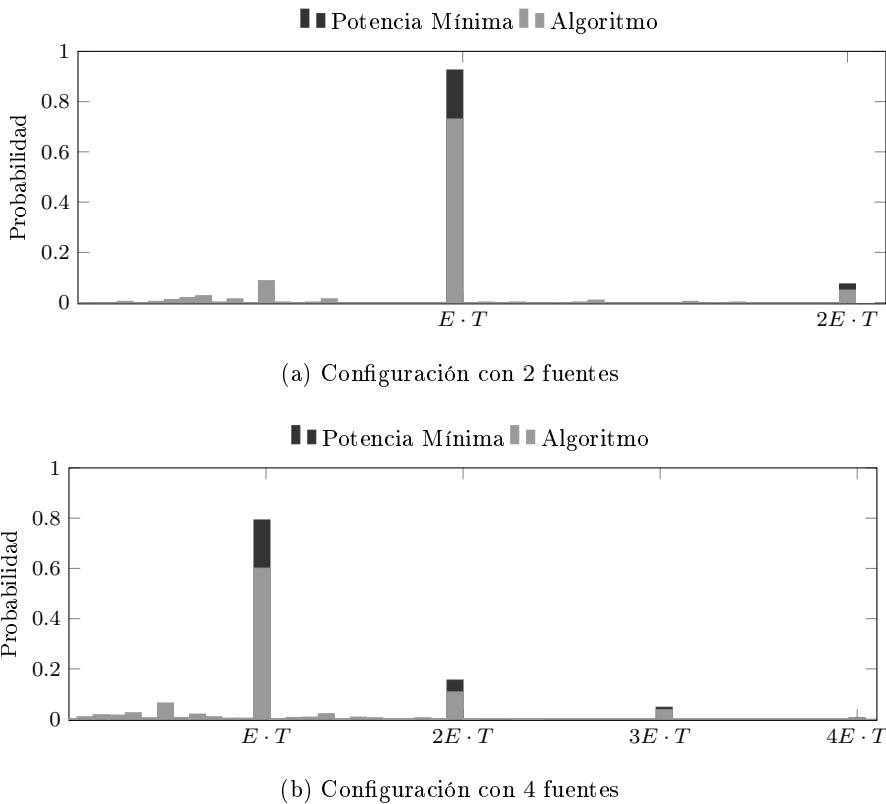


Fig. 2.17: PDF de la exposición en cada nodo en la topología β

participar en cada ruta crece con la densidad del grafo.

Tomando como referencia los resultados en grafos menos densos y, concretamente los relacionados con la topología (β), se observa en la Figura 2.17, como ante una reducción de la densidad de los escenarios con los que se trabaja, la mejora en términos de exposición es menor, situándose en valores inferiores al 20 %. Esto es un efecto esperado, dado que, la probabilidad de tener varias rutas alternativas, entre la fuente y uno de los destinos es inferior y, por tanto, lo es la posibilidad de repartir la exposición entre un mayor número de nodos.

Una vez estudiado el efecto que el algoritmo tiene sobre la exposición, se ha extendido el análisis, considerando varias topologías y diferentes cargas de tráfico (número de fuentes/flujo). La Figura 2.18 muestra el valor medio de la exposición (global, considerando todos los nodos (los marcadores indican el valor que toma el algoritmo en cada configuración)) tras llevar a cabo 100 experimentos independientes. De acuerdo a los resultados observados, se puede decir que el beneficio del algoritmo, respecto a uno que establezca los caminos de mínima potencia, se atenúa al disminuir la densidad de nodos. La figura muestra que la ganancia con la topología menos densa (δ) es notablemente inferior a la observada sobre el escenario más denso (α). Sin embargo, el impacto del número de fuentes/flujo no es tan relevante, viéndose que prácticamente no tiene influencia sobre la exposición.

Teniendo en cuenta que la exposición generada por el conjunto de toda la red está directamente relacionada con la potencia total transmitida, la caracterización del algoritmo también incluye una comparación de la potencia transmitida respecto a la óptima, que se ha obtenido utilizando una solución tradicional de búsqueda de coste (potencia) mínimo. Para ello, y de manera ilus-

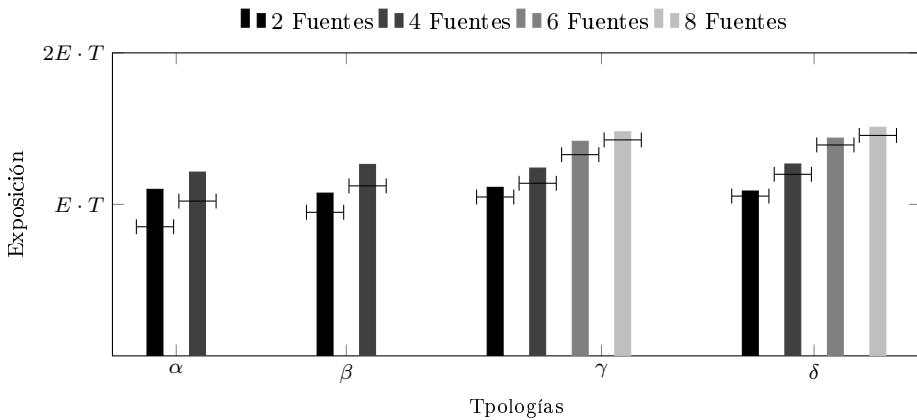


Fig. 2.18: Exposición media por experimento

trativa, se ha utilizado una relación lineal de la potencia necesaria por enlace con la distancia entre los dos nodos, con una constante de proporcionalidad de $(16/15) = 1.07 \text{ dBm}/\text{m}$, de manera que la potencia máxima que se podría tener por enlace, se corresponde con la distancia máxima por parte de una pareja de nodos (igual a la cobertura), multiplicada por la constante de proporcionalidad, esto es $15 \cdot 1.07 = 16 \text{ dBm}$.

Para estudiar el comportamiento de los dos algoritmos en relación a la potencia transmitida, la Figura 2.19 representa el valor medio de la potencia de transmisión total para todas las rutas que se establecen por escenario (los marcadores indican el valor que toma el algoritmo en cada configuración), y que atienden a la ecuación 2.8.

$$\bar{P}_{Tx} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^F \sum_{\forall(i,j) \in F_n} P_{ij} \quad (2.8)$$

Donde:

P_{ij} : Potencia de transmisión necesaria en cada enlace.

F : Se corresponde al número de muestras o rutas

\bar{P}_{Tx} : Es el valor medio de la potencia de transmisión por ruta.

Hay que tener en cuenta que, mientras el algoritmo de mínima potencia mantiene las mismas rutas durante todo el experimento, la solución propuesta en este trabajo potencia cambios en las mismas, de manera que se tiene que tener en cuenta el tiempo que una ruta permanece activa para acometer esta caracterización. En general, se puede observar que como consecuencia de la distribución de la exposición, se produce una pequeña penalización en términos de potencia, que se vuelve menos apreciable a medida que la densidad disminuye. Al considerar conjuntamente los dos últimos resultados se puede concluir que, para este tipo de escenarios estáticos, cuanto mayor sea la ganancia en términos de exposición acumulada, mayor será la penalización observada en la potencia de transmisión necesaria.

2.4.2. Configuración dinámica

En esta sección se estudiará el comportamiento del algoritmo sobre escenarios más complejos, que mimetizan en la medida de lo posible el comportamiento

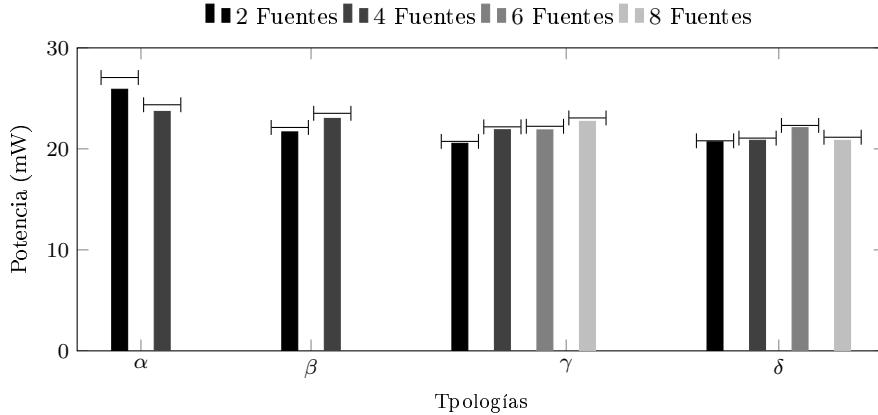


Fig. 2.19: Potencia media por ruta

de una red mallada, en la que cualquier nodo puede ser partícipe de una posible comunicación. Para ello, se diferenciará todos los nodos que pueden desempeñar el rol de fuente. Esto es, son capaces de enviar tráfico por lo menos a uno de los posibles destinos. En estos nuevos escenarios se irá modificando dinámicamente el conjunto de nodos que desempeñan dicho rol durante el mismo experimento. En concreto, se ha hecho uso de una superficie con dimensiones $140 \times 140\text{ m}^2$ sobre la que se han situado 9 posibles destinos (*gateways*) en un *array*, de tal forma que cubran el mayor área posible. Además, se han desplegado 50 nodos entre los que se seleccionan 4 fuentes de forma aleatoria. Al igual que en la caracterización anterior, se ha fijado el radio de cobertura de todos los nodos a 15 m.

Se han realizado experimentos con una duración de $T = 100$ pasos temporales, modificando los nodos que actúan como fuente cada 25 pasos temporales. Nuevamente, la exposición acumulada en cada nodo se incrementa en E unidades por cada flujo de tráfico que lo atraviesa. A diferencia del estudio anterior, en que el valor del coste K se mantenía constante respecto al incremento de la exposición, en este caso se analizará cuál debería ser la relación entre los costes asociados a la potencia de transmisión y a la exposición acumulada. Los resultados obtenidos podrán ser utilizados posteriormente para calibrar la configuración de ambos parámetros en un protocolo de encaminamiento real. Así, si se supusiera que la exposición acumulada es siempre creciente, se alcanzaría una situación en la que el criterio de minimización de la potencia transmitida sería despreciable frente al de la exposición acumulada, por lo que no se tendría en cuenta a la hora de encontrar las rutas óptimas.

La influencia de la relación entre los costes K (exposición) y P (potencia) se ha analizado con dos enfoque complementarios: en primer lugar se ha modificado únicamente el peso relativo a la exposición acumulada, manteniendo constante el que afecta a la potencia; en segundo lugar se ha estudiado el comportamiento del algoritmo cuando se aplica una función de *envejecimiento* a la exposición acumulada en los nodos, de manera que el coste correspondiente se reduzca cuando los nodos no estén participando de manera activa en ninguna ruta.

Las diferentes configuraciones que se han empleado para los costes se resumen en la Tabla 2.2, en la que P se corresponde al coste relativo a la potencia, que se calcula como en el análisis anterior. Respecto al parámetro K , se establece a partir del valor anterior más un incremento Δk por cada una de las rutas en las que cada nodo en concreto participa; si un nodo no ha estado activo en ninguna ruta en la última ventana temporal, el coste se decrementa una cantidad ∇k .

Tabla 2.2: Configuración de costes

Parámetro de coste	Valor
P	$distancia(m) \cdot 1.07$ (<i>Constante proporcionalidad</i>)
Δk	$\{3, 6, 9, 12, 15\}$
∇k	$\{0, \dots, \Delta k\}$

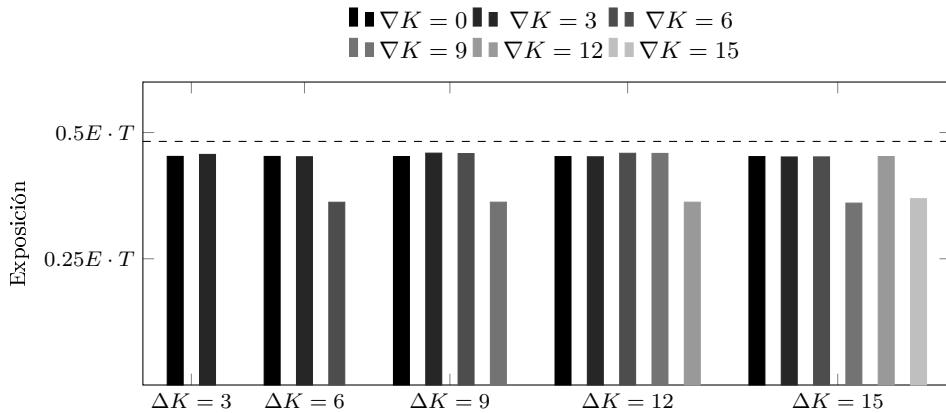


Fig. 2.20: Exposición media al final de un experimento en cada configuración

Como se puede apreciar en la Tabla 2.2, los valores utilizados para ∇ son siempre inferiores o iguales a los de Δ . De nuevo se han realizado 100 experimentos independientes para cada configuración, asegurando así la validez estadística de los resultados.

En primer lugar se ha estudiado la exposición siguiendo un procedimiento análogo al de la Sección 2.4.1. La Figura 2.20 muestra el valor medio de su valor promedio en cada experimento (la línea punteada marca el valor con el algoritmo de mínima potencia), considerando únicamente aquellos nodos que generan exposición (los que participan en las rutas que establece el algoritmo). En este caso, si un nodo formara parte de las 4 rutas activas a lo largo de todo el experimento, su exposición final tendría un valor de $4E \cdot T$.

Como puede observarse en la Figura 2.20, al variar los orígenes de los flujos de datos a lo largo del experimento y, por tanto, favoreciendo la participación de un mayor número de nodos en las rutas, se reduce la ganancia en términos de exposición (comparada con los escenarios estáticos que se estudiaron anteriormente). Sin embargo, se observa que la función de *envejecimiento* que se ha incorporado tiene un efecto positivo y que, a priori, cuanto mayor sea su peso mejor resultado se obtiene, estando el valor óptimo de la constante de multiplicación utilizada cuando es igual al incremento fijado para ese experimento, lo que permite reducir más la exposición. Además, los resultados ponen de manifiesto que sería recomendable que el coste asociado a la exposición tuviera un valor elevado en relación al de la potencia de transmisión; en concreto, si este último se fija en 15 unidades, el correspondiente al crecimiento de exposición debería ser superior a 6. Esto desemboca en que la relación entre el coste referente a la exposición que acumulan los nodos y el de la potencia de transmisión sea elevada, $\uparrow\uparrow K/P$ y en consecuencia, la alternancia entre rutas, a medida que se acumula exposición sea cada vez mas frecuente.

Por otro lado, se ha vuelto a analizar la influencia del algoritmo sobre la po-

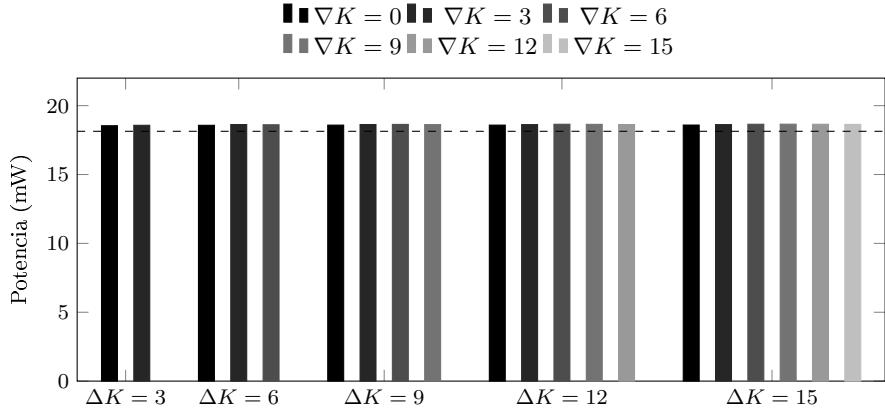


Fig. 2.21: Potencia media por ruta, configuración dinámica

tencia transmitida por ruta. La Figura 2.21 ilustra el valor medio de la potencia de transmisión por ruta por unidad de tiempo, comparando los resultados observados al utilizar el algoritmo que garantiza la mínima potencia con cada una de las configuraciones de la solución propuesta en este trabajo. Se observa que el mayor dinamismo de los escenarios hace que todas las configuraciones se comporten de forma muy similar y que, además, los resultados de la solución propuesta en este trabajo (que busca, además, mejorar la distribución de la exposición) son muy similares a los que consigue el algoritmo que minimiza la potencia transmitida. Este factor atiende a la incursión de la función de *envejecimiento*, que tiene un efecto positivo, ya que se consigue que las rutas con menor número de saltos vuelvan a ser seleccionadas más rápidamente, y las que necesiten un mayor número de saltos, sean descartadas más rápidamente.

2.5. Conclusión Algoritmo

En este capítulo se ha presentado un algoritmo que permite optimizar tanto la potencia de transmisión necesaria en cada ruta como la exposición acumulada por nodo. Para ello se ha planteado una transformación del grafo original, incorporando una serie de nodos virtuales, que permiten tener en cuenta el criterio que minimiza la exposición acumulada. El algoritmo propuesto se basa inicialmente en un CCA con una serie de modificaciones, y los análisis que se han llevado a cabo en los que se ha comparado el algoritmo propuesto con una solución tradicional de búsqueda de caminos de coste mínimo, ponen de manifiesto que logra conseguir el objetivo para el que fue diseñado.

Protocolo RBRP

Los siguientes pasos en el trabajo se centran en la búsqueda de un protocolo que extrapole las consideraciones a un entorno más realista, el cual permita comparar los resultados obtenidos con el algoritmo en el capítulo anterior.

Se empezará abordando una serie de consideraciones previas (sección 3.1), que tratarán aspectos generales del protocolo que aquí se presenta, el entorno de simulación usado y la presentación de la funcionalidad de control de potencia (sección 3.1.1), analizando los resultados que aporta en comparación con una solución en la que se mantiene constante.

Posteriormente, en la Sección 3.2, se abordarán los aspectos que habitualmente son tenidos en cuenta a la hora de definir un protocolo de comunicaciones. Así, se presentará el formato de cada uno de los mensajes que incorpora (Sección 3.2.1), las estructuras de datos (Sección 3.2.2) que definen, las diferentes tablas de rutas usadas, las funcionalidades más relevantes (Sección 3.2.3), para finalizar con la explicación de la lógica seguida en la implementación.

Por último en la Sección 3.3 se planteará el desarrollo de varias simulaciones sobre el NS-3. Se empezará estableciendo una comparativa entre el uso de un mecanismo de enrutamiento apoyado por el algoritmo presentado y el uso del protocolo RBRP, para comparar el comportamiento de ambos. Seguidamente se centrará el análisis en el protocolo RBRP, pero en este caso comparándolo con soluciones más tradicionales (Ej: AODV), basadas en una métrica de número de saltos, a los que se incorpora la funcionalidad de control de potencia de transmisión.

3.1. Consideraciones previas

A fin de realizar una breve introducción al lector para que sitúe mejor el marco de la elaboración del protocolo RBRP, es conveniente definir una serie

Física	Enlace	Cabecera IP	TCP o UDP	Paquete RBRP
--------	--------	-------------	-----------	--------------

Fig. 3.1: Trama RBRP.

de aspectos a tener en cuenta antes de entrar en detalle en los fundamentos y componentes que conforman el protocolo aquí presentado.

Con el objetivo de reducir la exposición a campos electromagnéticos, en este tipo de despliegues, se propuso en el artículo [Ian+14] el protocolo RBRP, que perseguía, la reducción de dicha exposición. Sin embargo, el análisis se limitaba a un único flujo de información, todos los nodos utilizaban la misma potencia de transmisión y no se tenía en cuenta un posible coste en términos de exposición relacionado a cada nodo, lo que impone grandes restricciones a lo comentado en el capítulo anterior. Además, se realizaba una comparativa con un protocolo para redes multi-salto tradicional, pero no era posible establecer si el resultado se acercaba o no al comportamiento óptimo. El algoritmo presentado previamente permite llevar a cabo dicho análisis.

Todas estas limitaciones motivan replantearse dicho protocolo y la incorporación de más funcionalidades, que se ajusten a lo deseado, como se verá posteriormente.

Como puntos iniciales de partida, hay que comentar que el protocolo RBRP trabaja con funcionalidades similares a un protocolo *reactivo* definido para una red MANET (como puede ser AODV [Per+03]), es decir, solo inicia el descubrimiento de la topología de la red cuando alguno de los nodos necesita enviar algún paquete (esta situación será la que dispone la actualización de la tabla de rutas de cada nodo). La Figura 3.1 muestra el formato de una trama que encapsula un paquete RBRP; se puede observar que éste se sitúa en la parte destinada para los datos de aplicación, lo que facilita su integración.

Por otra parte, se utilizará un entorno de simulación basado en la plataforma NS-3 [Hen+06] [Lac+06]. Se trata de un simulador de redes de eventos discretos, desarrollado principalmente para un uso en ámbitos de investigación. El objetivo del proyecto NS-3 es desarrollar un entorno abierto de simulación para investigación en el ámbito de las redes. NS-3 es software libre, y está disponible para que cualquiera pueda hacer uso del código fuente ya desarrollado, o para contribuir con módulos adicionales (o modificaciones ya existentes). Esto ayuda a crear una base con la que trabajar, y utilizar las herramientas brindadas por el simulador, para trabajar en todos los niveles definidos en una comunicación.

3.1.1. Ajuste dinámico de potencia

En la búsqueda de la reducción en la exposición electromagnética, como punto de partida se trabajará en la implementación de una metodología para conseguir un ajuste dinámico de potencia. Así, cada uno de los nodos ajustarán su potencia de transmisión para los paquetes de datos, en función del siguiente nodo. Este enfoque podría tener en consideración la distancia entre nodos si se asume un modelo determinista con condiciones ideales (espacio libre, ninguna otra fuente de atenuación,), se podría modelar como muestra la ecuación 3.1, que atiende a la conocida ecuación de Friis. Este modelo es el utilizado por el simulador NS-3 en su configuración por defecto para canales inalámbricos. Así, conociendo la sensibilidad de los receptores se podría calcular la potencia de transmisión para cada caso.

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.1)$$

$$P_r = Ec.Friis + X \quad (3.2)$$

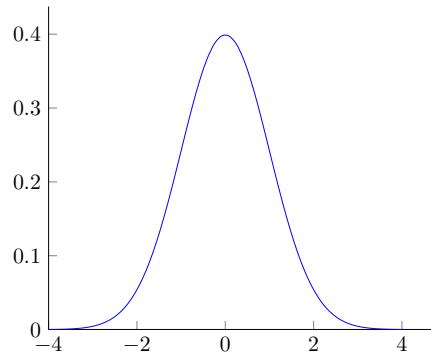


Fig. 3.2: Distribución normal, $\mu = 0 \sigma^2 = 1$

Donde: P_r y P_t se corresponden, con las potencias, de recepción y transmisión respectivamente, G_t y G_r indican las ganancias del transmisión y receptor, λ marca la longitud de onda de la señal ($\lambda = \frac{c}{f}$, $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $f = \text{frecuencia}$) y d es la distancia que separa ambos nodos.

Para dotar de mayor realismo al trabajo, se va optar por aportar una solución a medida. Para ello se realizará una caracterización previa del mismo, que consistirá en la realización de una simulación que estudiará el comportamiento de la red con diferentes potencias de transmisión y a diversas distancias. Se añadirá además un factor adicional a las pérdidas, modelado por una variable aleatoria (X) que sigue una distribución normal o Gaussiana con media 0 y varianza 1 (ver Figura 3.2). Con ello la función que modela la potencia recibida queda reflejada en la ecuación 3.2.

Esto está justificado por las complejas características que puede presentar un canal inalámbrico real, con múltiples configuraciones y obstáculos. Así, ante una futura implementación sobre un escenario real, se podría realizar un entrenamiento previo para calibrar los parámetros de potencia correspondientes.

3.1.1.1. Caracterización de escenarios

Para realizar la caracterización de los escenarios se han de tener en cuenta dos factores: primero el uso de diferentes potencias de transmisión, analizando la distancia de cobertura máxima y la potencia de transmisión necesaria para garantizar un cierto nivel de calidad de servicio (QoS), en este trabajo considerando al *throughput* de la comunicación. En segundo lugar se procederá a caracterizar los paquetes de señalización del escenario, que se transmiten a una potencia fija de 16 dBm, con la finalidad de que sirvan en una posterior implementación del protocolo como referencia.

En primer término se plantea una red sencilla, que consta de 2 nodos, uno de ellos con una posición fija y el otro variable (ver Figura 3.3), con la configuración que se muestra en la Tabla 3.1. Se genera un flujo de tráfico constante a la máxima tasa posible (en este caso 11 Mbps) entre ambos, a una potencia determinada, durante 5 segundos, tomando medidas del *throughput* en cada posición, hasta llegar a una, distancia que imposibilite la comunicación (*throughput* = 0). Se repite la misma operación para potencias que oscilarán entre -1 dbm y 16 dBm ($\Delta 1 \text{ dBm}$) y se establece que el *throughput* garantizado en ningún caso sea inferior al del 90 % del máximo posible ($\approx 6 \text{ Mbps}$).

Con esta configuración, los resultados de la simulación quedan reflejados en la Figura 3.4, que muestra la distancia y el *throughput* correspondiente, con

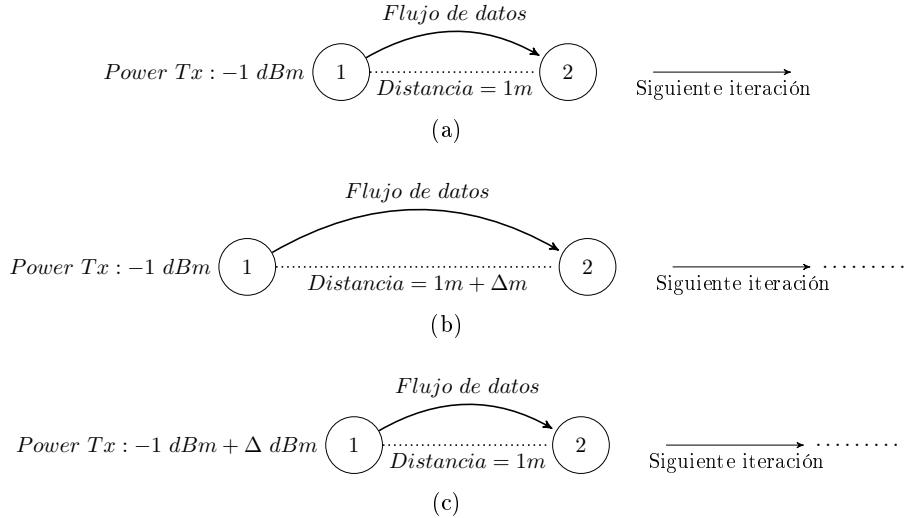


Fig. 3.3: Caracterización de escenarios

Tabla 3.1: Configuración escenario de caracterización

Parámetro	
WIFI	802.11b
Rate	11 Mbps
Tamaño paquete	1472 bytes
Max(Throughput)	$\approx 6 \text{ Mbps}$
Min(Throughput) permitido	$\approx 5.4 \text{ Mbps}$

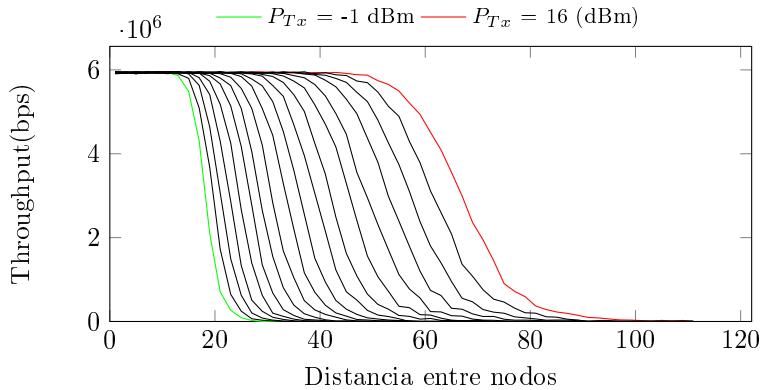


Fig. 3.4: Caracterización distancia vs throughput

diferentes potencias de transmisión (destacar que el caso de 16 dBm ofrece una caracterización completa de los paquetes de señalización). Extrapolando estos resultados a los requerimientos deseados, la Figura 3.5 indica la cobertura ofrecida por la red con diversas potencias de transmisión, valores que servirán de referencia para llevar a cabo la configuración del interfaz de la antena con la adecuada potencia de transmisión.

Antes de continuar con la integración sobre el protocolo que se pretende desarrollar en este capítulo, se realizará un análisis de los resultados aportados por esta solución. Dado que se trata de una solución *Cross-Layer*, independiente del protocolo de enrutamiento empleado, para esta simulación se empleará el

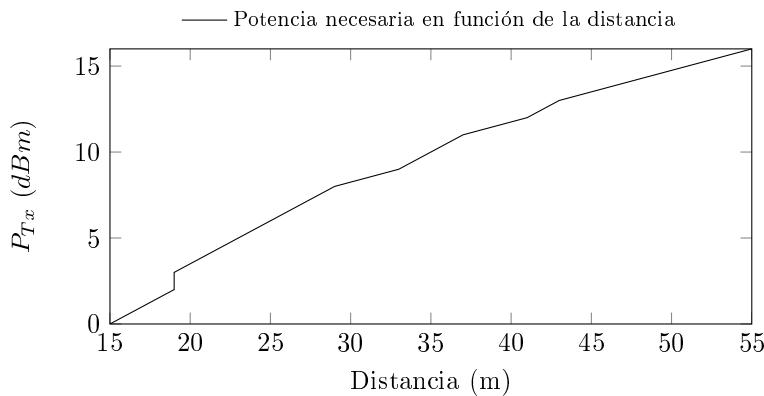


Fig. 3.5: Caracterización cobertura potencia dinámica

Tabla 3.2: Configuración escenario AODV

Parámetro	
WIFI	802.11b
Rate	1 Mbps
Tamaño paquete	1472 bytes
Área	$300 \times 300 m^2$

protocolo AODV, que es uno de los más extendidos dentro de las denominadas redes MANET.

Estas simulaciones serán realizadas, asumiendo tanto un comportamiento normal, que no incorpora ningún control en la potencia, como considerando la implementación tratada anteriormente.

Antes de entrar a valorar los resultados, es preciso describir brevemente la filosofía que se ha seguido para el desarrollo y adaptación de los módulos pertenecientes al simulador NS-3. Se diferencian dos casos: cuando un nodo recibe un paquete de señalización, del que conoce que ha sido transmitido con una potencia de 16 dBm, el protocolo obtiene, a través de la capa física, la potencia con la que se ha recibido el paquete. Una vez situados en la capa de red, con la información disponible gracias a la caracterización previa del escenario, se puede añadir una potencia de transmisión adecuada a cada ruta existente. La Figura 3.6 muestra una representación gráfica de todo el proceso. Por otro lado, cuando un paquete es transmitido, se produce una clasificación inicial, diferenciando entre paquetes de señalización y datos. Estos últimos serán los que en la solución propuesta deberán incorporar un ajuste dinámico en la potencia de transmisión, *Cross-Layer*, que va desde dicha capa de red, hasta la capa física, donde se configurará la interfaz de transmisión con un valor adecuado al destino que se quiere alcanzar, como se ve en la Figura 3.7.

Volviendo a la simulación propiamente dicha, la Tabla 3.2 muestra la configuración utilizada en este escenario. En ella se desplegarán 60 nodos, con un rango de cobertura máximo de 55 m y sondas de medida situadas de forma de rejilla con una separación de 20 m, con la finalidad de crear superficies uniformes. Se realizan 100 iteraciones; el tiempo de simulación se fija en 10 seg por iteración. El escenario consta de un nodo seleccionado de manera aleatoria, que genera tráfico a una tasa de 1 Mbps, y otro receptor que se encontrará en una posición fija en el centro del área, correspondiente a escenarios en los que se

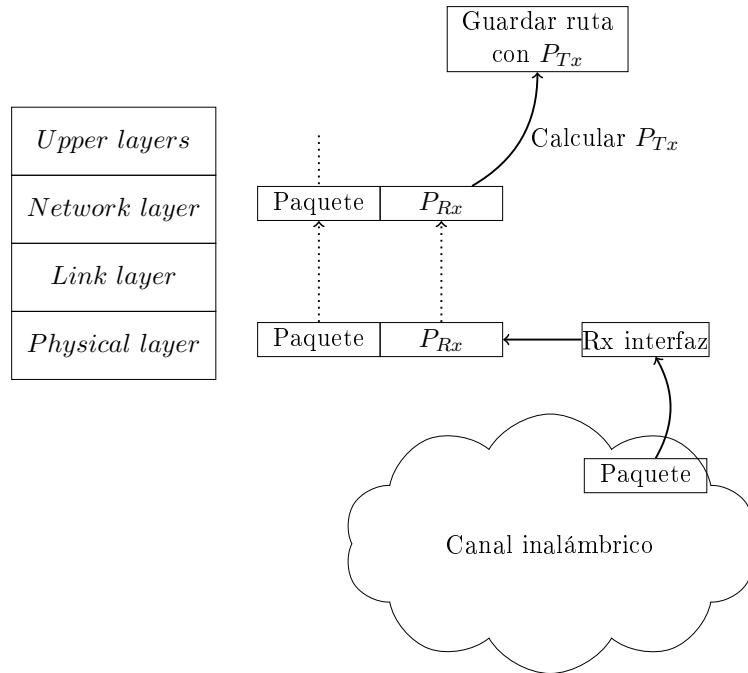


Fig. 3.6: Solución *Cross-Layer* para paquetes recibidos

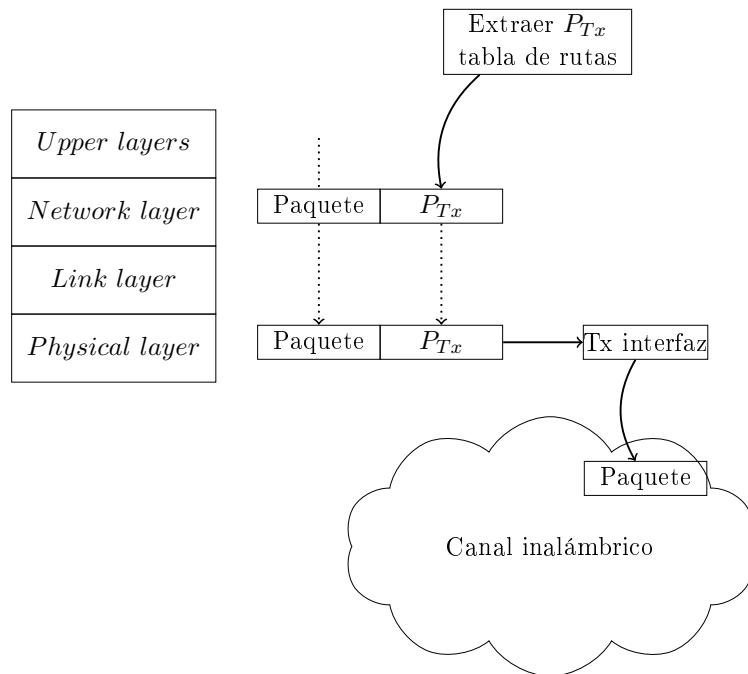


Fig. 3.7: Solución *Cross-Layer* para paquetes transmitidos

trabaja con *gateways* encargados de dar acceso a la red. Por último, en cada iteración se varía de forma aleatoria la posición de los nodos, para simular un posible desplazamiento o cambio de rol del nodo emisor de tráfico.

Son varios los resultados observados, como se ve en la Tabla 3.3. En primer lugar y atendiendo al objetivo principal de esta solución, se observa que la potencia total acumulada por las sondas desplegadas es menor en el caso de un ajuste dinámico y, por lo tanto, también lo es en términos de potencia media en la transmisión de paquetes, consiguiendo una reducción de unos 2 dBm, sin

Tabla 3.3: Resultados ajuste dinámico de potencia

	Implementación	
	Potencia Tx fija	Ajuste dinámico de potencia Tx
$\sum P_{Tx}$	2.17 W	1.67 W
$E[P_{Tx}]$	16 dBm	14.07 dBm
Throughput	0.994 Mbps	0.96 Mbps

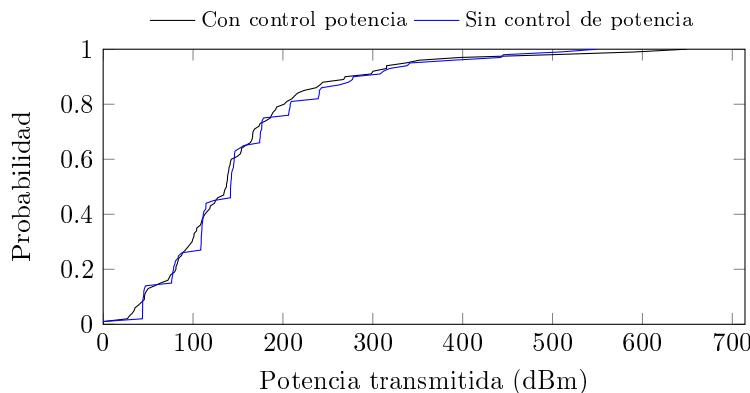


Fig. 3.8: CDF de la potencia Tx media para paquetes de datos

que ello suponga una disminución del *throughput* superior al valor máximo de penalización prefijado en la caracterización, el 10 %.

En la Figura 3.8, se observa la Función distribución de probabilidad (Cumulative Distribution Function) (CDF) correspondiente a la potencia de transmisión media necesaria para cada paquete de datos (considerando un valor fijo para los paquetes de señalización) con ambas configuraciones. Se observa como el crecimiento en el ajuste dinámico es mayor que en el estático, como cabría esperar, debido a que la probabilidad de utilizar potencias de transmisión más pequeñas será mucho mayor. La diferencia entre ambas no parece reseñable debido a que la potencia se ha representado en *dBm*.

Siguiendo con el análisis de estos resultados, y con el objetivo de favorecer redes inalámbricas eficientes en términos energéticos (*Green Telecom*), que es actualmente uno de los principales problemas de las redes inalámbricas. Se analizará el ahorro energético que se podría conseguir. Es difícil realizar una estimación numérica del ahorro real, debido a la heterogeneidad en términos de *hardware* de las soluciones existentes, en el mercado y en la disparidad entre el ahorro de consumo y la potencia con la que transmite su interfaz inalámbrico. Para que el lector de este documento se haga una idea del ahorro en una implementación real, se ha seleccionado a modo de ejemplo el chip CC2420 de *Texas instruments* [TI], que se trata de un transceptor que trabaja a 2.4 GHz en redes tipo *IEEE 802.15.4*, diseñadas para trabajar con bajo voltaje y consumo. La Tabla 3.4 muestra la relación entre la potencia a la que transmite el interfaz de comunicaciones inalámbrico y la potencia necesaria por el dispositivo. Aplicando la mejora de 2 *dBm* en la transmisión se conseguirían ahorros de potencia que oscilan alrededor de 2 – 3 *mW*. Se ve que, a pesar de que en términos de exposición la mejora es importante, en consumo energético no es tan significante, debido a la potencia usada por el resto de componentes que conforman el dispositivo.

Tabla 3.4: Chip CC2420

P_{Tx} interfaz (dBm)	P_{Tx} interfaz (mW)	Potencia Usada (mW)
-7 dBm	0.20	22.50
-5 dBm	0.32	25.02
-3 dBm	0.50	27.36
-1 dBm	0.79	29.70
0 dBm	1.00	31.32

3.2. Funcionamiento

En esta sección se proporciona a una descripción detallada de los diferentes componentes del protocolo RBRP, incluyendo los mensajes que define, las estructura de datos con las que trabaja, la manera de operación y una descripción lógica de los procesos llevados a cabo.

3.2.1. Estructura de los mensajes

Antes de entrar en detalle en cada uno de los tipos de mensajes existentes, es aconsejable comentar el uso del campo *Nº de secuencia* que aparecerá en cada uno de ellos (con excepción de los mensajes de *hello*). Este campo numérico es utilizado para permitir chequear la validez temporal de la información existente en la tabla de rutas, dando prioridad a secuencias superiores; además consigue evitar la aparición de bucles infinitos. Cada agente de enrutamiento asignará un número de secuencia inicial con valor 0, e irá incrementándolo en una unidad cada vez que se genera un nuevo *descubrimiento* de ruta o se responde al mismo.

Como se comentó en la introducción de esta sección, el protocolo RBRP se trata de un protocolo reactivo de enrutamiento, por lo que necesita una serie de mensajes de señalización. Cada uno de los mensajes quedan definidos a continuación:

- **RBRP-ROUTE-DISCOVERY:** Este mensaje es enviado en modo *broadcast* cada vez que un nodo quiere establecer una ruta; incluye su propio número de secuencia, incrementado en una unidad y el que conoce del destino (si es desconocido se situará como valor por defecto). El mensaje será retransmitido por los nodos intermedios hasta que alcanza el destino buscado. En la Figura 3.9 se puede apreciar la composición completa del mismo, con los campos enumerados seguidamente.
 - Versión: Se define un campo para la versión del protocolo, pensado para diferenciar futuras implementaciones del mismo.
 - Tipo: Marca el tipo de mensaje, para el descubrimiento de ruta será 0x01.
 - Reservado: Campo reservado.
 - Saltos: Número de saltos dados por el paquete desde que fue generado por el nodo origen.
 - Coste K: Coste correspondiente a la exposición acumula por cada nodo que ha procesado el paquete.
 - Coste P: Coste correspondiente a la potencia de transmisión por cada nodo que ha procesado el paquete.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Versión	Tipo		Reservado		Número de saltos																										
		Coste K																													
		Coste P																										Costes			
		Coste total																										Id. fuente			
		SRC-ID																										Id. destino			
		SRC-SEQ-NUMBER																													
		DST-ID																													
		DST-SEQ-NUMBER																													

Fig. 3.9: RBRP-ROUTE-DISCOVERY y RBRP-ACK-ROUTE-DISCOVERY.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Versión	Tipo		T. reporte		R	S	Valor																										
		SRC-ID																												Id. fuente			
		SRC-SEQ-NUMBER																															
		Nº de rutas																															
		RDST-ID																															
		...																															

Fig. 3.10: Estructura mensaje RBRP-REPORT-COST

- Coste total: Coste total correspondiente a la suma de los dos anteriores. Sirve como métrica para establecer rutas.
- SRC-ID: Dirección IP origen del paquete.
- SRC-SEQ-NUMBER: Número de secuencia marcado por el origen.
- DST-ID: Dirección IP del destino.
- DST-SEQ-NUMBER: Número de secuencia del destino si es conocido; en caso contrario tomará un valor por defecto, 0.
- RBRP-ACK-ROUTE-DISCOVERY: Este mensaje es la respuesta al descubrimiento de ruta comentado anteriormente. Es transmitido por el nodo destino de la comunicación y se realiza en modo *unicast*, utilizando la ruta utilizada por el descubrimiento correspondiente, por lo que será propagado por todos los nodos intermedios necesarios hasta llegar al origen. La Figura 3.9 muestra su formato; en este caso los campos serán los mismos que para el descubrimiento de ruta, cambiando únicamente el campo correspondiente a tipo, que pasará a tener el valor 0x02.
- RBRP-REPORT: Es el encargado de notificar los cambios en el coste, en términos de exposición acumulada; así, informará a los nodos que forman parte de una ruta establecida que alguno de los nodos ha cambiado su coste *K* y que debe lanzarse un descubrimiento de nuevo. La Figura 3.10 muestra su formato, con los campos descritos a continuación.
 - Versión.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31																			
Versión	Tipo		Reservado		M	S	Coste																																											
SRC-ID																																																		
SRC-SEQ-NUMBER																																																		

Fig. 3.11: Estructura mensaje RBRP-HELLO

- Tipo: En este caso será *0x03*.
- Tipo de reporte: Tiene definido dos valores: *0x00*, para valores desconocidos, y *0x01*, para notificar un cambio en el coste.
- Flags R y S: Se trata de dos *flags*, la primera de ella reservadas, mientras que la segunda indica si el coste a actualizar crece o decrece.
- Valor: Variación en el coste.
- SRC-ID y SRC-SEQ-NUMBER : Dirección del nodo origen y número de secuencia.
- N° de rutas y RDST-ID: Número de rutas e identificador del destino de las que deben ser actualizadas.
- RBRP-HELLO: Se transmite en modo *broadcast*. Este mensaje cumple una doble función, por un lado se encarga del descubrimiento de vecinos estableciendo enlaces entre ellos, mediante un envío periódico, además es el que en primer término notifica un cambio de coste en algún nodo. La Figura 3.11 muestra en detalle su formato, que incluye los campos descritos posteriormente.
 - Versión.
 - Tipo: En este caso será *0x04*.
 - Reservado: Campos reservados.
 - Flags M y S: La primera sirve para diferenciar entre un mensaje *hello* de descubrimiento y otro que indique cambio de coste, mientras que la segunda marca el signo de la variación del coste.
 - Coste: Variación en el coste.
 - SRC-ID y SRC-SEQ-NUMBER : Dirección de origen del paquete y número de secuencia correspondiente.

3.2.2. Estructura de datos

Es conveniente describir las estructuras de datos con la que deben trabajar los agentes de enrutamiento de nodo:

- Tabla de rutas: Esta estructura de datos es la encargada de almacenar las rutas establecidas en cada nodo; se han definido los apartados mostrados en la Figura 3.12, descritos seguidamente.
 - Destino: Dirección IP destino de la ruta.
 - Coste: Indica el coste correspondiente, y estableciendo la métrica que tendrá en cuenta el protocolo.

Destino	Coste	Saltos	Nº secuencia	C. temporal	Gateway	Estado	P_{Tx}
Id	Coste		Nº secuencia	C. temporal			P_{Tx}

Fig. 3.12: Campos de datos definidos en la tabla de rutas.

Id	Coste		Nº secuencia	C. temporal	P_{Tx}

Fig. 3.13: Campos de datos definidos en la tabla de vecinos.

- Saltos: Aquellos necesarios para alcanzar al destino, incluido a modo informativo, ya que no determina la métrica del protocolo.
 - Nº de secuencia: Almacena el número de secuencia de la ruta.
 - Control temporal: Para controlar la validez temporal de las entradas, su valor es configurable.
 - Gateway: Define el siguiente salto para alcanzar al destino (dirección IP).
 - Estado: Indica el estado en el que se encuentra la ruta: en uso (envío de información local), activo (la entrada se corresponde con una ruta), en uso y activa (combinación de ambas), entrada inválida y cualquier estado.
 - Potencia de Tx: Es la potencia de transmisión necesaria para alcanzar el siguiente salto, para poder realizar el control de potencia.
- Tabla de rutas inversas: Es una tabla de rutas con una validez temporal determinada, que se crea durante el descubrimiento de ruta. Al retransmitir el descubrimiento se van creando entradas, para dar respuesta al reconocimiento. Usa temporizadores que son activados cuando se crea la entrada, de manera que cuando expiran se da por supuesto que la entrada no forma finalmente parte de la ruta escogida y se descarta. En caso contrario, al recibir la respuesta del reconocimiento, la entrada se traslada a la tabla de rutas principal. Sus campos son idénticos a los comentados con anterioridad.
 - Tabla de vecinos: Es una estructura de datos encargada de almacenar la información referente a los nodos que se encuentran dentro del área de cobertura de un determinado nodo, esto es, están a un solo *salto* (vecinos). Es la consecuencia del procesado de los mensajes de *hello*, y consta de los campos definidos en la Figura 3.13.
 - Id: Identificador IP del vecino.
 - Coste: Coste necesario para alcanzar al vecino.
 - Nº de secuencia: Almacena el número de secuencia de dicho nodo.
 - Control temporal: Se encarga de controlar la validez temporal de las entradas.
 - Potencia de Tx: Potencia de transmisión necesaria para alcanzar a ese vecino.

3.2.3. Operación

Una vez se ha visto, el formato de los mensajes y los datos con los que trabajará el protocolo presentado en este trabajo, se procederá a continuación a explicar en detalle las operaciones en las que se basa su funcionamiento. Estas quedan agrupadas en varias fases:

- Descubrimiento de vecinos.
- Descubrimiento de ruta.
- Notificación de cambio de coste.

3.2.3.1. Descubrimiento de vecinos

Esta funcionalidad es la que ayuda inicialmente a cada uno de los nodos a conocer a sus vecinos, mantenerlos y notificar la aparición de nuevos elementos en la red. Esto conlleva un envío periódico por todos los nodos de mensajes *hello*, que serán procesados por los vecinos para llenar, como se vio anteriormente, los datos recogidos en su tabla de vecinos.

Esta función desempeña un papel fundamental a la hora de establecer un control en la potencia de transmisión en los paquetes de datos, y establecer así una de las métricas que será usada por el protocolo. Estos mensajes de *hello*, al ser recibidos por los nodos, y usando el entrenamiento previo definido en la sección 3.1.1, permitirán establecer dicha potencia, que se usará como una de las métricas que se tienen en cuenta a la hora de establecer las rutas, como se verá en la sección 3.2.3.2.

3.2.3.2. Descubrimiento de ruta

Como se ha comentado con anterioridad se está trabajando con un protocolo de tipo *reactivo*, donde los nodos no conocen previamente la topología de red. Esto hace que sea necesario un procedimiento para el establecimiento de rutas.

Esta funcionalidad queda reflejada en la Figura 3.14, que muestra paso por paso el criterio establecido. El nodo A inicialmente quiere enviar un flujo de datos hacia el nodo D; para ello, y como no posee una entrada válida en su tabla de rutas para este destino, envía un mensaje RBRP-ROUTE-DISCOVERY, que será recibido por los nodos B y E, que lo procesarán, guardando ambos una entrada en su tabla de rutas inversas y retransmitiendo posteriormente el descubrimiento. Los nodos número C y F recibirán los dos descubrimientos, con el mismo número de secuencia y lo retransmitirán hacia D; finalmente, este seleccionará el descubrimiento que posea un menor coste. En este caso y a modo ilustrativo, se supone que se decanta por el procedente del nodo C.

El nodo D, al ser el destino, responderá con un mensaje RBRP-ACK-ROUTE-DISCOVERY en modo *unicast*, que volverá por el camino empleado previamente. El nodo C recibirá la confirmación de ruta y la retransmitirá, moviendo la entrada creada previamente en la tabla de rutas inversas a la tabla de rutas principal, lo que le convierte en nodo intermedio para la comunicación entre A y D; B llevará a cabo la misma operación. Por su parte los nodos, E y F, al no recibir respuesta, borrarán la entrada que crearon en la tabla de rutas inversas. Finalmente, el nodo origen A recibirá la confirmación del descubrimiento, y guardará la entrada en su tabla de rutas principal, pudiendo de esta manera

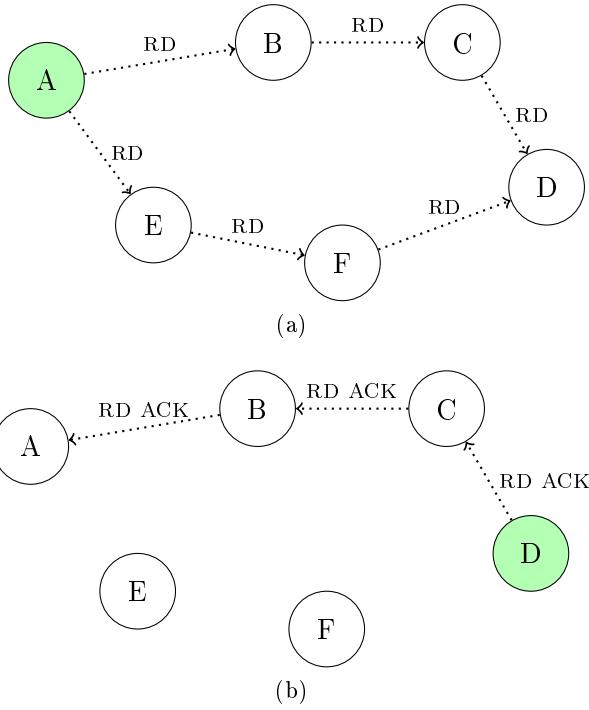


Fig. 3.14: Procedimiento de descubrimiento de ruta.

comenzar la comunicación. El diagrama de la Figura 3.15 muestra el intercambio de mensajes que se produce en la ruta seleccionada; se puede apreciar que a medida que se avanza en la comunicación, se van incrementando los costes relativos a la potencia de transmisión de cada salto y a la exposición acumulada en cada nodo, dando lugar a una analogía entre los costes P y K definidos en el algoritmo.

3.2.3.3. Notificación de cambio de coste

En esta sección se abordará la metodología que sigue el protocolo a la hora de notificar cambios en los costes de las rutas. Este aspecto se centrará en el coste correspondiente a la exposición acumulada en cada nodo, el cual presenta cierto dinamismo que no responde a ningún patrón establecido y, por consiguiente, tiene un comportamiento totalmente *asíncrono*.

La Figura 3.16 representa los pasos que se siguen ante un cambio de coste en una ruta establecida, y los valores de los campos más relevantes. En este caso, se supone que hay una ruta entre los nodos A y D; el nodo C, ante un cierto incremento en su exposición válida acumulada, necesita comunicar un cambio de coste, que afectará a toda la ruta entre A y D. Para ello enviará un mensaje *hello* donde indicará dicho cambio de coste. Los nodos B y D recibirán este *hello*; D, al ser el destino de la ruta y no tener entradas que tengan como siguiente salto a C, no realizará ninguna acción complementaria, por el contrario B sí posee rutas que involucran a C como siguiente salto, por lo que, procesará el mensaje, actualizando el coste en su tabla de rutas y creando un mensaje RBRP-REPORT con los destinos de las rutas afectadas. Finalmente, la comunicación de cambio en el coste llegará a A, que es el origen de la ruta, por lo que el mensaje RBRP-REPORT no será retransmitido; A lo procesará, iniciando un descubrimiento de ruta completo, con un número de secuencia superior al que tenía establecido,

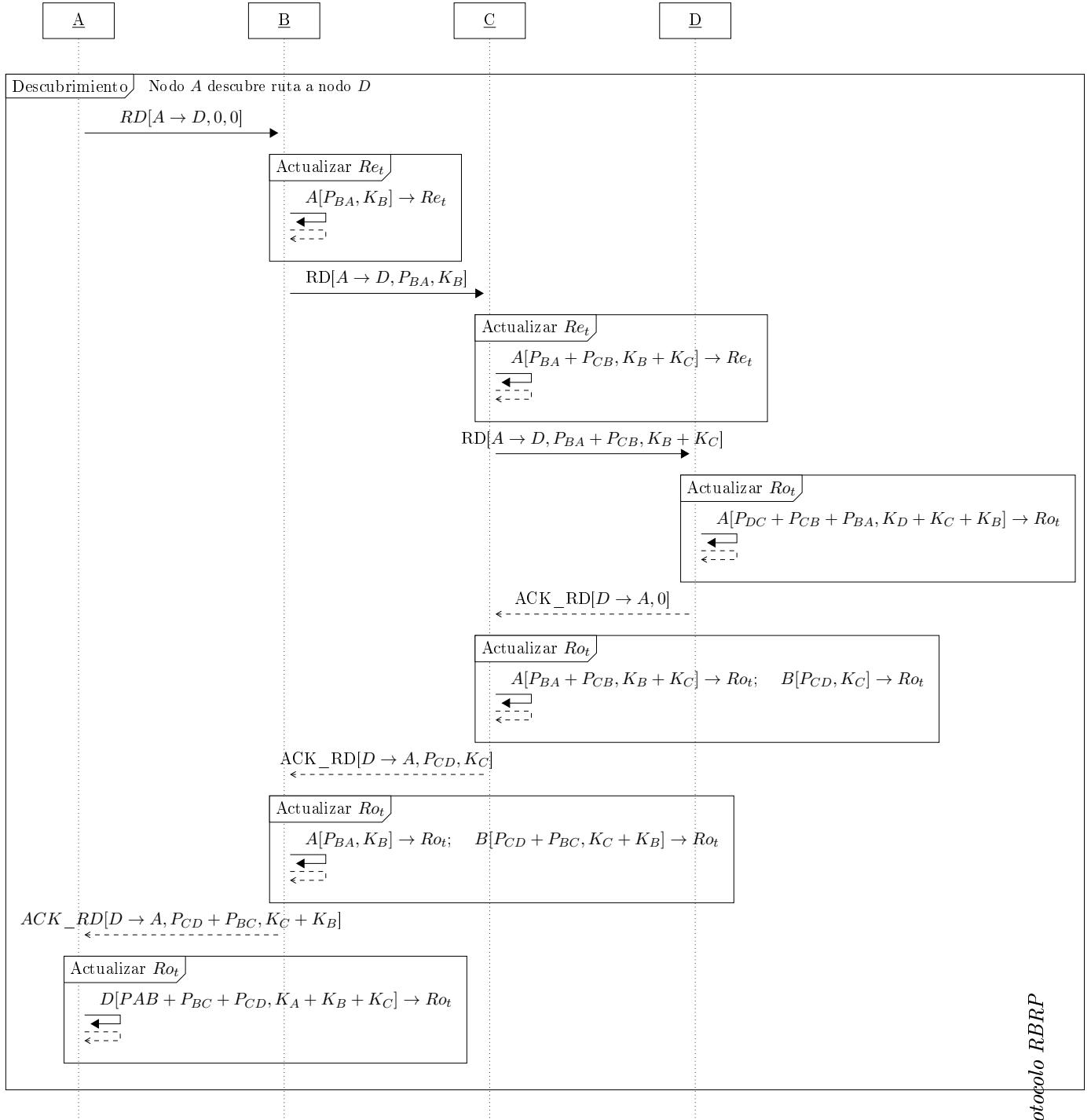


Fig. 3.15: Diagrama temporal descubrimiento de ruta.

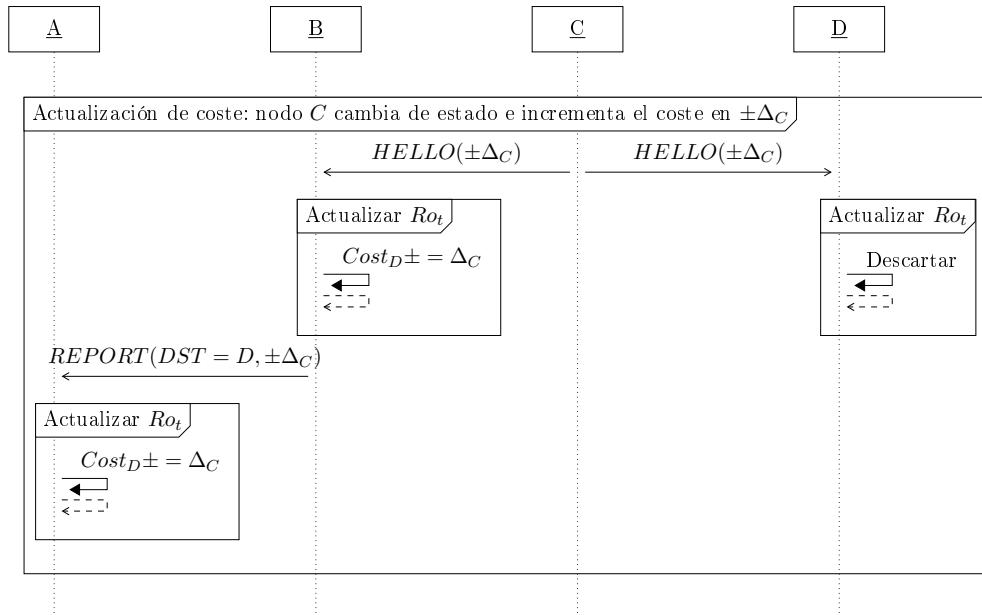


Fig. 3.16: Diagrama temporal cambio de coste.

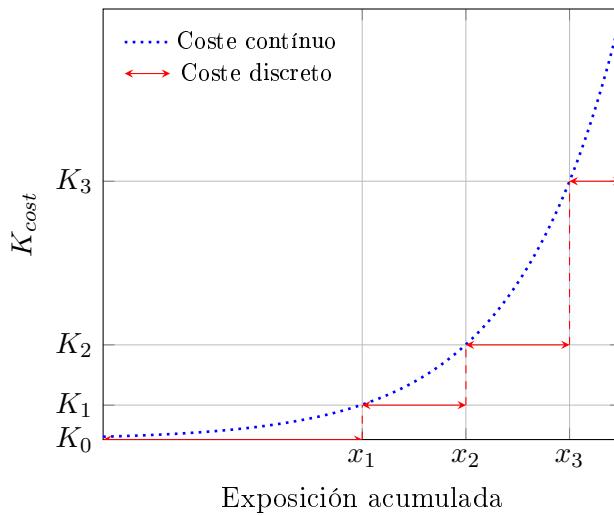


Fig. 3.17: Función de modelado del coste de exposición.

asegurando *frescura* en la información, dado que los nodos darán prioridad a esta información de costes, al tratarse de un número de secuencia superior. Con este nuevo descubrimiento se analizan nuevamente todas las posibles rutas para seleccionar la de menor coste, el cambio producido.

Otro punto a tener en cuenta y que se debe abordar, es la manera en la que se modela el coste correspondiente a la exposición acumulada en los nodos, K . Su valor es una función que dependerá de los paquetes enviados y la potencia de transmisión empleada en cada uno ellos. Para evitar que los nodos no saturen la red con mensajes de señalización se plantea una solución que presente una asignación de valores por intervalos. Por otro lado, se considera conveniente que esta solución disponga de un comportamiento que premie los nodos con menor exposición acumulada y, por contrario, penalice a los que presentan un valor mayor. Teniendo en cuenta estos aspectos, parece adecuado emplear una función exponencial para fijar los valores de cada uno de los intervalos.

En la Figura 3.17 se puede ver un ejemplo de modelado de esta función, en el eje de abscisas se sitúa la exposición acumulada, según la ecuación 3.3, que refleja el sumatorio de la potencia de transmisión de todos los paquetes que ha enviado un determinado nodo en una ventana de muestreo temporal, dividido por un determinado factor de escala. También se puede observar en la ecuación 3.4 el número de paquetes referente enviados por ventana temporal. Por otro lado, en el eje de ordenadas se sitúan los valores del coste de exposición, K ; en este ejemplo se establece 4 posibles niveles/valores de coste, que irán multiplicados por un factor de escala, α_K , para adecuarlos al peso de la potencia de transmisión, dado que como muestra la ecuación 3.5 se utiliza una combinación de ambos costes, y se desea modelar de tal manera que ninguno domine sobremanera al otro; se tiene en cuenta los costes de cada salto de la ruta, mientras que R representa el identificador del último salto antes de alcanzar el destino.

$$x = \sum \frac{P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{N-1} + P_N}{\text{Factor de escala}} \quad (3.3)$$

$$N = N^o \text{ paquetes } x \text{ ventana de muestreo} = \frac{\text{Rate} \cdot \text{tamaño ventana (segs)}}{\text{tamaño paquete}} \quad (3.4)$$

$$\text{Coste ruta} = (P_1 + P_2 + \dots + P_R) + [\alpha_K \cdot (K_1 + K_2 + \dots + K_R)] \quad (3.5)$$

Esta función atiende a los requerimientos marcados con anterioridad, dado que solo se provocará un cambio de coste y, por tanto, el envío de un mensaje RBRP-REPORT, cuando se produzca un cambio de nivel/escalón, reduciendo la señalización y con ello evitando un posible efecto negativo en términos de *throughput*. Por otro lado, ofrece un crecimiento menor para valores pequeños de exposición, siendo más rápido cuando la exposición empieza a ser considerable.

Como última indicación referente a este modelado, se incorpora una función de *envejecimiento* en la exposición, de manera que el protocolo presente un comportamiento similar a la casuística vista en la sección 2.4.2, correspondiente al algoritmo. Esto es, si durante la ventana de muestro temporal no se envía ningún paquete de datos, la exposición acumulada sufrirá un decremento marcado por una determinada variable configurable.

Teniendo en cuenta el número de variables que entran en juego (Rate, tamaño de paquete,) es complicado obtener unos valores genéricos para todas, que dependerán en cada caso del escenario con el que se esté trabajando. Posteriormente, en la sección 3.3 de este trabajo se asignarán unos valores concretos a estas variables.

3.2.4. Lógica

A continuación se realizará una explicación de la lógica que siguen algunas de las funcionalidades principales de este protocolo. Para ello, se procederá a la elaboración de varios diagramas de flujo, resaltando las características más importantes de los mismos.

3.2.4.1. Lógica descubrimiento de vecinos

Como se ha comentado en secciones anteriores, el envío de mensajes de *hello* se realiza de manera periódica, entre otras cosas para que los nodos conozcan sus vecinos. En esta sección se visualizará el procedimiento que se sigue a la hora de

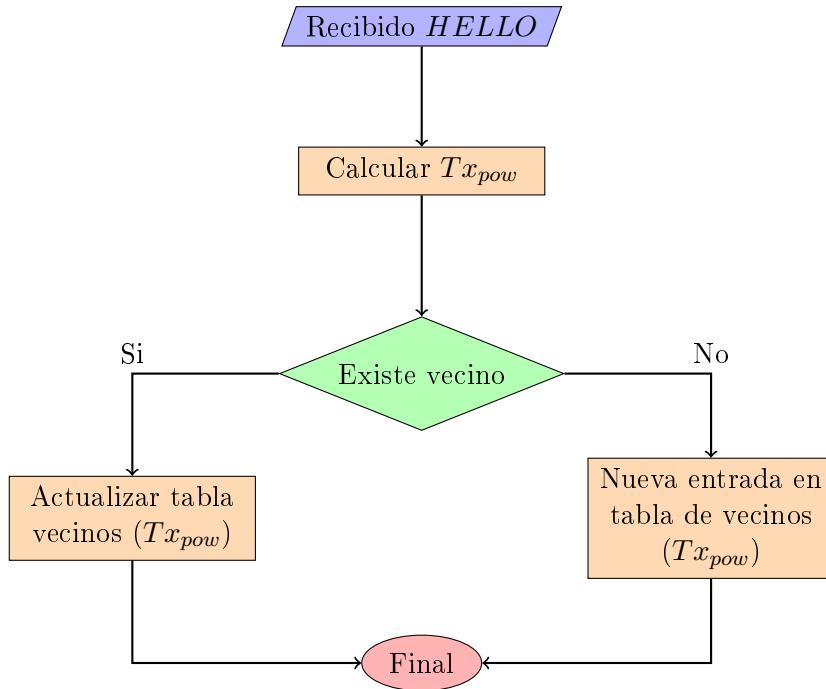


Fig. 3.18: Diagrama de flujo para la recepción de *hello*

la recepción de dichos mensajes, excluyendo el caso de mensajes *hello* de cambio de coste, que serán tratados más adelante.

El diagrama de flujo que recoge la Figura 3.18 evidencia las consideraciones más importantes que tienen lugar. Como se vio en secciones anteriores, los mensajes de *hello* juegan un papel importante a la hora de realizar el control de potencia en los paquetes de datos. El primer elemento que aparece es el procesado de la potencia con la que se reciben estos paquetes que, gracias al entrenamiento previo, lo usa para determinar la potencia de transmisión con la que deben ser enviados los paquetes de datos que tengan como destino el vecino que ha enviado este *hello*. Esta potencia de transmisión será almacenada en la tabla de vecinos, y también será usada para establecer la métrica en los descubrimientos de ruta que se verán posteriormente.

3.2.4.2. Lógica descubrimiento de ruta

En el diagrama de flujo de la Figura 3.19, se pueden observar los pasos seguidos por un nodo que pretende enviar un paquete de datos hacia un determinado destino. Las diferentes fases son lo suficientemente claras, por lo que no es necesario describirlas de manera exhaustiva. Cabe destacar que los paquetes son almacenados en una cache hasta se consigue establecer una ruta válida o, por el contrario, son descartados por la imposibilidad de encontrar un camino viable.

Continuando con la secuencia de acontecimientos que ocurren durante el descubrimiento de ruta, el diagrama de flujo de la Figura 3.20, muestra el procedimiento que se sigue cuando un nodo recibe un mensaje de descubrimiento de ruta. Cabe reseñar que a medida que el mensaje de descubrimiento va siendo procesado por los nodos, estos aprovechan para guardar la ruta inversa al flujo de datos, consiguiendo así que, una vez se reciba posteriormente la confirmación, los nodos dispongan de las rutas correspondientes a ambos sentidos de

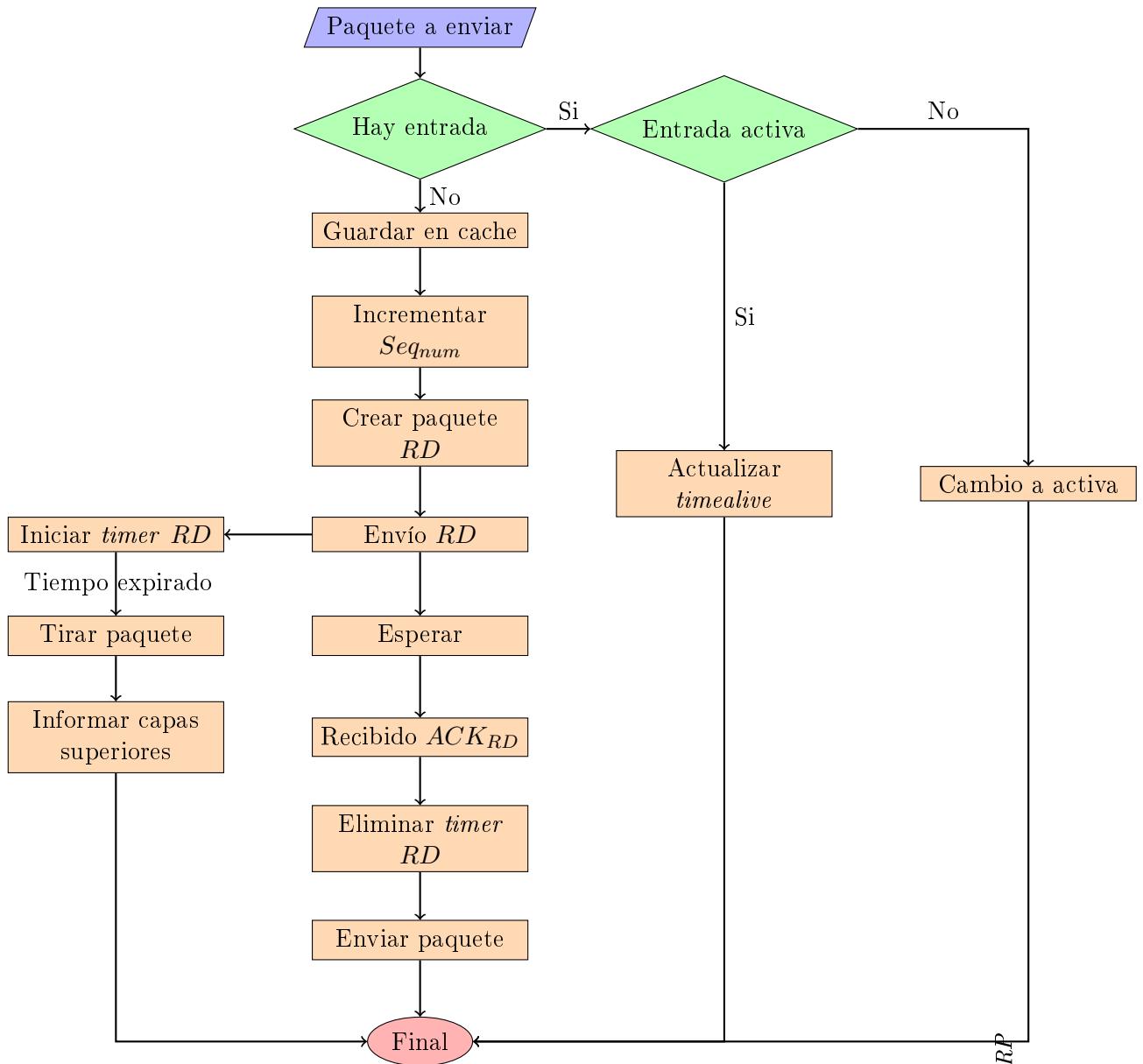


Fig. 3.19: Diagrama de flujo para el inicio del descubrimiento de ruta

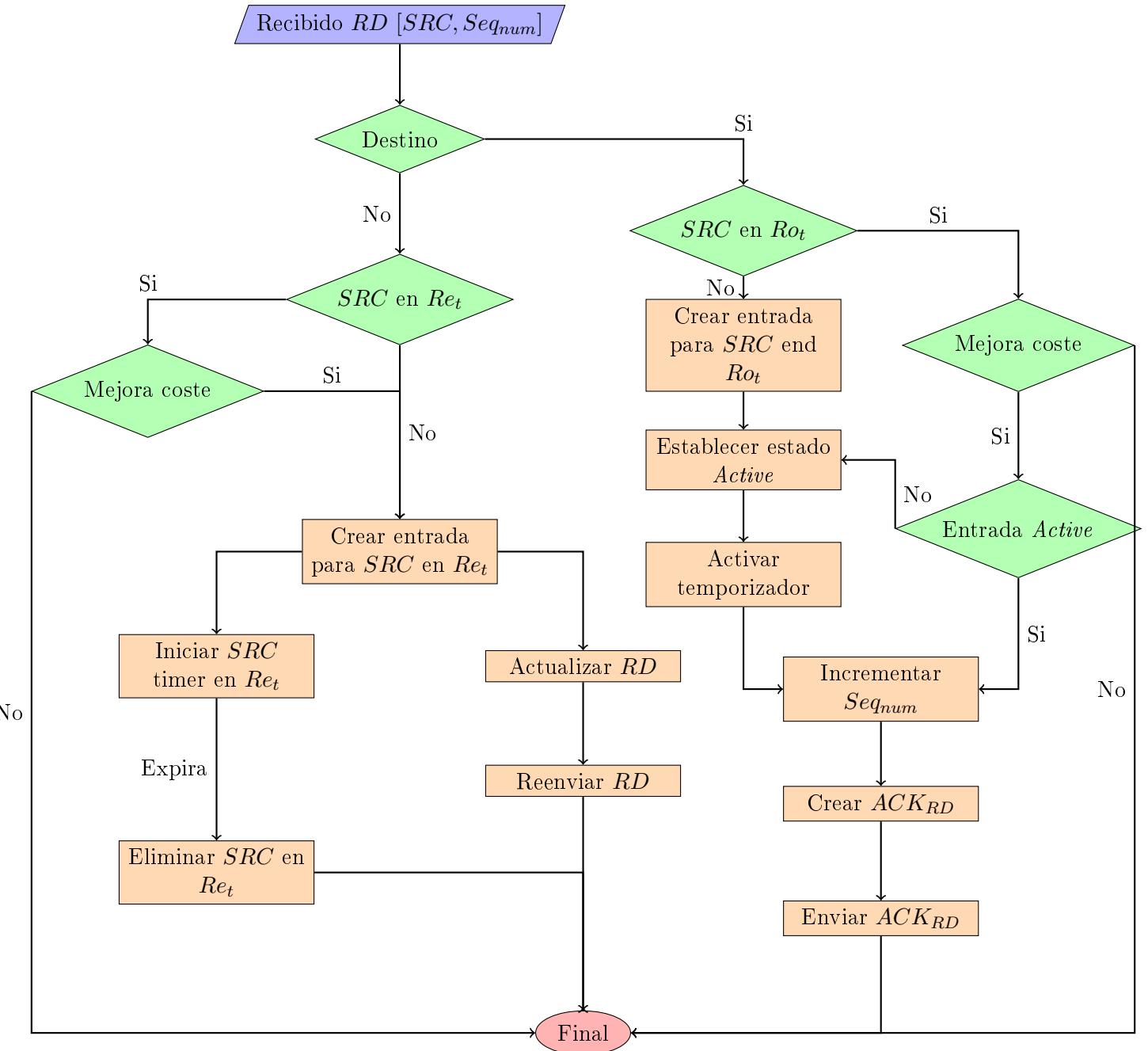


Fig. 3.20: Diagrama de flujo para la recepción de un descubrimiento de ruta

la comunicación. Así se evita lanzar un descubrimiento nuevamente en sentido contrario, facilitando además el uso de protocolos que necesiten confirmación en las comunicaciones, como puede ser el protocolo *TCP*.

Dentro de esta sección por último se debe abordar finalmente el procesado por parte de los nodos de los mensajes de confirmación de ruta recogido en el diagrama de flujo de la Figura 3.21. Cada uno de los nodos van actualizando las entradas en su tabla de rutas hasta llegar al origen inicial del descubrimiento que, en ese momento y si el procedimiento ha sido satisfactorio, ya estará en disposición de comenzar el envío de los paquetes de datos que mantiene en caché.

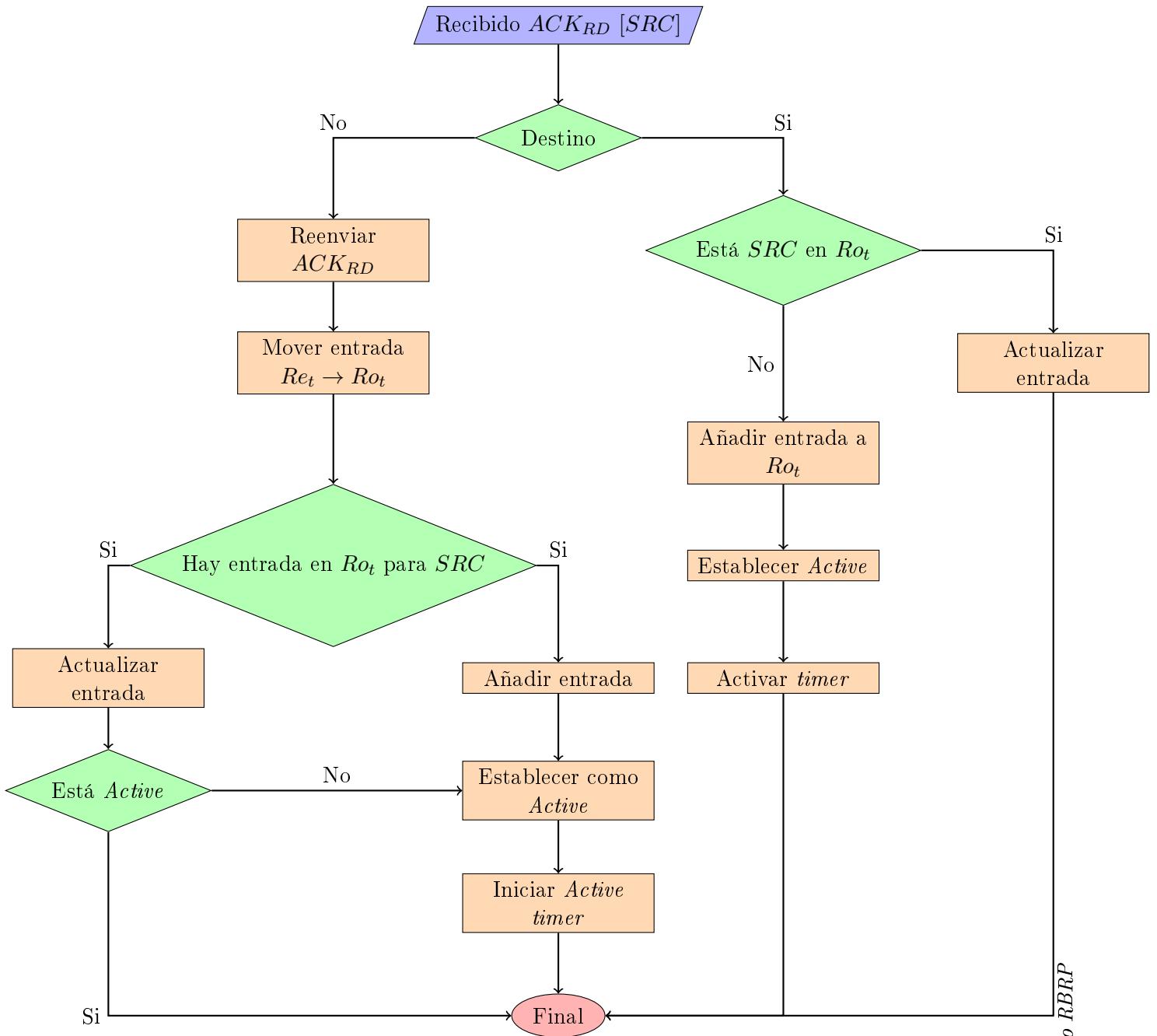


Fig. 3.21: Diagrama de flujo para la recepción de confirmación de ruta

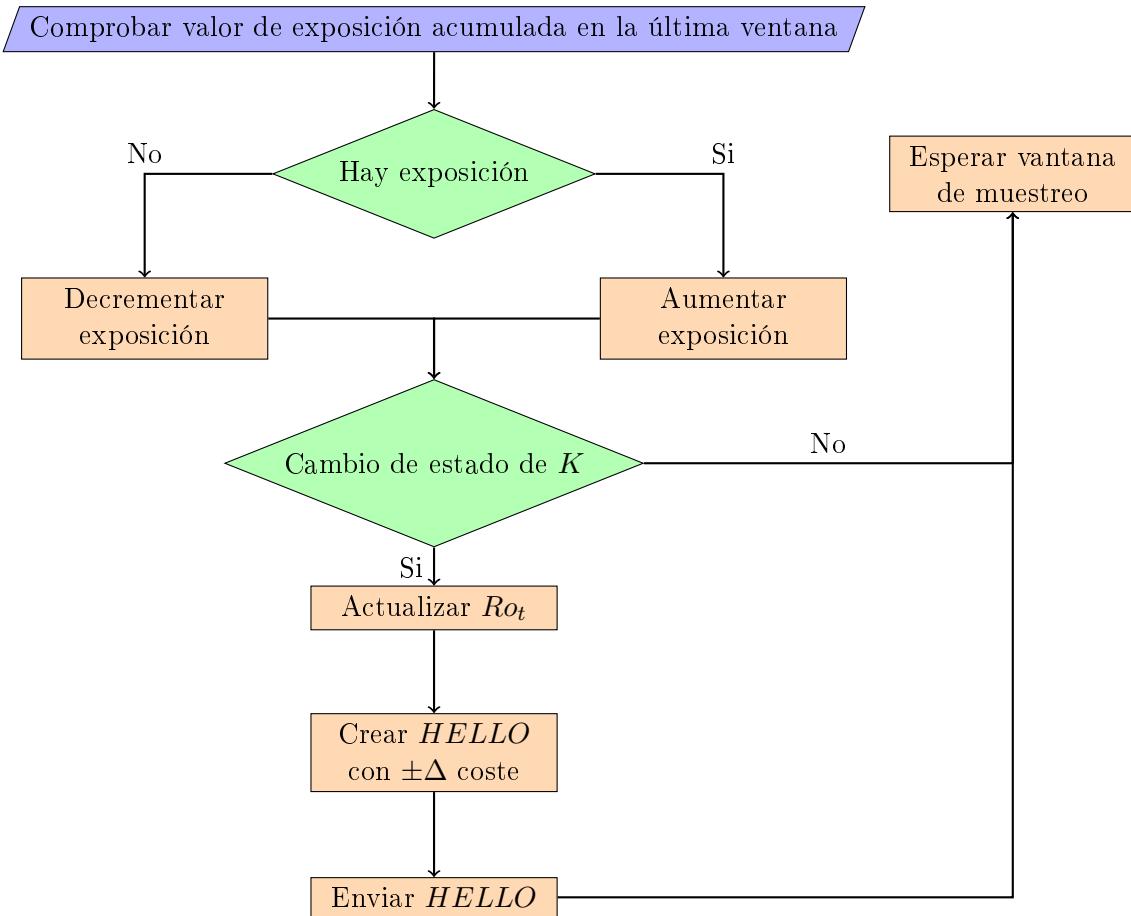


Fig. 3.22: Diagrama de flujo para inicio de cambio de coste

3.2.4.3. Notificación de cambio de coste

Siguiendo con las funcionalidades de este protocolo, el diagrama de flujo de la Figura 3.22 muestra el procedimiento utilizado para notificar un cambio de coste, en términos de exposición acumulada, por parte de cualquier nodo integrante de la red. En él se observa como se trata de una operación cíclica, que se repite cada cierto intervalo de tiempo, coincidiendo con una ventana temporal programable en la implementación. Resaltar que un nodo ante un cambio de coste, realizará una actualización de todos los costes en cada uno de los caminos establecidos en su tabla de rutas antes de notificar el cambio, pues se ven alterados ante la nueva situación.

La siguiente fase dentro de esta funcionalidad es la que refleja la Figura 3.23, donde se puede ver el procesado de un mensaje de *hello* que contiene una modificación de coste y que, por consiguiente, es tratado de manera diferente que los *hellos* usados únicamente para el descubrimiento de vecinos. Cabe resaltar la decisión de propagación o no del mensaje informando del cambio de coste, que atiende al hecho de que el nodo que envía el mensaje sea el destino final de la ruta; en caso afirmativo no propagaría el mensaje, pues un reporte de cambio en el coste de exposición en el destino final no afecta a la ruta.

Por último queda observar en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.24, el procesado de un mensaje de notificación de cambio de coste. Se buscarán, dentro de la tabla de rutas, todos los destinos afectos por este cambio y que

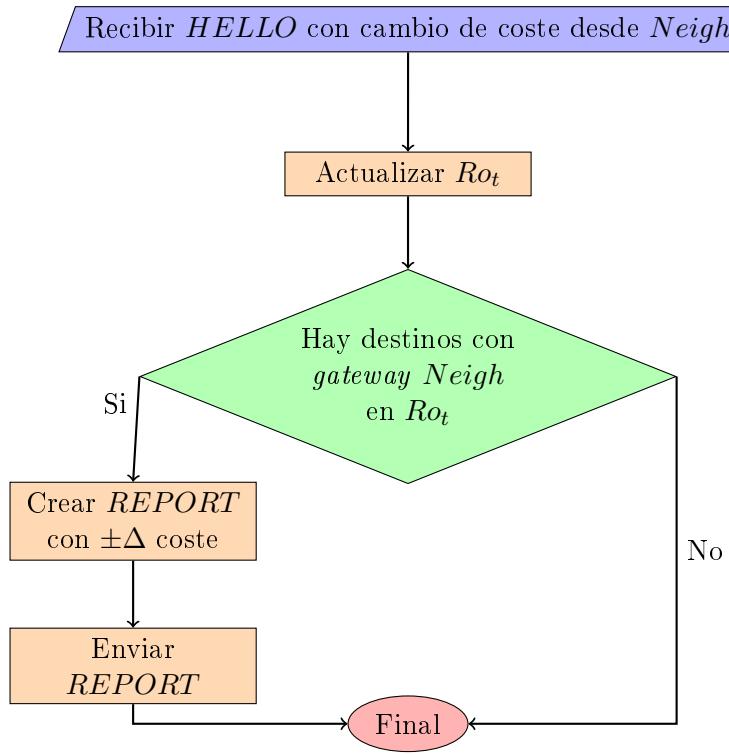


Fig. 3.23: Diagrama de flujo para recepción *hello* cambio de coste

a su vez tienen como siguiente salto el nodo que envía el reporte de cambio, con la finalidad de actualizar los costes y decidir si el mensaje tiene que ser propagado. Por otro lado, una vez que se consiga alcanzar la fuente de información original, esta lanzará de nuevo un descubrimiento de ruta, con la finalidad de descubrir el nuevo coste de todas las rutas posibles. Dentro de esta funcionalidad destaca la inclusión de un retardo artificial en el comienzo del nuevo descubrimiento, pues en esa ventana temporal, la fuente de información no generará nuevos descubrimientos. Esto pretende ofrecer un protocolo más eficiente, en el que pueda darse el caso que una fuente de información reciba muchos reportes de cambio de coste, en un intervalo de tiempo pequeño, lo que provocaría el envío sucesivos de descubrimientos de ruta, con la consiguiente disminución del rendimiento.

3.3. Simulación

De manera similar a como se realizó en el Capítulo 2, se llevarán a cabo, con diferentes configuraciones, una serie de simulaciones sobre escenarios de mayor complejidad, utilizando para ello el simulador NS-3.

El análisis de esta sección está basado en dos fases: La primera de ellas orientada a comparar el comportamiento del algoritmo y del protocolo sobre el mismo escenario, con la finalidad de observar la correlación entre ambos, dado que uno de los objetivos será conseguir que se parezcan lo más posible. Posteriormente, se comparará el protocolo con otras alternativas, que emplean diferentes métricas. El protocolo AODV, tradicionalmente usado en redes MANET, y que establece una métrica basada en el número de saltos. Con ello, se establecerán una serie de resultados en términos de reducción de la exposición acumulada,

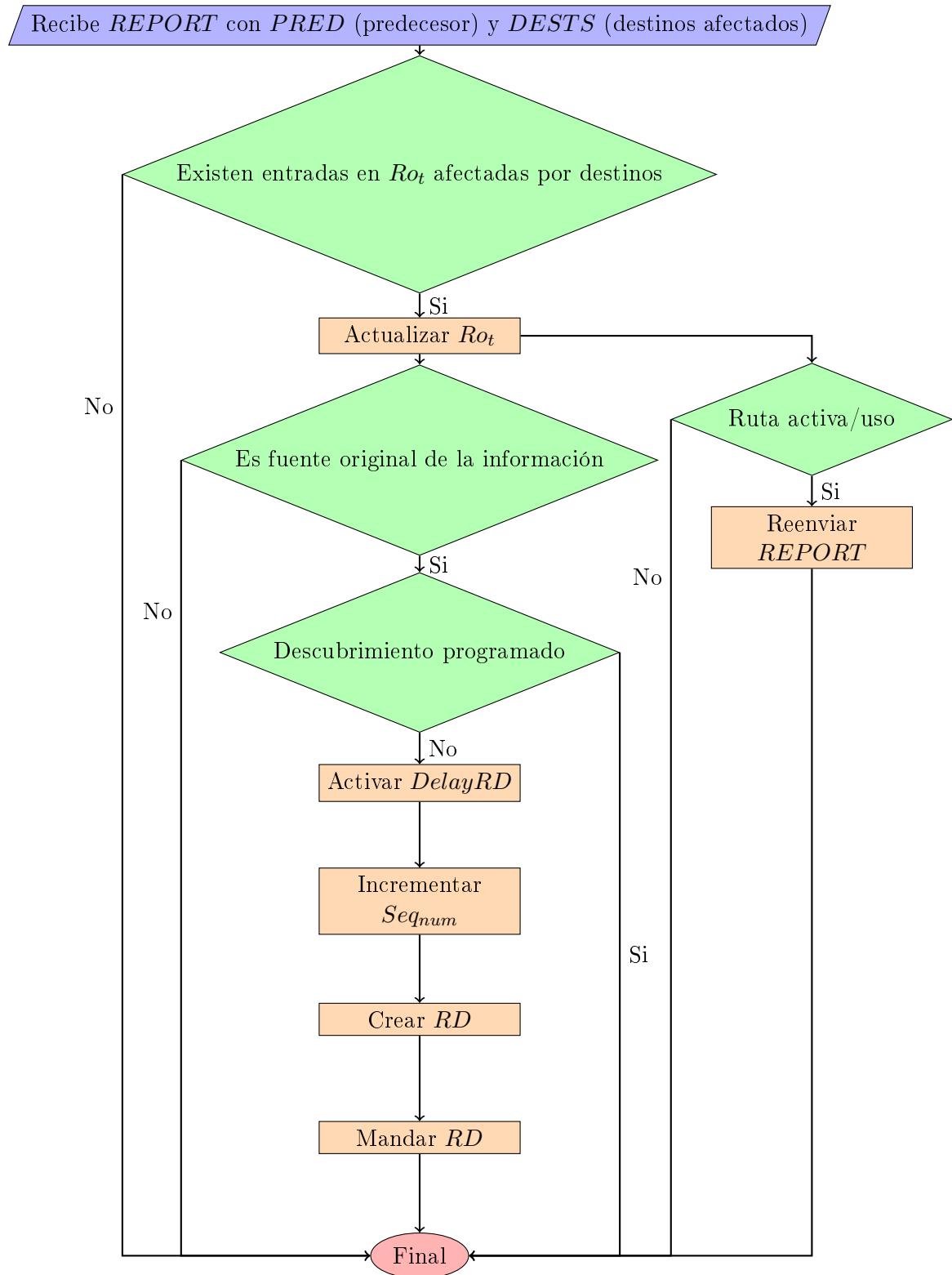


Fig. 3.24: Diagrama de flujo para recepción cambio de coste

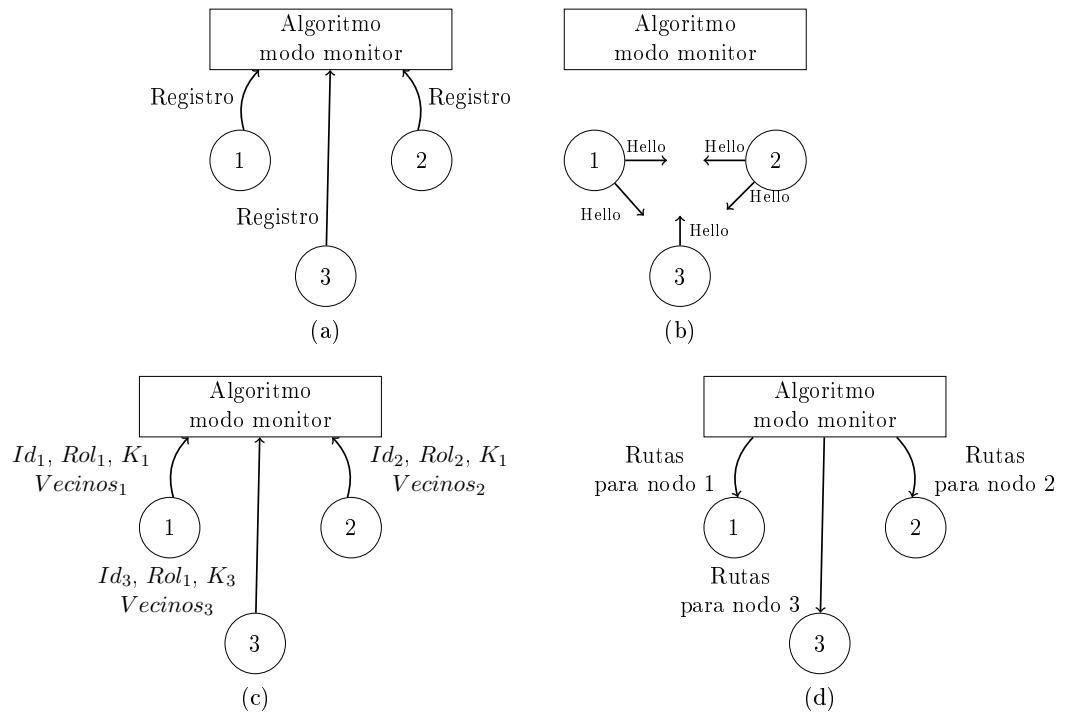


Fig. 3.25: Algoritmo en modo monitor

principal objetivo a conseguir en este proyecto.

3.3.1. Algoritmo Vs. RBRP

Como se ha indicado anteriormente, en primer lugar se van a comparar los resultados obtenidos sobre un mismo escenario, utilizando el algoritmo y el protocolo aquí presentado.

En referencia al algoritmo cabe realizar una breve introducción de la operativa en lo que a simulación se refiere. Para empezar, se plantea un escenario en el que los nodos usarán como soporte para el enrutamiento al propio algoritmo; esto es, una vez creados los nodos, procederán a registrarse en el algoritmo, que actuará a modo de unidad central gestora de la red. Una vez hecho esto, se procede a un descubrimiento de vecinos, similar al que realiza el protocolo con los mensajes *Hello*. Después de un cierto retardo, programado para otorgar cierto margen de seguridad, de manera que los mensajes de descubrimiento de vecinos sean propagados, se comenzará la ejecución del algoritmo propiamente dicha, estando ya los nodos en disposición de otorgar toda la información que el algoritmo necesita: Los roles que estos desempeñan en la red, su exposición acumulada (K) y sus vecinos con los costes de potencia de transmisión asignados (P), para que pueda ejecutar los pasos comentados en el capítulo referente al algoritmo.

Esta ejecución se repetirá de manera *cíclica*, asignando en este caso una ventana temporal de 5 *segs* (la Figura 3.25 representa los pasos comentados, ordenados cronológicamente para una sencilla red con 3 nodos). Finalmente, en cada ejecución el algoritmo indicará a cada nodo la ruta que debe seguir para enviar tráfico en la red, de manera que cada uno de ellos introduzca en su tabla de rutas la información necesaria.

Tabla 3.5: Configuración escenario para algoritmo y protocolo

Parámetro	
WIFI	802.11b
Rate	140 Kbps
Tamaño paquete	1472 bytes
Área	600 x 600m ²

En lo que se refiere al protocolo, hará uso de todas las herramientas presentadas a lo largo de este capítulo para la realización del enrutamiento. Como se hizo para el algoritmo, se programará una ventana temporal de 5 *segs* que se repetirá de manera *cíclica*, para comprobar si deben o no, ser enviados los RBRP-REPORT que informen de cambios de coste.

Los aspectos generales de configuración para ambos escenarios son los mostrados en la Tabla 3.5; estos parámetros servirán de base para el cálculo de diversos valores, como se verá a continuación.

Otro punto a tener en cuenta, que ya se introdujo en la Sección 3.2.3.3, es el modelado de la función referente al coste de exposición acumulada. Como se vio entonces resulta complicado asignar valores, dada la multitud de variables presentes, pero ahora al considerar un caso específico ya se está en disposición de hacerlo. Recordando las ecuaciones 3.3 y 3.4, ya se puede calcular el factor de escala necesario. Se supone que se pretende modelar la función en el caso más pesimista, donde la potencia de transmisión en cada enlace es la máxima, 16 dBm = 39.81mW. Así, se puede definir el paso máximo que se puede dar en cada ventana temporal en términos de exposición (aumento en el valor del eje de abscisas), ver ecuación 3.6. Extrapolando esta fórmula a la ecuación 3.3 y, concretamente a un único valor del sumatorio (muestreo de una sola ventana temporal), la expresión resultante queda reflejada en 3.7. En ella, se puede despejar fácilmente el valor de *escala*, y dejándolo en función del paso máximo que se deseé, que determinará la velocidad con la crece el coste asignado a la exposición, *K*. En este caso se cree oportuno otorgar un valor de 6, con lo que la ecuación 3.8 muestra el calculo completo.

$$\max(paso) = \frac{Rate \cdot tamaño\ ventana\ (segs)}{tamaño\ paquete} \cdot P_{max} \quad (3.6)$$

$$\max(paso) = \frac{Rate \cdot tamaño\ ventana\ (segs)}{tamaño\ paquete} \cdot P_{max} \cdot \frac{1}{Factor\ de\ escala} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} Factor\ de\ escala &= \frac{Rate \cdot tamaño\ ventana\ (segs)}{tamaño\ paquete} \cdot P_{max} \cdot \frac{1}{\max(paso)} \\ &= \frac{140 \cdot 10^3 \cdot 5}{1472 \cdot 8} \cdot 39.81 \cdot \frac{1}{6} = 394.40 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Habiendo determinado ya este factor, el siguiente paso es definir α_K , que ya fue introducido en la ecuación 3.5, dado que el coste asignado a la exposición debe ser modelado para que no tenga un peso muy superior al correspondiente a *P*. Se parte de fijar los costes de *P*, que oscilarán entre -1 dBm a 16 dBm, lo que se traduce en un coste de 0.79 mW a 39.81 mW, como se vio en la caracterización de escenarios (sección 3.1.1.1). Se parte nuevamente del caso más pesimista, en

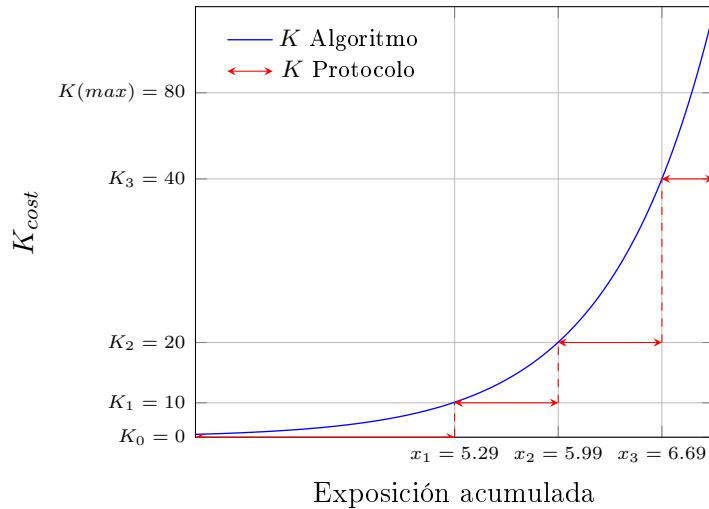


Fig. 3.26: Modelado de coste K

el que P toma un valor de $39.81 \approx 40 \text{ mW}$, por lo que parece adecuado modelar K con un coste máximo de 40, para que sus pesos sean equivalentes; por tanto, se definen los costes de K para cada uno de los 4 niveles: $K_0 = 0$, $K_1 = 10$, $K_2 = 20$ y $K_3 = 40$. Teniendo en cuenta que la función de modelado es de $\exp(x)$, la expresión para este cálculo se refleja en la ecuación 3.9, en la que se despeja el valor de x . Como siguiente paso se elige un valor para α_K , en este caso $\frac{1}{20} = 0.05$, lo que permite calcular cada uno de los valores de x_n , que marcarán los umbrales para cada uno de los niveles que modelan la función de coste para el protocolo que resume, la ecuación 3.10, que establece además el valor máximo que puede tomar x , para que la función no crezca indefinidamente, asumiendo $K_{max} = 80$.

$$K_n = \alpha_K \cdot \exp(x_n) \rightarrow x_n = \ln\left(\frac{K_n}{\alpha_K}\right) \rightarrow x_n = \ln(K_n) - \ln(\alpha_K) \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} x_1 &= \ln(10) - \ln(0.05) = 5.29 \\ x_2 &= \ln(20) - \ln(0.05) = 5.99 \\ x_3 &= \ln(40) - \ln(0.05) = 6.69 \\ \max(x) &= \ln(80) - \ln(0.05) = 7.38 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Una vez definidos todos estos parámetros, la función que modela el coste de exposición, K , ya puede definirse completamente. La Figura 3.26 ofrece una representación gráfica, donde cabe reseñar que el coste del algoritmo queda definido como una función continua, y el del protocolo como una escalón, evitando así incrementar innecesariamente la señalización del protocolo, dado que solo reportará cambio de costes ante el cambio de valor K . Por su parte, el algoritmo no presenta esta problemática, dado que se trata de una herramienta *Offline*, que no altera las características de comunicación y, por lo tanto, no requiere tráfico extra de señalización.

Cabe indicar que se introduce un valor configurable que marca el paso de decrecimiento de la exposición acumulada en cada nodo, al que se le asigna un valor de 0.5. Así, los nodos que no son utilizados para la comunicación dentro de cada ventana temporal reducirán su exposición (x_n) en dicho valor, situando el

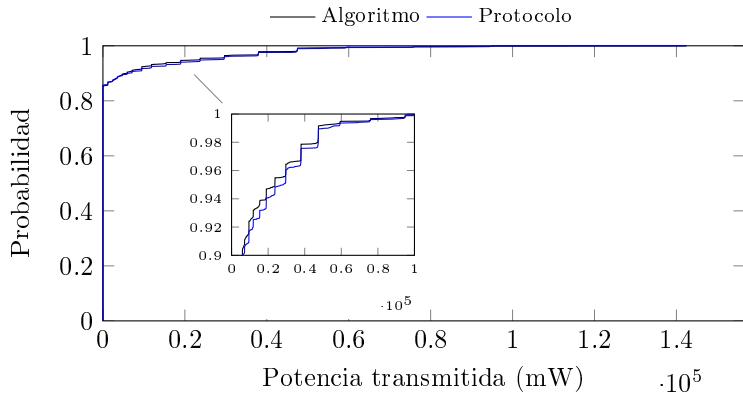


Fig. 3.27: Comparación CDF potencia transmitida, Algoritmo y protocolo

valor mínimo en 0. De esta manera se introduce una función de *envejecimiento*, como se planteó en casos anteriores, que fije la velocidad con la que decrece el coste K .

En referencia a la configuración del escenario propiamente dicha, se plantea un escenario con 58 nodos, 4 desempeñarán un rol de fuente de información, otros 4 serán *gateways* o posibles destinos y, por lo tanto, los restantes 50 actuarán como posibles nodos intermedios; cada nodo dispondrá de un radio de cobertura de 55 m. La localización será aleatoria para las fuentes y nodos intermedios, mientras que los *gateway* se dispondrán según una rejilla, de tal forma que cubran el mayor área posible. Se realizarán 100 simulaciones, durando cada una de ellas 120 segs., en las que se generará un flujo de datos continuo durante 100 segs.

A continuación se procede a un análisis de los resultados obtenidos por ambas simulaciones, comparando su comportamiento. La Figura 3.27 muestra las dos CDFs de la exposición acumulada en cada nodo para los dos casos; se puede apreciar que su comportamiento es prácticamente idéntico, presentando una diferencia que se sitúa en valores menores al 1 %, lo que valida el comportamiento del protocolo, dado que su finalidad es mimetizar el enfoque teórico ofrecido por el algoritmo. También se puede observar que este presenta un comportamiento ligeramente superior en términos de repartir la exposición en el escenario. Esto atiende a que el coste K del algoritmo se modela mediante una función continua, pudiendo trabajar con más valores de K , mientras que el protocolo solo tiene establecidos 4, que son los correspondientes a cada uno de los niveles, K_n .

En la Figura 3.28, se observan las CDFs del número de nodos activos en cada simulación; al igual que antes se puede observar que el algoritmo presenta una probabilidad ligeramente mayor para utilizar más nodos intermedios. La diferencia entre ambas configuraciones se sitúa en valores cercanas al 3 %, lo cual vuelve a poner de manifiesto un comportamiento muy similar.

3.3.2. RBRP Vs. AODV

En esta sección se abordará el análisis desde otro enfoque, comparando el protocolo aquí presentado, con otro que haga uso de una métrica más tradicional, como es el número de saltos, AODV.

Para ello se plantea un escenario con 108 nodos, de los cuales 100 actuarán como intermedios y, como en el caso anterior, 4 tomarán el rol de *gateways* o posibles destinos, mientras que los 4 restantes serán las fuentes de información.

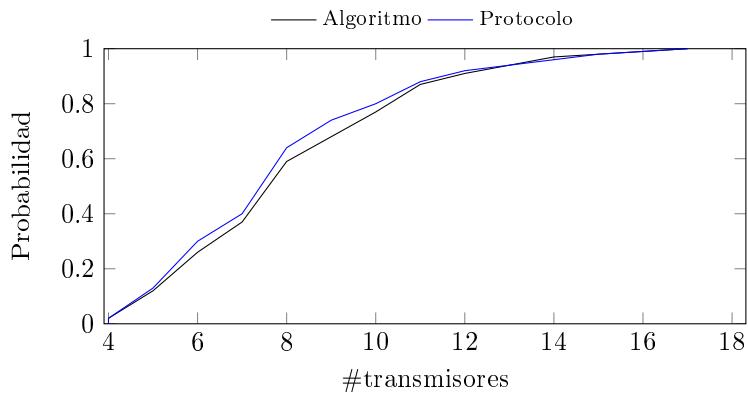


Fig. 3.28: Comparación CDF número de nodos usados por simulación, Algoritmo y protocolo

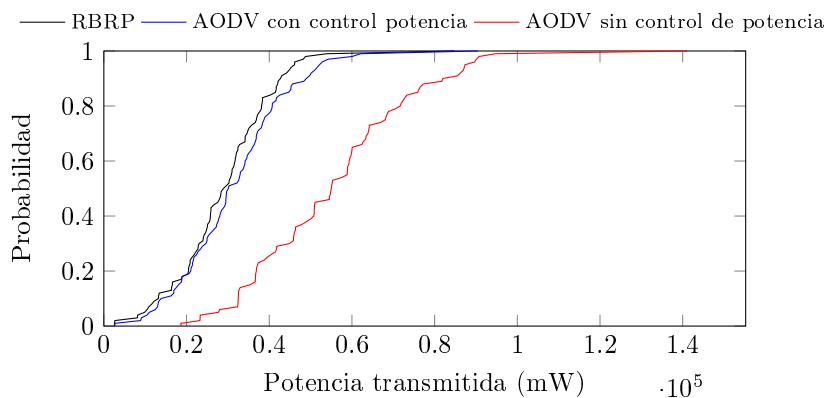


Fig. 3.29: Comparación CDF potencia de transmisión varios protocolos

Tanto los nodos intermedios como fuentes se distribuirán por todo el escenario de manera aleatoria, y los *gateway* se desplegarán en forma de rejilla para que cubran el máximo área.

Los parámetros generales son idénticos a los recogidos en la Tabla 3.5, y se vuelve a fijar la duración de cada simulación en 120 *segs*, y la del flujo de datos en 100 *segs*. Por último, el modelado del coste K también se realiza de manera similar al caso anterior, asignando para cada una de las variables los mismos valores.

La simulación constará de tres fases, que serán comparadas entre ellas: la primera corresponderá con el uso como protocolo de enrutamiento de la solución presentada en este trabajo, RBRP; posteriormente se usará un protocolo basado en un criterio que busca minimizar el número de saltos en ambos casos usando el ajuste dinámico de potencia de transmisión. Por último, se analizará el comportamiento de una solución tradicional, en la que no se incluye control de potencia, y la métrica se establece en función del número de saltos.

Una vez se realiza la simulación, la Figura 3.29 muestra las CDFs de la exposición acumulada por nodo expresadas en potencia de transmisión. En ellas se puede observar que el mejor comportamiento se corresponde con el protocolo RBRP, lográndose una mejora cercana al 10 % cuando se compara con una métrica basada en número de saltos y valores de mejora alrededor del 50 % cuando se compara con una solución tradicional, que no disponga del control dinámico

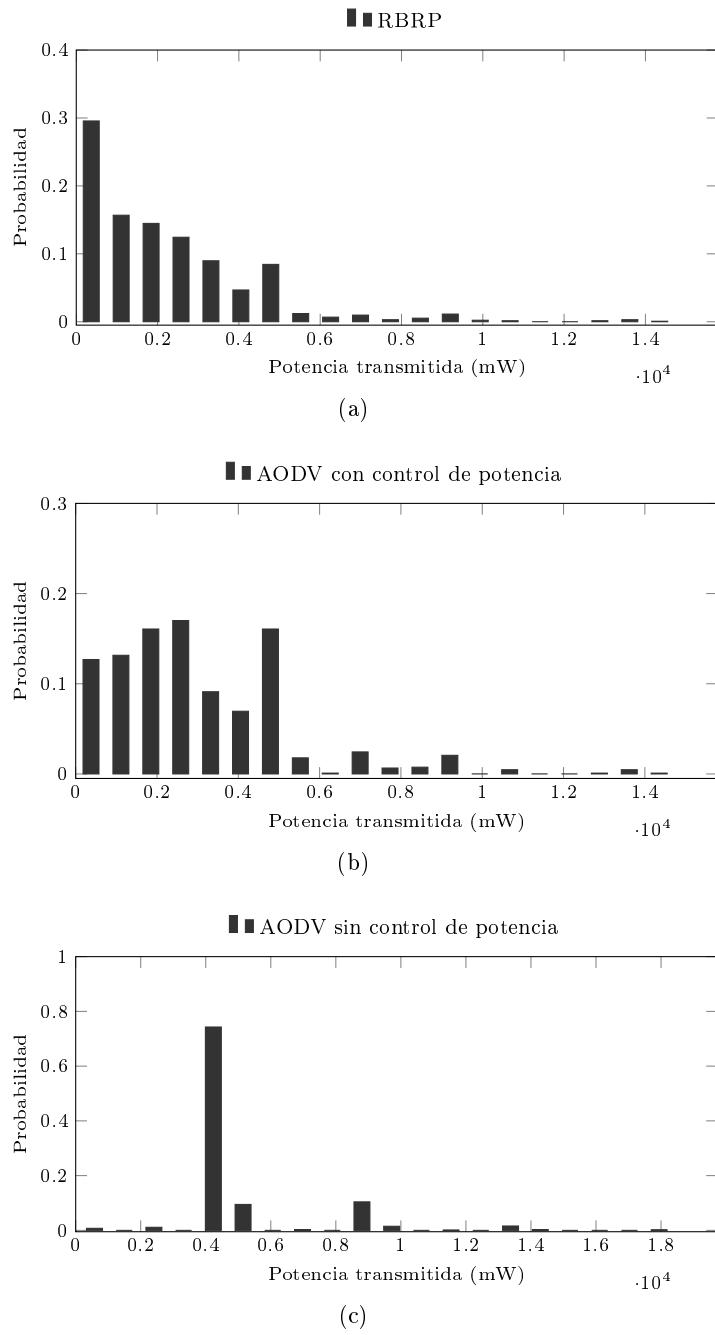


Fig. 3.30: Comparación PDF potencia de transmisión varios protocolos

de potencia.

Lo mismo se puede apreciar en las PDFs de cada una de las soluciones, que se muestran en la Figura 3.30. Además se pone de manifiesto que el protocolo RBRP consigue como efecto positivo *homogeneizar* los valores de exposición entre los diferentes nodos, con valores menores que las otras alternativas, lo cual fue uno de los objetivos definidos a la hora de plantear el protocolo.

Por último, y con el objetivo de visualizar con más claridad estos aspectos, la Figura 3.31 muestra *mapas de calor* de la exposición en cada uno de los nodos distribuidos por el área que forma el escenario para un experimento concreto. En ellos se puede ver como la solución en la que no se tiene en cuenta el control dinámico de potencia, presenta numerosas zonas *calientes*, con valores más elevados que las otras soluciones. Como era de esperar el mejor resultado le sigue ofreciendo el protocolo RBRP, demostrando una vez más los beneficios de las propuestas desarrolladas.

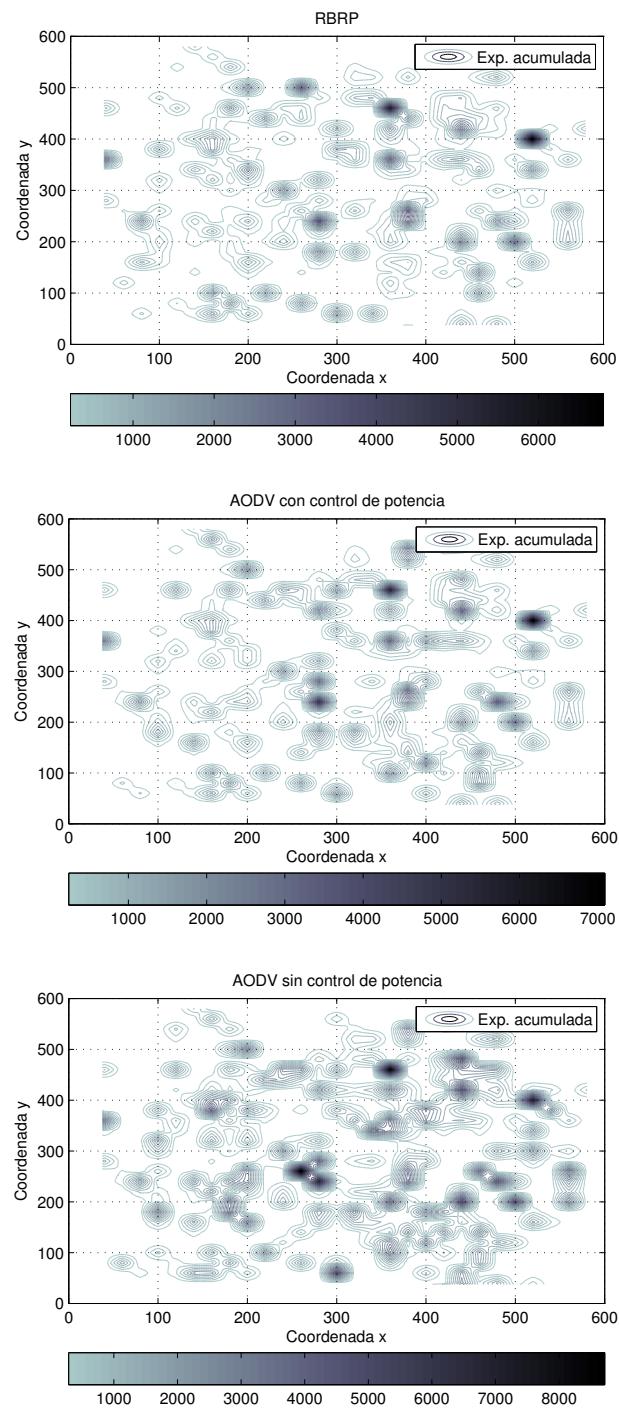


Fig. 3.31: Mapa de calor exposición varios protocolos

Conclusiones finales

Una de las consecuencias de la cada vez mayor presencia de las redes de comunicaciones móviles es la creciente preocupación de los usuarios por la exposición a los campos electromagnéticos que generan. Este es un aspecto al que todavía no se le ha dado mucha importancia, pero parece razonable pensar que sería interesante incluir este parámetro en el diseño de algoritmos, técnicas y protocolos a utilizar sobre redes inalámbricas. Este es uno de los principales objetivos del proyecto europeo LEXNET y en este trabajo se ha presentado una de las líneas de investigación que se han seguido en el mismo, en concreto para mejorar el comportamiento sobre redes inalámbricas multi-salto.

Como se ha visto a lo largo de este documento, se ha desarrollado una solución partiendo de unos objetivos concretos, que coinciden con algunos de los establecidos en el marco del proyecto LEXNET, dentro del cual se encuadra la realización de este trabajo.

Inicialmente se ha presentado un algoritmo que combina una optimización en términos de potencia de transmisión y exposición acumulada. Para ello, se ha realizado previamente una caracterización de los escenarios con los que se iba a trabajar, definiendo una serie de parámetros a tener en cuenta, como son los costes P y K , para posteriormente concretar los objetivos buscados con esta implementación. A continuación, se ha planteado una transformación del grafo original, incorporando una serie de nodos virtuales, que permiten tener en cuenta el criterio que minimiza la exposición acumulada. El algoritmo propuesto parte de un problema MCF, y se basa inicialmente en una solución CCA, a lo que se le plantea una serie de modificaciones mediante los análisis que se han llevado a cabo; la creación de una fuente y destino virtuales para la adecuación del problema a las redes con las que se desea trabajar.

Seguidamente se ha presentado una descripción de la implementación realizada, empleando el lenguaje de programación C++.

Finalmente se ha procedido al análisis del comportamiento del mismo, en comparación con soluciones más convencionales, que buscan caminos de coste mínimo, en base a la potencia de transmisión. El primer análisis, sobre una topología estática, ofrece unos resultados esperanzadores, con mejoras alrededor del 30% en términos de exposición, presentando un mejor comportamiento a medida que se trabaja con redes de mayor densidad. Además, se observa que la penali-

zación en términos de potencia de transmisión es despreciable. Posteriormente se analiza un escenario dinámico, en el que los nodos fuente pueden variar sus roles, y en el que además se introduce una función de *envejecimiento* que, en la exposición acumulada; se observó como los resultados seguían siendo mejores y además, esta mejoría era más acentuada cuando la relación entre el *envejecimiento* y el crecimiento de exposición era similar. Todos estos datos no hacen otra cosa que corroborar que se cumplen los objetivos buscados en el diseño del algoritmo.

El siguiente paso fue el desarrollo del protocolo RBRP, realizado en el entorno de simulación NS-3.

En dicho protocolo se propone el desarrollo de un control de potencia como objetivo inicial, basado en un entrenamiento previo del escenario con el que se va a trabajar, empleando una solución *Cross layer*. Con el objetivo de ver los resultados del control de potencia, se realizó varias simulaciones con esta nueva funcionalidad sobre un protocolo tradicional en redes MANET como es el AODV, observando una reducción cercana a 2 dBms en la potencia media de transmisión.

Se ha llevado a cabo una descripción detallada del protocolo RBRP, describiendo el formato de los mensajes, la estructura de datos, la operación y la lógica de dicho protocolo.

Como último paso se analizaron las diversas soluciones aportadas en este trabajo. Primero se comparó, dentro del entorno de simulación NS-3, el comportamiento del algoritmo y el protocolo RBRP, viendo como ambas soluciones se comportan de manera similar. Seguidamente se comparó el rendimiento del protocolo RBRP con el de otros protocolos tradicionales, como AODV, que basa su enrutamiento en el número de saltos. Se pudo comprobar como el mejor comportamiento se consigue con el protocolo aquí presentado (RBRP); así, si se compara con una solución sin control de potencia, con una estrategia que minimiza el número de saltos, se consiguen mejoras que rondan el 50 %.

Como punto final cabe destacar, que los aspectos tratados en este trabajo han desembocado en la redacción del documento de divulgación científica [Iga+15], enviado al foro internacional Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (IEEE WiMob) [WIM15]. Por otro lado también se ha enviado otro trabajo para su presentación oral a las Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL), siendo aceptado.

4.1. Lineas de trabajo futuras

La realización de este documento puede originar diversas líneas de trabajo en el futuro, bien sea para una mejora de los resultados aquí reportados, o para abrir nuevas líneas investigación que persiga la reducción de la exposición electromagnética a la que se ven sometidas los usuarios.

Aunque se pueden plantear numerosos trabajos a realizar, a continuación se destacan una serie de aspectos.

En referencia al algoritmo parece interesante trabajar en la posibilidad de modelar la capacidad de cada enlace, y no asumir un valor *infinito*. Así se conseguiría entre otras cosas, adecuar los flujos de tráfico a los anchos de banda de un determinado canal, o ser modelados de manera que estén relacionados con el grado de saturación de un nodo.

También sería interesante reducir la complejidad del algoritmo, para poder trabajar con equipos de menores prestaciones en tiempos razonables.

En lo referente al protocolo RBRP, se cree interesante realizar más simulaciones sobre grafos de diversa índole, variando los diferentes factores involucrados, como puede ser el número de fuentes y destinos, densidad, Por otro lado, también resultaría de interés plantear diferentes funciones de modelado del coste de exposición, variando sus valores y realizar un exhaustivo análisis del impacto de cada una de ellas. También se aconseja contrastar el funcionamiento de dicho protocolo, con otros de diferentes características en referencia al tipo de enrutamiento para este tipo de redes, como puede ser alguno de tipo preventivo (Ej: OLSR) y, de esta manera, chequear el comportamiento que se consigue en más soluciones.

Por último, extrapolar estas soluciones a un entorno real de funcionamiento. Considerándose uno de los grandes hitos a los que se enfrenta todo trabajo, es decir, que sus efectos se vean repercutidos en soluciones reales. Dado que en este caso al encontrarse en una fase inicial de investigación y desarrollo a sido comprobado sobre un entorno virtual.

Acrónimos

- AODV** Ad hoc On-Demand Distance Vector. 2, 3, 25, 26, 28, 29, 43, 49, 54
- BFS** Breadth First Search. 15
- CCA** Cycle Canceling Algorithm. 1, 2, 5, 10, 23, 53
- CDF** Función distribución de probabilidad (Cumulative Distribution Function). 29, 48–50
- DFS** Depth First Search. 15
- DSR** Dynamic Source Routing. 2
- DYMO** Dynamic MANET On-demand. 2
- EI** Exposure Index. 2
- EMF** Electromagnetic Field. 7
- IEEE WiMob** Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. 54
- JITEL** Jornadas de Ingeniería Telemática. 54
- LEXNET** Low EMF Exposure Networks. 1, 2, 53–55
- MANET** Mobile Ad hoc Network. 1, 26, 28, 43, 54
- MCF** flujo de coste mínimo (Minimum Cost Flow). 2, 5, 9, 53
- NS-3** Network Simulator 3. 1–3, 25, 26, 28, 42, 54
- OLSR** Optimized Link State Routing Protocol. 2, 55
- PDF** Función densidad de probabilidad (Probability Density Function). 17, 50, 51
- QoE** Quality of Experience. 1, 2
- QoS** Quality of Service. 1, 2, 27
- RBRP** Reward Base Routing Protocol. 3, 25, 26, 31, 32, 50, 54, 55
- SAR** Specific Absorption Rate. 2
- TBRPF** Topology dissemination Based on Reverse-Path Forwarding. 2
- UC** Universidad de Cantabria. 1
- WSN** Wireless Sensor Network. 30

Referencias

- [Ahu+93] Ravindra K. Ahuja, Thomas L. Magnanti y James B. Orlin. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1993. ISBN: 0-13-617549-X.
- [Gar+09] F. García Sanjuan, A. Martínez Villaronga, J. Puigcerver Pérez y M. Melzer. En: *Description of Cycle canceling algorithm for solving the Minimum cost flow problem*. Dic. de 2009.
- [Hen+06] Thomas R. Henderson, Sumit Roy, Sally Floyd y George F. Riley. «Ns-3 Project Goals». En: *Proceeding from the 2006 Workshop on Ns-2: The IP Network Simulator*. WNS2 '06. Pisa, Italy: ACM, 2006. ISBN: 1-59593-508-8. DOI: 10.1145/1190455.1190468. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/1190455.1190468>.
- [Ian+14] V. Iancu, L.F. Diez, L. Rodriguez de Lope, E. Slusanschi y R. Agüero. «A reward-based routing protocol to reduce the EMF exposure over wireless mesh networks». En: *Wireless Days (WD), 2014 IFIP*. Nov. de 2014, págs. 1-4. DOI: 10.1109/WD.2014.7020834.
- [ICN] ICNIRP. *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*. URL: <http://www.icnirp.org/>.
- [Iga+15] J. Igareda, L.F. Diez, R. Aguero, V. Iancu y E. Slusanschi. «Encaminamiento en redes inalámbricas malladas para minimizar la exposición de los usuarios a los campos electromagnéticos». En: *Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL)*, 2015. 2015.
- [Lac+06] Mathieu Lacage y Thomas R. Henderson. «Yet Another Network Simulator». En: *Proceeding from the 2006 Workshop on Ns-2: The IP Network Simulator*. WNS2 '06. Pisa, Italy: ACM, 2006. ISBN: 1-59593-508-8. DOI: 10.1145/1190455.1190467. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/1190455.1190467>.
- [LEX12] LEXNET. *Low Electromagnetic Field Exposure Networks*. 2012. URL: <http://www.lexnet-project.eu/>.
- [ley15] leyfr. *Transparencia, información y consulta en relación con la exposición a ondas electromagnéticas*. Feb. de 2015. URL: <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000030212642&dateTexte=&categorieLien=id>.
- [OMS15] OMS. *Campos electromagnéticos y salud pública: teléfonos móviles*. 2015. URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs193/es/>.
- [Per+03] C. Perkins, E. Belding-Royer y S. Das. «Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, Request for Comments 3561». En: 2003.

- [Suw+12] W. Suwansin, P. Phasukkit, C. Pintavirooj y A. Sanpanich. «Analysis of heat transfer and specific absorption rate of electromagnetic field in human body at 915 MHz and 2.45 GHz with 3D finite element method». En: *Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), 2012*. Dic. de 2012, págs. 1-4. DOI: 10.1109/BMEiCon.2012.6465473.
- [Tes+14] M. Tesanovic, E. Conil, A. De Domenico, R. Aguero, F. Freudenstein, L.M. Correia, S. Bories, L. Martens, P.M. Wiedemann y J. Wiart. «The LEXNET Project: Wireless Networks and EMF: Paving the Way for Low-EMF Networks of the Future». En: *Vehicular Technology Magazine, IEEE* 9.2 (jun. de 2014), págs. 20-28. ISSN: 1556-6072. DOI: 10.1109/MVT.2014.2312272.
- [TI] TI. *Descripción chip CC2420*. URL: <http://www.ti.com/product/CC2420/description>.
- [TNS10] TNS Opinion & Social. *Eurobarometer 73.3, Electromagnetic fields*. Available at http://www.eurobarometer.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_347_en.pdf.
- [Wia+14] J. Wiart, E. Conil, N. Varsier, T. Sarrebourg, A. Hadjem, L. Martens, G. Wermeeren e Y. Corre. «Low-EMF future networks: The LEXNET EU project». En: *Electromagnetic Compatibility, Tokyo (EMC'14/Tokyo), 2014 International Symposium on*. Mayo de 2014, págs. 635-637.
- [WIM15] WIMOB. *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*. 2015. URL: <http://conferences.computer.org/wimob2015/>.