

DPTO. DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



Tesis Doctoral

**TEORÍA DEL ENCAMINAMIENTO EN REDES AD
HOC INALÁMBRICAS**

Autor: JUAN JOSÉ VINAGRE DÍAZ
Directores: DR. ANTONIO J. CAAMAÑO FERNÁNDEZ
DR. F. JAVIER RAMOS LÓPEZ

Tesis Doctoral:
TEORÍA DEL ENCAMINAMIENTO EN REDES AD HOC INALÁMBRICAS

Autor:
JUAN JOSÉ VINAGRE DÍAZ

Directores:
DR. ANTONIO CAAMAÑO FERNÁNDEZ
DR. JAVIER RAMOS LÓPEZ

El tribunal nombrado para juzgar la tesis doctoral arriba citada, compuesto por los señores

Presidente:
DR. ANÍBAL R. FIGUEIRAS VIDAL

Vocales:
DR. MIGUEL ÁNGEL LAGUNAS HERNÁNDEZ
DR. LUIS IGNACIO SANTAMARÍA CABALLERO
DRA. INMACULADA MORA JIMÉNEZ

Secretario:
DR. JESÚS CID SUEIRO

Acuerda otorgarle la calificación de

Leganés, a

A mis padres, por el origen.

A Juanjo, por el destino.

A Laura, por el camino.

He vuelto a no llorar.
Se ha marchado mi amigo, mi mentor,
el que prometió contribuir a formar
un nuevo librepensador a mi lado.

Y no he llorado.
He vuelto a nuestro trabajo inconcluso,
al escritorio,
al blanco nunca en verdad olvidado.

Mi eterna ventana:
la noche afuera, la persiana alzada
y yo en su reflejo.

Todo está aquí,
como siempre.

Lo real es en sí mismo.
Ni siquiera la muerte lo cambia.

JJVD

Agradecimientos

No concibo mi trabajo sin el trabajo del equipo. No concibo mi vida sin la vida de los demás. Es la razón última de nuestra existencia.

El nombre que debe encabezar estos agradecimientos es el de Santiago. Él fue mi mentor, quien me hizo encontrar mi lugar. Él es el origen de que hoy esté donde quiero estar. Nunca habría podido agradeceréte tanto como mereces, pero me habría gustado tener algo más de tiempo para hacerlo. Gracias. Sé que me escuchas.

Asimismo, debo agradecer profundamente a mis Directores, los Doctores Antonio Caamaño y Javier Ramos, el regalo de su puerta abierta. Antonio, gracias por tu entrega, por tu cercanía, por tu incalculable capacidad, por darme a conocer la Ciencia. Javier, gracias por hacer que todo sea posible, por tu franqueza, por reservarme un sitio entre vosotros.

A los compañeros del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Rey Juan Carlos les debo su bienvenida incondicional. Julio, gracias por tus palabras y tus obras. Inma, Mark y José Luis, gracias por desentrañar los misterios del procesado, los protocolos y la estructura. Edu, Carlos y Lorena, gracias por Slott, Gordi y los demás. Gracias a todos por ser parte del grupo.

Mi más sincero agradecimiento a los Doctores Julia Fernández-Getino, Matilde Sánchez y Jesús Cid, y al resto de integrantes del Doctorado en Tecnologías de las Comunicaciones de la Universidad Carlos III por su apoyo dadas las condiciones especiales en que se desarrollaron los primeros años de mi doctorado.

Asimismo, merecen una mención especial todas las personas que forman parte de mí ya que sin ellas nada tendría sentido. Los amigos que el tiempo no ha apartado: Alfonso, gracias por el cada vez más preciado bien de la coherencia; Jesús, gracias por tu cariño sincero y perdurable; Eva, gracias por haber estado siempre, aun cuando hacía daño; Pablo, Curro, Chema, Raúl, Riqui, Psico, Guille, Sergio y Susana, gracias por ser mi equipo; Beto, gracias por formar parte de mi familia; José Ignacio, gracias por tantas horas de trabajo en mayúsculas; Rosa y Dani, gracias por vuestras sobremesas; Gema, gracias por mostrarme que es posible ser como tú incluso en este mundo. Gracias a todos los demás por cada minuto que hemos compartido.

La parte de la familia, lejana tan sólo en kilómetros, que ha sufrido tanta ausencia. Gracias a Reyes, Patri y los abuelos “gallegos” por vuestra comprensión y vuestro aliento.

Aquéllos para los que la sangre es un mero trámite: Carmen, gracias por no faltar a ninguna cita de mi vida; Ana Mari, gracias por saberte siempre cerca; Manoli, gracias por esas tarjetas inesperadas; Osvaldo, gracias por ser mi hermano cubiche.

Mis padres, que me han hecho ser quien soy y estar orgulloso de ello. Gracias por mostrarme el camino hacia mí mismo. Papá, gracias por tu ejemplo, por esperarme tantas veces en la parada del autobús, por la dirección siempre correcta. Mamá, gracias por tu regazo, por todas aquellas noches sentada en mi cama, por tu amarillo sobre grises.

Laura, mi mujer, que me completa. Gracias por hacer tuya mi vida. Nunca podré agradecerte lo suficiente tu renuncia y tu labor con el enano. Gracias por nuestro ayer y nuestro mañana.

Y por último, Juanjo, que cierra el círculo. Tú aún no lo sabes, pero eres la razón de la mayor y mejor parte de mí mismo.

Gracias a todos.

Resumen

Las Redes Ad Hoc Inalámbricas gozan de un gran auge hoy en día debido a que dan respuesta a las exigencias actuales referentes al establecimiento de redes que cubran necesidades de comunicación de forma flexible -en tiempo y espacio- y autónoma -autoconfiguración e independencia de una estructura fija-. Estas características suponen importantes retos de diseño que obligan a desarrollar propuestas novedosas, capaces de superar las restricciones impuestas por la variabilidad en la topología y el canal y la ausencia de infraestructura. Entre el elevado número de aspectos que se ven alterados por este nuevo planteamiento de las redes de comunicación, el encaminamiento es uno de los más afectados. Este hecho es especialmente significativo debido a que, al mismo tiempo, una parte importante del nivel de las prestaciones finales ofrecidas por las Redes Ad Hoc Inalámbricas recae sobre el mismo.

La presente tesis aborda el estudio del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas desde un punto de vista teórico-práctico que lo describe de forma global. Esta perspectiva que aúna teoría y experiencia supone una innovación significativa en este ámbito, donde, hasta donde alcanza nuestro conocimiento, ambas aproximaciones al conocimiento se tratan de forma absolutamente independiente hasta la fecha. El planteamiento integral permite que se establezcan fuertes interrelaciones con otras interpretaciones de este campo de estudio con origen en la Teoría de la Información, de la Comunicación, del Control o de Grafos.

En lo concerniente al aspecto teórico, la presente tesis desarrolla un modelo con el ánimo de caracterizar el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas de forma completa, genérica, única y medible. De esta forma, todos los factores involucrados son reunidos bajo un solo parámetro que representa cualquier escenario posible, mediante un valor numérico. El ambicioso objetivo de dotar al modelo teórico de las cualidades anteriores parte del nivel más esencial del encaminamiento: su capacidad para establecer caminos entre fuente y destino que se ajusten a la línea recta que conecta una y otro. Esta capacidad es descrita mediante la llamada *eficiencia de encaminamiento*, expresada como el cociente entre la distancia entre fuente y destino y la longitud de la ruta que los une. Así, se persiguen los rasgos de completitud y generalidad. El conjunto de todos los valores posibles de la eficiencia de encaminamiento para un escenario determinado es recogido en su distribución estadística, que se representa por la magnitud de una sola variable denominada *radio de persistencia*. Por consiguiente, se añaden las deseadas

unicidad y mensurabilidad al modelo propuesto.

A su vez, el modelo teórico denota la existencia de una relación directa entre el conocimiento espacial de los nodos acerca de la red y la eficiencia de encaminamiento, así como la dependencia de ésta con la dimensión. En este sentido, se aporta la expresión de la distribución estadística de la eficiencia de encaminamiento en D dimensiones.

El modelo propuesto es validado de forma empírica. El conjunto de experimentos que se lleva a cabo obedece a una metodología de diseño creada al efecto de asegurar la corrección de los resultados así como su reproducibilidad. Esta metodología es especialmente relevante para establecer un marco común de experimentación de tal forma que, por una parte, sea posible la comparación directa de los resultados obtenidos y, por otra, éstos sean representativos del fenómeno bajo análisis.

Asimismo, la confirmación del modelo teórico se realiza mediante la comprobación de que las medidas experimentales recogidas son caracterizadas por un valor concreto del radio de persistencia. Por este motivo, se crea un procedimiento específico para el ajuste de la distribución estadística experimental a la teórica, que produce tanto la magnitud absoluta representativa como su rango de variación.

El desarrollo teórico y empírico aportado por la presente tesis genera un marco de estudio y evaluación del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas sobre una base sólida, objetiva y equitativa. En el mismo, sus prestaciones son definidas de forma absoluta mediante la medida de su radio de persistencia, abandonando la mera comparación relativa de ciertos aspectos particularizados a las condiciones específicas del caso analizado.

Por consiguiente, a través del mismo, es posible el estudio del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas desde un punto de vista completo -teórico y experimental- e integral -que considera todas las contribuciones de los distintos factores involucrados en el mismo-, lo que permite futuros desarrollos en este campo de investigación.

Abstract

Wireless Ad Hoc Networks give response to current requirements regarding the establishment of networks that fulfill communication needs in a flexible -in time and space- and autonomous -autoconfiguration and independence from a fixed structure- way. These features imply important challenges in design that force the development of new proposals which overcome the restrictions that are imposed by the presence of variability in the topology and channel and the absence of an infrastructure. This novel approach of a communication network impacts on different aspects. Among them, routing is one of the most affected. This is especially significant due to the fact that, at the same time, routing is responsible of a relevant piece of the final level of performance of the network.

This thesis faces the study of routing in Wireless Ad Hoc Networks from a theoretical and practical perspective that describes it globally. This outlook produces a significant innovation in this field, where, to the best of our knowledge, both approximations are seen in a completely separate way. The integral approach allows establishing strong relationships with other interpretations in this area under the scope of the Information Theory, Communication Theory, Control Theory or Graph Theory.

Regarding the theoretical aspect, the present thesis develops a model that characterizes routing in Wireless Ad Hoc Networks in a complete, generic, unique and measurable way. Hence, all the included factors are collected under a single parameter that represents any possible scenario by means of a numeric value. This ambitious aim of providing the theoretical model with the previous qualities starts from the most essential level of routing: its ability to establish paths from source to destination which are as close as possible to the straight line that connects both. This ability is described through the so called *routing efficiency*, which is expressed as the ratio between the Euclidean distance between source and destination and the actual length of the route. Thus, the completeness and generality features are reached. The set of every permitted value of the routing efficiency in a specific scenario is present in its statistical distribution, which is characterized by a single variable named *persistence radius*. Consequently, the desired properties of uniqueness and measurability are added.

Furthermore, the theoretical model points out the existence of a direct relation between the spatial knowledge of the nodes regarding the network and the routing efficiency, which in

addition depends on the dimension of the network. Therefore, the expression of the statistical distribution of the routing efficiency in D dimensions is included.

The theoretical model is validated through simulation. The set of experiments that are carried out follow a methodology for their design created in order to assure the correction of the results and its reproducibility. This methodology is especially relevant to establish a common experimental framework. With this framework, the obtained results can be directly compared and are representative of the object under analysis.

Additionally, the validation of the theoretical model is implemented verifying that the collected empirical measures are characterized by a particular value of the persistence radius. Because of this, a specific procedure is created to fit the experimental to the theoretical statistical distributions. This fitting generates both the absolute magnitude and its range of variation.

The theoretical and empirical development included in this thesis builds a framework for the study and evaluation of routing in Wireless Ad Hoc Networks from a solid, objective and equitable basis. The routing performance is defined in an absolute way through the measure of its persistence radius, thus avoiding the relative comparison of several aspects particularized by the specific conditions of the analyzed case.

Consequently, this framework allows the study of routing in Wireless Ad Hoc Networks from a complete -theoretical and practical- and integral -that considers every factor involved in it- point of view, which empowers future developments in this research field.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Redes Ad Hoc Inalámbricas	1
1.2. Encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas	3
1.3. Una perspectiva global del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas	7
1.4. Número mágico, conectividad y distribución de distancias	9
1.5. Métricas empíricas y evaluación relativa del encaminamiento	13
1.6. Motivación y organización de la tesis	18
2. Modelo teórico	21
2.1. Consideraciones generales	22
2.2. Fundamento genérico de la DEaE: la integral de camino	24
2.3. Modelo de directividad	26
2.4. Modelo de movilidad	27
2.4.1. Función de distribución de celda	29
2.4.2. Función de distribución global	30
2.4.3. Cálculo de velocidades	32
2.5. Expresión completa de la DEaE	32
2.6. Momentos de la DEaE y radio de persistencia	34
2.6.1. Encaminamiento directivo	34
2.6.2. Encaminamiento aleatorio	36
2.6.3. Encaminamiento óptimo	37
2.6.4. Conclusión parcial	37
2.7. Redes Ad Hoc Inalámbricas de gran escala	37
2.7.1. Momentos de la DEaE bajo el supuesto de gran escala	37
2.8. Resultados teóricos	39
2.9. Relación con otras aproximaciones al encaminamiento	41
2.10. Conclusiones	44

3. Medida Experimental de la Eficiencia de Encaminamiento	47
3.1. Diseño de experimentos	48
3.1.1. Metodología para el diseño de experimentos	48
3.1.2. Descripción de los experimentos realizados	50
3.2. Resultados empíricos	55
3.2.1. Obtención del radio de persistencia característico de los resultados ex- perimentales	56
3.2.2. TFaTD	58
3.2.3. FCaTD	68
3.2.4. Observaciones generales de los resultados	75
3.3. Discusión de otros trabajos	77
3.4. Conclusión	78
4. Conclusiones y líneas de trabajo futuras	81
4.1. Aportaciones	81
4.2. Líneas futuras	82

Introducción

1.1 Redes Ad Hoc Inalámbricas

Bajo una perspectiva tradicional, una red de comunicaciones puede concebirse como un conjunto de dispositivos que ofrecen servicios de comunicación a usuarios externos. De esta forma, el conjunto de parámetros que deben ser considerados para su diseño, operación y consecución de los niveles de calidad exigidos se restringe al ámbito interno de la misma, limitando el papel de los usuarios a un mero acceso a la red bajo ciertas condiciones impuestas. Sin embargo, hoy en día el usuario final no se resigna a jugar un papel tan sólo secundario en la comunicación, en *su* comunicación. En un principio, reclamó movilidad, más tarde diversidad de medios y contenidos y por último libertad para el establecimiento de sus propias redes que atiendan necesidades concretas en tiempo y espacio. Este requerimiento hace necesarios nuevos esquemas en los que la red esté conformada únicamente por dispositivos terminales, que actúen por tanto como *nodos* sin infraestructura externa y fija, y cuyo despliegue sea sencillo y de bajo coste. Todo ello obliga a una respuesta tecnológica que desplace el control de dichas comunicaciones hacia los extremos más periféricos de las redes.

Las primeras experiencias en este campo se deben a la *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) que desarrolló durante la década de los 70 la llamada Red Radio de Paquetes (*Packet Radio Network*) para comunicaciones entre vehículos en movimiento. Este concepto de redes carentes de infraestructura cableada para la comunicación derivó en las conocidas como *Redes Ad Hoc Inalámbricas*. Ya en su propio término queda reflejada la característica principal de su comportamiento y aplicación: *Ad Hoc*. Esta expresión está contenida en el estándar 802.11 del *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) [Society, 1997], donde se contempla la configuración de operación independiente -ad hoc- de las estaciones en la capa de Control de Acceso al Medio (MAC), de tal forma que sea posible la comunicación directa entre ellas. Esta visión es reforzada en la definición aportada por la *Internet Engineering Task Force* (IETF) en [Corson y Macker, 1999] donde se añade la movilidad de los nodos a la definición. Sin embargo, el requerimiento de contar con Redes Ad Hoc Inalámbricas no produce una mera posibilidad teórica sino que desencadena una serie de desarrollos específicos en esta área. La muestra más evidente del interés en este tipo de redes es la existencia de

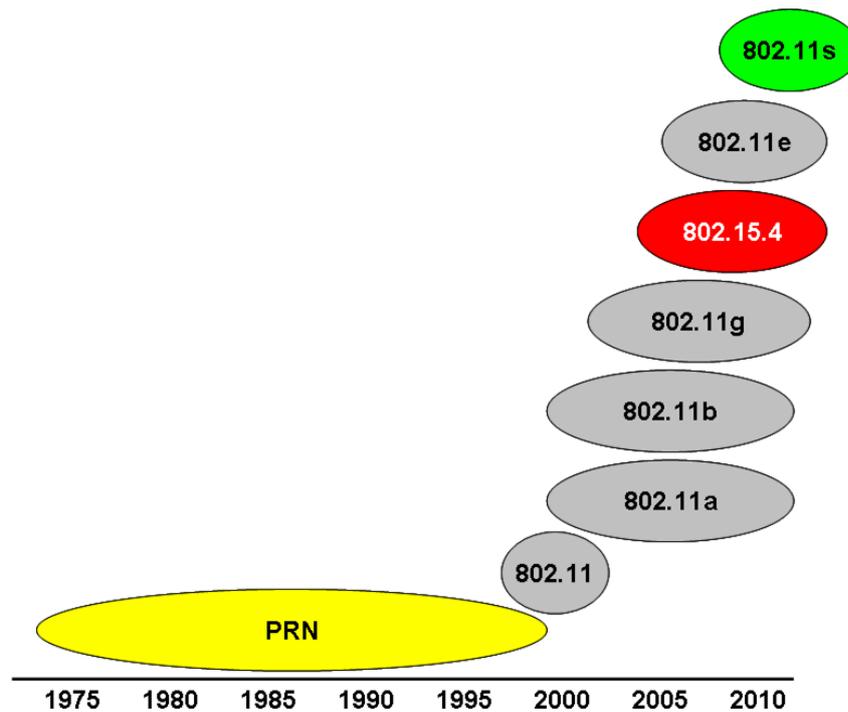


Figura 1.1 : Cronología de distintos estándares inalámbricos.

iniciativas de estandarización de distintas particularizaciones de las mismas. Así, el propio grupo de trabajo del 802.11 generó una extensión bajo el nombre de IEEE 802.11s, que incluye la definición de las llamadas *redes malladas (mesh)*, caracterizadas por permitir la comunicación a través de topologías multisalto autoconfigurables. El primer borrador de dicho estándar fue admitido como tal en marzo de 2006 -versión D0.01- y en la actualidad se encuentra en su versión D1.00. Por su parte, dentro del grupo de trabajo del IEEE dedicado a las Redes de Área Personal (PAN) también se dedican esfuerzos orientados en el sentido de las redes malladas (802.15.5). Dentro de este mismo grupo, se incluye asimismo el IEEE 802.15.4 - la última versión del cual, 802.15.4-2006, fue publicada en septiembre de 2006- dedicado a las PAN de baja tasa. Entre éstas se encuentran las Redes de Sensores (WSN), de máximo auge hoy en día. Este estándar recoge las capas física (PHY) y de control de acceso al medio (MAC) y está respaldado por la Alianza ZigBee, que cuenta entre sus promotores con empresas como Philips, Honeywell, Siemens, Texas Instruments, Schneider Electric, Samsung, Motorola, Mitsubishi o Freescale. La especificación ZigBee recoge aspectos relacionados con la capas de red y superiores para la creación de redes de baja tasa y mínima complejidad, coste y consumo de potencia, destinadas primordialmente a aplicaciones de monitorización y control. La Figura 1.1 representa la evolución cronológica de distintos estándares de tecnologías inalámbricas, donde se resaltan los relativos a Redes Ad Hoc Inalámbricas.

Estos desarrollos se enfrentan a grandes retos tecnológicos que superar para ofrecer los servicios requeridos, debido fundamentalmente a los aspectos de autonomía y dinamismo im-

puestos, así como al carácter inalámbrico de este tipo de redes. En primer lugar, el uso del canal radio frente a los medios cableados tradicionales presenta los problemas bien conocidos de optimización del ancho de banda disponible, acceso múltiple, control de potencia, capacidad variable de canal y seguridad. A este conjunto de restricciones se le añade el carácter dinámico de los nodos, que genera constantes modificaciones en la topología de la red, lo que requiere el uso de nuevas técnicas para el mantenimiento y configuración de la misma. Por último, la ausencia de infraestructuras -cableadas o inalámbricas- que soporten las comunicaciones obliga a una operación limitada energéticamente, que debe acudir a nuevas propuestas relativas al direccionamiento de los nodos y el transporte de los datos a través de la red, atendiendo a esquemas multisalto.

Todas las limitaciones anteriores impactan en diversos ámbitos de la comunicación en Redes Ad Hoc Inalámbricas, pero muy especialmente en el encaminamiento, ya que es el que se ve despojado en mayor medida de la mayor parte de los recursos de los que disponía en las redes tradicionales a partir de su propia infraestructura. El mero hecho de contar con una red fija o celular simplifica en gran medida el problema del encaminamiento dando lugar a un elevado número de técnicas que lo resuelven de forma efectiva [Bertsekas y Gallager, 1992].

1.2 Encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas

Sobre las bases expuestas anteriormente, el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas debe satisfacer ciertos objetivos [Basagni et al., 2004a]:

- Minimización de costes inherentes: ante la escasez de recursos energéticos y ancho de banda, debe reducirse tanto la cantidad de mensajes de control intercambiados como la carga computacional de las operaciones.
- Capacidad multisalto: debe asegurarse el reenvío de paquetes a través de los nodos de la red dado que habitualmente el destino no se encuentra dentro del alcance de la fuente.
- Mantenimiento dinámico de topología: debido a las características cambiantes de la red, las rutas establecidas deberán ser actualizadas.
- Eliminación de bucles: la posibilidad de que un nodo sea visitado más de una vez por un paquete en su trayecto hacia el destino implica un coste inaceptable de ancho de banda y recursos de procesamiento y transmisión.

Además, debe admitir diversos modos de operación [Corson y Macker, 1999]:

- Distribuido: el fundamental, dada la estructura de la red.

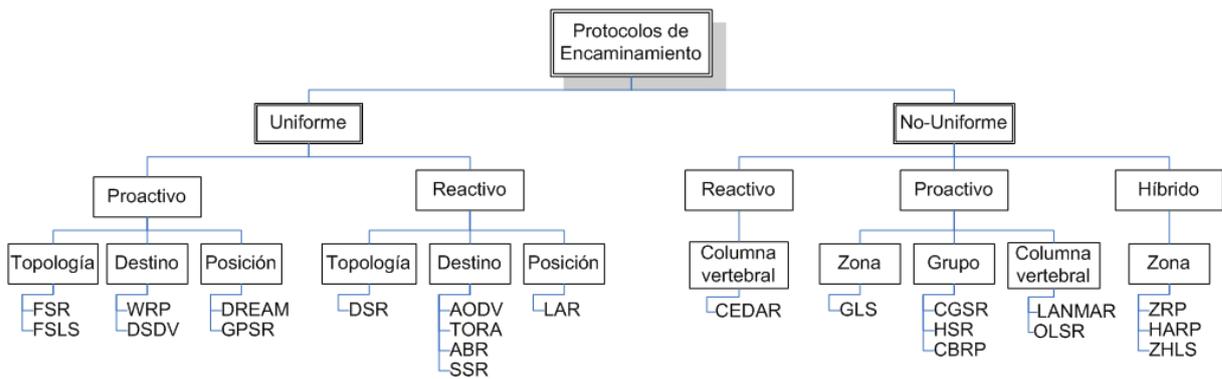


Figura 1.2 : Taxonomía de protocolos de encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas.

- Bajo demanda: la adaptación del encaminamiento a los patrones de tráfico particulares de cada situación hace posible reducir el gasto de ancho de banda y energía, aunque se amplía el tiempo de obtención de la ruta.
- Activo: solventa el problema anterior y cubre aplicaciones que necesitan de un envío sistemático de datos, como monitorización ambiental, por ejemplo.
- De período de sueño: con el objetivo de preservar su energía, los nodos pueden pasar a un estado de sueño en el que sus funcionalidades de emisión y recepción se encuentran parcialmente inactivas hasta cierto grado.

Con estos propósitos se ha desarrollado una gran cantidad de protocolos de encaminamiento que optan por criterios de diseño en distintas líneas. Cada una de las mismas conlleva un conjunto de características tanto a nivel de funcionalidad como de prestaciones y aplicación que caracteriza el común de los protocolos que engloba. Por el contrario, en la mayor parte de los casos, estas peculiaridades no son completamente separables, dando lugar a distintas clasificaciones dependiendo de los criterios establecidos. De este modo, puede sugerirse una serie de taxonomías de protocolos de encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas. A continuación se recogen diferentes aproximaciones publicadas a este respecto - [Ramanathan y Steenstrup, 1996], [Royer y Toh, 1999], [Feeney, 1999], [Liu y Kaiser, 2003] y [Lang, 2003]- en una propuesta nueva de catalogación de protocolos de encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas. La Figura 1.2 presenta el esquema formulado, especificando algunos de los protocolos representativos de cada categoría.

El primer nivel de clasificación se basa en la *estructura* de los protocolos en cuanto a la homogeneidad o heterogeneidad de los papeles de los nodos en el encaminamiento. Así, se distingue entre:

- *Uniforme*: o de estructura plana. Todos los nodos de la red desempeñan iguales funciones y poseen las mismas características. En este caso, no se incurre en ningún coste de

mantenimiento de la estructura de la red; sin embargo, se adaptan en muy poca medida a ampliaciones conservando sus mismas prestaciones.

- *No uniforme*: propios de estructuras jerárquicas en las que algunos nodos desarrollan papeles especiales e incluso pueden dotarse de capacidades particulares en términos de cómputo, energía o almacenamiento entre otros. Esto les permite soportar algoritmos más complejos, reducir la sobrecarga debida a la comunicación y ofrecer la posibilidad de balanceo de carga mientras mantienen sus características incluso ante incrementos del número de nodos en la red; por el contrario, generan cierto coste de mantenimiento de la estructura y necesitan en muchos casos la disponibilidad de nodos heterogéneos.

En cada una de las categorías anteriores, los protocolos presentan una nueva peculiaridad relativa al *procedimiento* adoptado para el descubrimiento del camino a establecer y su mantenimiento. Bajo este punto de vista, puede diferenciarse entre:

- *Activo*: su funcionamiento se basa en tablas, creadas a partir de una fase original de descubrimiento de ruta, que albergan la información referente a los caminos en la red con base en distintos criterios. Esta información es de ámbito global y por tanto, todos los nodos conservan caminos posibles hacia el resto. Para la diseminación de la misma, los nodos intercambian estos datos bien periódicamente o bien ante la aparición de un cambio en ella. Los protocolos activos logran que el envío de datos se produzca con un retardo despreciable debido a que la información sobre la ruta a seguir está disponible previamente; no obstante, consumen recursos de la red -energía, cómputo, almacenamiento, etc.- independientemente del grado de utilización de la ruta.
- *Reactivo*: también denominado “bajo demanda”. Las rutas se construyen únicamente en el momento en que un nodo necesita establecer una comunicación. Es en ese preciso instante cuando se desencadena una fase de descubrimiento de ruta que concluye una vez que la fuente recibe la respuesta del destino que incluye el camino elegido para el envío de datos. El coste de mantenimiento de rutas disminuye en gran medida, a costa de introducir una latencia producida por la generación inicial del camino y un posible problema de saturación de la red fruto de la inundación de la misma con mensajes de petición de ruta.
- *Híbrido*: generalmente utilizado para protocolos no uniformes. Incluye ambos procedimientos anteriores en distintos niveles del encaminamiento. Así, se consigue reducir la sobrecarga de la red con mensajes de control presentada por los protocolos activos, mientras que se disminuye la latencia de las operaciones de búsqueda mostrada entre los reactivos.

Por último, dentro de cada grupo principal se efectúan unas divisiones de detalle particulares. En el caso de los protocolos uniformes, esta clasificación final obedece al tipo de *información del estado* de la red que manejarán los nodos para proceder al encaminamiento. Según este criterio, un protocolo uniforme se basa en:

- *Topología*: los nodos mantienen información referida al conjunto global de la red. Un grupo importante de estos protocolos son los basados en el estado del enlace, en los que la información sobre las conexiones establecidas por cada nodo con sus vecinos es diseminada a lo largo de la red de tal forma que cualquier nodo conozca el esquema de enlaces de la misma. Esta aproximación no se adapta de forma óptima al carácter dinámico de este tipo de redes; sin embargo, una información de tal calibre incide muy positivamente en la selección de la mejor ruta, el balanceo de carga o la gestión de la calidad del servicio.
- *Destino*: el conocimiento en este caso se restringe al ámbito local. El grupo más numeroso de entre esta clase de protocolos son los llamados “distancia-vector” dado que, en lugar de rutas completas, mantienen cierta medida de la distancia hasta distintos destinos -generalmente el número de saltos mínimo- y el vector de dirección hacia ellos -el identificador del nodo del salto siguiente-.
- *Posición*: el conocimiento de cada nodo se basa en las coordenadas geográficas de sí mismo y del resto. El principio del encaminamiento consiste en la aproximación secuencial hacia el destino mediante la implementación de saltos al vecino que esté más próximo a éste. En redes de topología homogénea resulta una técnica muy eficiente; sin embargo, en presencia de discontinuidades u obstáculos debe apoyarse en algoritmos específicos para mejorar su rendimiento; al mismo tiempo, esta aproximación requiere un sistema de posicionamiento absoluto o relativo, lo cual limita considerablemente su aplicación.

Por su parte, los protocolos no uniformes pueden catalogarse en función del tipo de *organización* que presentan, diferenciándolos según su base en:

- *Zona*: los nodos son agrupados según la zona geográfica que ocupan. Así, se reduce la sobrecarga de mantenimiento de ruta al ámbito local de la misma. Una vez más, es necesario el conocimiento de la posición de los nodos y el consiguiente sistema que lo provea.
- *Grupo*: la asociación de nodos se realiza en torno a uno de ellos (*clusterhead*) que actúa como líder del grupo, responsabilizándose del alta y la baja de nodos en el grupo y de ciertas funciones jerarquizadas del encaminamiento. Esta jerarquía reduce la sobrecarga de control de la red a partir de nodos que, en la mayoría de los casos, requieren capacidades más amplias que las del resto.

- *Columna vertebral*: un conjunto de nodos son seleccionados dinámicamente para conformar una columna vertebral (*backbone*) de la red. A dichos nodos se les asignan funciones especiales como la construcción de caminos y la propagación de paquetes de control y datos. El resto de nodos se apoya en éstos para realizar su establecimiento de ruta para la comunicación deseada. Una vez más, se logra una alta capacidad de adaptación a las ampliaciones de la red y un control del encaminamiento a un menor coste; por el contrario, sigue incurriéndose en cierto gasto de mantenimiento de la estructura.

El marco de aplicación de las Redes Ad Hoc Inalámbricas es suficientemente extenso como para que todas categorías descritas anteriormente encuentren un ámbito en el que sea aconsejable su uso. La conclusión que debe resaltarse de esta clasificación es que se dispone de una gran variedad de protocolos y modos de operación que hace indispensable la creación de modelos que los caractericen y metodologías para la realización de experimentos que evalúen sus prestaciones, de tal forma que las propiedades de cada uno sean expuestas y fundamentadas para su selección en el escenario a estudio.

1.3 Una perspectiva global del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas

El objetivo principal del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas es encontrar rutas óptimas en relación con un parámetro o conjunto de parámetros determinado. El nivel más básico de estos parámetros lo ocupa la capacidad para construir un camino lo más cercano a la línea recta que une fuente y destino. Esta capacidad es denominada en la presente tesis *eficiencia de encaminamiento* y engloba las contribuciones de los distintos factores que intervienen en el mismo.

Esta eficiencia de encaminamiento no debe circunscribirse exclusivamente al protocolo que gobierna la operación de los nodos en lo concerniente a la búsqueda y transporte de la información mediante distintos saltos. Para lograr una descripción completa del encaminamiento, es necesario un modelo que tenga en consideración factores que no siempre están encuadrados en la capa de red (RED) sino que pueden encontrarse también en las capas PHY y MAC. El hecho de obviar estas variables genera dos efectos indeseados: por una parte, la representación resultante es incompleta ya que no incluye las contribuciones de todos los parámetros que intervienen en el mismo. Además, no se permite la extracción de conclusiones separables sobre la influencia del conjunto de factores incluidos, ya que sus efectos se presentan confundidos entre otros procedentes de variables no contempladas por el modelo. Por estos motivos, el estudio del encaminamiento toma como base el protocolo de encaminamiento y su objetivo principal de encontrar una ruta lo más cercana posible a la línea recta que une fuente y destino. No obstante, debe considerar como una parte integrante del mismo las restricciones impuestas por el resto de variables involucradas en el proceso global del encaminamiento.

		PHY					MAC		RED						
		Pot. TX	Topología	Desvanecim.	Movilidad	BER	Cons. Energ.	Interferencia	Nº ReTX	Multi salto	Tasa transf.	Retardo	Equidad	Seguridad	Encaminam
PHY	Pot. TX														
	Topología														
	Desvanec.														
	Movilidad		x												
	BER	x	x	x	x										
Con. Ener.	x			x											
MAC	Interfer.	x	x		x	x									
	Nº ReTX	x			x	x	x	x							
RED	Multisalto	x		x	x	x	x	x							
	Tasa trans		x		x	x		x	x						
	Retardo		x		x				x						
	Equidad										x		x		
	Seguridad	x									x				
Encamin.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

Figura 1.3 : Tabla de interrelaciones entre parámetros de las capas PHY, MAC y RED.

En este sentido, distintos factores de la capa PHY inciden directamente en las prestaciones del encaminamiento. La potencia de transmisión amplía o reduce el rango de cobertura de los nodos, lo que conlleva un mayor o menor número de vecinos; la movilidad de los mismos impone un tiempo de vida determinado para las rutas establecidas; la topología de la red puede aumentar o disminuir la eficiencia de encaminamiento; y otros parámetros como tasa de error de bit (BER), desvanecimiento o consumo energético también aportan cierta influencia en el encaminamiento. Por su parte, variables de la capa MAC como interferencia o número de retransmisiones presentan a su vez sus propias contribuciones debido a que impactan directamente sobre las comunicaciones realizadas con éxito entre los dos nodos de cada salto. De esta forma, el conjunto de rutas posibles entre fuente y destino queda condicionado por estos factores. Estas interrelaciones entre capas no se restringen al ámbito del encaminamiento sino que se producen asimismo entre otros parámetros. La Figura 1.3 refleja dichas interrelaciones entre las capas PHY, MAC y de RED del modelo OSI, que en algunos casos resultan fundamentales para la operación de una Red Ad Hoc Inalámbrica.

Este estudio integral de las Redes Ad Hoc Inalámbricas y el encaminamiento en ellas también puede ser extendido a las distintas áreas de conocimiento que han abordado su análisis desde diferentes aproximaciones.

- *Teoría de la Información*: estudia la capacidad del canal. Ésta se particulariza en la capacidad de transporte de la red, para la que se establece un límite en $\Theta(\sqrt{N})$, que denota su tendencia hacia \sqrt{N} cuando $N \rightarrow \infty$. Esta capacidad de transporte de la red se concreta en $\Theta(1/\sqrt{N})$ para cada uno de los N nodos de la misma [Gupta y Kumar, 2000].
- *Teoría de la Comunicación*: se ocupa del cálculo analítico de parámetros como *BER*, *SINR* (relación señal a ruido más interferencia) que caracterizan las prestaciones reales

de un sistema de comunicaciones. Bajo esta visión, el encaminamiento es estudiado como una sucesión de enlaces con unos determinados valores de BER o SINR, que se acumulan a lo largo de la ruta establecida.

- *Teoría de Grafos*: una Red Ad Hoc Inalámbrica se observa como un conjunto de puntos interconectados según un patrón particular. El objetivo por tanto es la determinación del camino óptimo entre dos puntos de un grafo con base en métricas como el camino más corto.
- *Teoría del Control*: interpreta una Red Ad Hoc Inalámbrica como un sistema en continua variación cuyas componentes deben ser ajustadas de forma dinámica.

Uno de los objetivos de la presente tesis es el desarrollo de un modelo que englobe las distintas perspectivas listadas. Con este fin, en el Apartado 2.9 se describe con cierto detalle cada una de ellas y se establecen sus interrelaciones con el marco teórico propuesto de tal forma que se muestra la generalidad del mismo.

Como puede observarse a tenor de lo expuesto en este apartado, es necesario abordar el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas desde una visión global que incluya todos los parámetros que intervienen directa o indirectamente en sus prestaciones. De esta forma, es posible establecer conexiones con las distintas aproximaciones al problema procedentes de los diversos campos del conocimiento que se ocupan de su estudio. En consecuencia, los modelos que aspiren a ofrecer una caracterización completa del mismo, deben tener en consideración este conjunto integral de variables, desarrollando la descripción sobre la base de una característica capaz de recogerlos en su totalidad. En el apartado subsiguiente, se detallan diferentes modelos teóricos que han abordado la caracterización del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas desde distintos puntos de vista.

1.4 Número mágico, conectividad y distribución de distancias

La forma elemental de enviar información desde una fuente a un destino en una ubicación conocida consiste en elegir la potencia de transmisión necesaria para alcanzar este último mediante una conexión directa. Este procedimiento puede ser válido en redes donde la comunicación se establece entre un número muy reducido de parejas fuente-destino (F-D) perfectamente identificadas en cuanto a sus localizaciones y en las que es posible la creación de enlaces punto a punto mediante el uso de antenas direccionales. Sin embargo, en el caso de una Red Ad Hoc Inalámbrica, esta aproximación es absolutamente inviable ya que cualquier nodo de la red -que además es densa en la mayor parte de los casos- puede actuar como fuente o destino de forma indiscriminada y variable en el tiempo. Asimismo, dados su carácter denso y la restricción impuesta como objetivo prioritario para este tipo de redes, la potencia

de transmisión no puede tomar valores elevados para evitar un alto nivel de interferencias y un consumo energético inaceptable, respectivamente. Por estos motivos, el destino no puede ser alcanzado en un único salto y, así, se debe recurrir a esquemas multisalto para efectuar el envío de información de fuente a destino.

Es por tanto necesaria la inclusión del concepto de encaminamiento como responsable de la toma de decisiones sobre la dirección en la que transmitir la información en cada salto. La selección de los nodos hacia los que realizar estos envíos intermedios produce en cada salto un acercamiento -o alejamiento- al destino que no tiene por qué coincidir con la longitud del salto realizado. La variable que mide este acercamiento se denomina *progreso* y se define como la componente en la dirección de la recta que une fuente y destino de la distancia recorrida [Kleinrock y Silvester, 1978]. El objetivo principal del encaminamiento bajo este punto de vista es que se produzca un progreso secuencial hasta el destino que minimice el número de saltos dentro de los límites impuestos por los niveles de interferencia generados. En consecuencia, debe determinarse el rango de cobertura de cada nodo con base en unos criterios que aseguren la optimización de la capacidad de la red en función de la relación entre el progreso en cada salto y el porcentaje de transmisiones efectuadas con éxito sobre el escenario de interferencias producido. El trabajo en [Kleinrock y Silvester, 1978] se centra en este aspecto, aún en el ámbito de las Redes Radio de Paquetes, precursoras de las actuales Redes Ad Hoc Inalámbricas. En el mismo, se describe un modelo para el cálculo del radio de cobertura que maximiza la capacidad de una Red Radio de Paquetes, llegando a la conclusión de que el número medio de vecinos óptimo es aproximadamente 6, $n \approx 6$. Este llamado "número mágico" es recalculado en [Takagi y Kleinrock, 1984] y establecido en 8 a partir del compromiso entre la probabilidad de realizar una transmisión con éxito, que decae con la inversa del número de vecinos, $1/n$, y el progreso, proporcional a \sqrt{n} . En [Kleinrock y Silvester, 1987] pueden encontrarse distintos trabajos que abordan el problema de la determinación del número mágico. Estudios posteriores extienden el modelo inicial introduciendo un modelo de interferencia específico [Sousa y Silvester, 1990] o la presencia de desvanecimiento o ruido de fondo [Zorzi y Pupolin, 1995]. Bajo esta aproximación, en [Hu, 1993] se propone un algoritmo de control de topología para una Red Radio de Paquetes que resulta en niveles elevados de fiabilidad y tasa de transferencia mediante una triangulación de Delaunay, maximizando el ángulo mínimo de todos los triángulos formados entre nodos de la red.

Adicionalmente, la consideración acerca del radio de cobertura de los nodos no sólo repercute en la capacidad de la red sino en un parámetro incluso más esencial que éste, su conectividad, como premisa fundamental para que se produzca la comunicación en una Red Ad Hoc Inalámbrica. Con este fin, en [Xue y Kumar, 2004] se establece que, por debajo de $0,074 \log N$ vecinos por nodo, donde N es el número de nodos en la red, la probabilidad de que ésta esté desconectada converge a 1 con $N \rightarrow \infty$; al mismo tiempo, la red muestra una

conectividad asintótica asegurando un número de vecinos por nodo superior a $5,1774 \log N$. A partir de estos resultados, en [Wan y Yi, 2004] se presenta la distribución asintótica del radio de transmisión crítico para conseguir que, para cualquier pareja de nodos, existan k caminos independientes -que no comparten ningún nodo en su trayecto- entre ellos, lo que se denomina *conectividad- k* .

Una vez determinado el rango de cobertura de los nodos y la conectividad de la red, el siguiente factor a considerar para el análisis del encaminamiento es la distancia entre nodos. Este factor es necesario, entre otros motivos, para precisar la viabilidad de los enlaces que deben establecerse en cada salto de la ruta completa entre fuente y destino. Un primer trabajo fundamentado en esta perspectiva es [Rose, 1992], que examina la distancia media entre nodos en distintos tipos de redes construidas de acuerdo con diferentes niveles de aleatoriedad. La conclusión principal expuesta es la independencia de la distancia media entre nodos con la regularidad de la topología de la red. Una deducción muy similar se encuentra en [Miller, 2001], donde se formaliza la distribución de distancias entre nodos colocados de forma aleatoria. Mediante el estudio de dos escenarios distintos -nodos desplegados uniformemente en un área rectangular y con distribución gaussiana en 2 dimensiones, respectivamente- se concluye que el patrón seguido para la ubicación de los nodos no es significativo ya que la única diferencia considerable entre las dos distribuciones de probabilidad obtenidas es aquélla procedente de los límites espaciales de la primera. Este trabajo es extendido en [Mullen, 2003], en el que se presentan dos estimadores de la distribución de distancias en área rectangular, verificando a su vez su validez cuando se añade un modelo de movilidad, *Random Waypoint Mobility Model*, al escenario original.

El estudio relativo a radios de cobertura, conectividad de la red y distancias entre nodos reflexiona sobre el encaminamiento en el ámbito de cada salto individual que es implementado. Por consiguiente, el siguiente paso del análisis debe considerar la extensión de este enfoque hasta la ruta completa, formada por una serie de saltos individuales. En una primera aproximación, las distribuciones de distancias formalizadas anteriormente pueden ampliarse al rango no del primero sino de cualquier vecino. Éste es el punto de partida de [Haenggi, 2005a], que se concreta en la caracterización mediante una función Gamma generalizada de la distribución de distancias al vecino η -ésimo para redes infinitas con despliegues de nodos aleatorios y uniformes. Asimismo, se presenta un listado de factores como interferencia, encaminamiento o número óptimo de saltos, entre otros, que pueden ser analizados con base en los resultados obtenidos. No obstante, este análisis aún no alcanza el ámbito de la ruta en sí ya que no introduce la multiplicidad de saltos que la define. La relación entre la distancia euclídea entre dos nodos cualesquiera de una Red Ad Hoc Inalámbrica y el número de saltos de los posibles caminos entre ellos es tratada en [De, 2005], donde se propone una aproximación al encaminamiento que tiene en cuenta la distancia mínima restante para los reenvíos. A partir

de ésta, se caracteriza la función densidad de probabilidad del progreso en un salto, derivando de ella, por una parte, el número medio de saltos para cubrir una distancia euclídea dada y, por otra, los límites de distancias que pueden ser alcanzados mediante una cantidad específica de saltos. Este número medio de saltos puede ser considerado no sólo en relación con una distancia determinada, sino con la red en general. De esta forma, en [Ravelomanana, 2004] se propone el *diámetro de la red*, expresado como el número máximo de saltos entre cualquier pareja de nodos, como medida del tamaño y conectividad de la misma. Esta métrica se formula en función del radio de cobertura de los nodos, retomando el análisis recogido en los primeros trabajos presentados en este apartado.

La observación del número de saltos en una red recae dentro de los límites del análisis de una ruta como tal. Sin embargo, este parámetro no ofrece una representación unívoca de las capacidades del encaminamiento ya que, como se muestra en [De, 2005], tan sólo puede establecerse una acotación de la relación entre el mismo y la distancia. Por este motivo, el último eslabón del estudio del encaminamiento se basa en lo concerniente a la longitud de los caminos generados en una Red Ad Hoc Inalámbrica. Éste es el objeto de [Clausen et al., 2002], que propone un modelo teórico para estimar la longitud de los caminos construidos en una red unidimensional mediante protocolos de encaminamiento que implementan el descubrimiento de ruta mediante técnicas de inundación. Bajo estas condiciones, se alcanza una relación entre la longitud del camino, L , y la distancia que separa fuente y destino, R , de la forma $L = \frac{4}{3}R$. Este trabajo es ampliado a un espacio de dos dimensiones en [Levedeb y Steyaert, 2004], que introduce una eliminación de los nodos redundantes, es decir, aquéllos cuyo antecesor en el camino se encuentra dentro del rango de cobertura de su sucesor, resultando en $L = P^* \cdot H$, donde P^* es la probabilidad de eliminación de un nodo redundante y H es el número de saltos de la ruta. Esta consideración acerca de la longitud del camino es asimismo abordada en el campo de la Teoría de Grafos. Bajo este punto de vista, no sólo se pretende el cálculo de la longitud del camino sino que, de forma adicional, se propone una métrica para la evaluación del encaminamiento, basada en estas premisas. La llamada *extensión (stretch)* del esquema de encaminamiento es definida en [Hassin y Peleg, 2000] como el valor máximo del cociente entre el camino que establece dicho esquema de encaminamiento entre dos puntos del grafo y la distancia que los separa. En consecuencia, se propone que el diseño de la red tenga en cuenta éste y otros parámetros de evaluación del encaminamiento de modo que se realice con esta orientación. Con esta filosofía, en [Abraham y Malkhi, 2004] se construye un diseño de red y un esquema de encaminamiento basado en tres etapas -ajuste de rango, división a distancia mitad y encaminamiento local- que consigue una extensión de $1 + \epsilon$.

Esta métrica es asimismo utilizada bajo el nombre de *eficiencia de camino (path efficiency)* en [Haenggi, 2005b] y [Haenggi y Puccinelli, 2005], particularizándola como la relación entre la distancia euclídea entre los nodos terminales de una comunicación y la distancia real recorrida.

Esta variable es incluida junto con el desvanecimiento Rayleigh, la probabilidad de entrega con éxito de paquetes y las distribuciones de los nodos, en el análisis del encaminamiento, afirmando que los esquemas basados en saltos largos consiguen reducciones del consumo de energía frente a los basados en saltos cortos.

Del estudio de los trabajos expuestos se observa que:

- El encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas se lleva a cabo mediante esquemas multisalto.
- El análisis del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas se fundamenta en el determinación de la distribución de probabilidad de las distancias a nivel de salto y ruta.
- Una métrica unívoca y generalizable que describe las prestación del encaminamiento es el cociente entre la distancia que separa fuente y destino y la longitud del camino establecido entre ellos.
- Los modelos teóricos presentados no son confirmados mediante una serie de experimentos exhaustivos que recuperen los resultados obtenidos de forma analítica.

1.5 Métricas empíricas y evaluación relativa del encaminamiento

El encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas es un concepto global que no se restringe al mero protocolo utilizado sino que comprende éste y las restricciones particulares impuestas por la propia red: obstáculos, potencia de transmisión de los nodos, conectividad, etc. Así, cualquier modelo teórico que pretenda caracterizar el encaminamiento debe contemplar todas las variables involucradas en el mismo. Para ello, la elección de la característica intrínseca que pueda aglutinar todas estas contribuciones resulta de suma importancia. En este sentido, la eficiencia de encaminamiento, además de ser la base de diferentes trabajos teóricos descritos en el Apartado 1.4, sirve como métrica para la evaluación experimental de protocolos y algoritmos de encaminamiento tanto de forma individual como colectiva. Las conclusiones de los mismos son obtenidas exclusivamente del análisis de los resultados producidos a partir de simulaciones, sin apoyarse en una base teórica que los justifique de forma general. Hasta donde alcanza nuestro conocimiento, no hay ninguna experiencia previa que reúna ambas perspectivas de tal forma que un marco teórico para la caracterización del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas sea soportado por experimentos que lo validen. El objetivo por tanto es el de la unión de las dos aproximaciones -teórica y práctica- con base en la eficiencia de encaminamiento.

El concepto de eficiencia utilizado en los trabajos empíricos en los que se analizan las prestaciones de protocolos de encaminamiento es expresado bajo términos diferentes:

- *Competitive ratio*. Se define como el caso más desfavorable de la relación entre el coste incurrido por un algoritmo *on-line* y el coste del caso más favorable. Esta definición puede ser particularizada al problema del encaminamiento como el cociente entre el número de pasos que necesita un algoritmo para entregar un mensaje y la longitud del camino óptimo. Esta métrica es utilizada en el contexto de los llamados algoritmos *on-line* [Borodin y El-Yaniv, 1998].
- *Path optimality*. Se obtiene mediante la relación entre el número de saltos recorridos por un paquete y el número de saltos de la ruta óptima entre fuente y destino.
- *Path stretch*. Hace referencia al cociente entre la longitud del camino recorrido y la distancia que separa los extremos del mismo.

Los dos últimos son frecuentemente utilizados en la evaluación de protocolos de encaminamiento. Como puede comprobarse, todos los términos definen métricas que describen la capacidad de dirigir paquetes a través del camino de longitud mínima, es decir, la eficiencia de encaminamiento, tal y como es entendida en la presente tesis.

En [Kuhn et al., 2003b] y [Kuhn et al., 2003a], los autores presentan un nuevo algoritmo geométrico (GOAFR) y su extensión (GOAFR+) asegurando tanto su carácter óptimo asintótico para el peor caso como su eficiencia en el caso medio. Hasta donde alcanza nuestro conocimiento, estos dos trabajos son los únicos que incluyen una aproximación teórica y práctica. Sin embargo, ambas están restringidas al uso de métricas de coste existentes para la evaluación del algoritmo propuesto, de tal forma que las afirmaciones originales se demuestran bajo esas dos perspectivas. Por consiguiente, no se presenta ningún modelo de carácter general que describa el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas. Los autores realizan simulaciones de $2 \cdot 10^3$ transmisiones entre fuentes y destinos elegidos de forma aleatoria con el objetivo de mostrar el comportamiento del encaminamiento en función de su *competitive ratio*, ahora reflejado en la métrica llamada *prestación (performance)*

$$perf_A(N, s, t) := \frac{s_A(N, s, t)}{|s_p(N, s, t)|}, \quad (1.1)$$

donde A es el algoritmo, N es la red, s_A es el número de pasos necesarios para encontrar una ruta de s a t y s_p es la longitud de salto del camino más corto. Los resultados son presentados en figuras donde las prestaciones medias se representan contra distintas densidades de nodos.

Desde que el *Dynamic Source Routing (DSR)* [Johnson y Maltz, 1996] fue propuesto en 1996, *path optimality* ha sido utilizada en multitud de evaluaciones de protocolos de encaminamiento. Con base en esta característica, este mismo grupo de investigación publica en años sucesivos un conjunto de trabajos centrados en estudios comparativos de diferentes protocolos de encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas [Broch et al., 1998], técnicas

de uso de caché [Hu y Johnson, 2000] e *Implicit Source Routing* [Hu y Johnson, 2001]. En estos tres casos, se ejecutan simulaciones mediante *ns-2* [Fall y Varadhan, 2005] de redes constituidas por 50 nodos inalámbricos móviles. Cada escenario de simulación se caracteriza por un patrón de movimiento -con una secuencia determinada de tiempos de espera de distinta duración- y un patrón de comunicación -con un número específico de fuentes de transmisión-. Los resultados relativos a *path optimality* son presentados como el cociente entre el número de paquetes enviados -absoluto o relativo- y la diferencia en número de saltos entre la ruta real y la óptima. Esta ruta óptima es calculada por el simulador durante la propia ejecución. A partir de estos resultados, los autores concluyen en [Broch et al., 1998] que los cuatro protocolos a estudio -DSR, DSDV, AODV y TORA- presentan un comportamiento ciertamente directivo, con una diferencia de cinco saltos en el peor caso, producido por TORA. En [Hu y Johnson, 2000] las ocho técnicas de uso de caché implementadas sobre DSR muestran las mismas prestaciones en términos de *path optimality*. Por último, en [Hu y Johnson, 2001] los resultados demuestran que la integración del *Implicit Source Routing* en DSR no ofrece una mejora en la eficiencia del protocolo. Es reseñable que estos tres trabajos muestren comportamientos muy similares entre los protocolos o técnicas estudiados en relación con el encaminamiento desde la perspectiva de *path optimality*. Este hecho sugiere que el diseño de las simulaciones llevadas a cabo puede no ser el adecuado para revelar las prestaciones reales del encaminamiento con la precisión requerida.

Siguiendo los mismos criterios de los trabajos anteriores para la presentación de resultados y la comparación de técnicas relativas al encaminamiento, en [Osipov y Tschudin, 2004] se introduce un método de petición de ruta con el objetivo de aumentar *path optimality*. Una vez más, los autores usan *ns-2* para simular una red con 22 nodos fijos, emplazados a lo largo de dos anillos y un nodo central, más un nodo móvil con diferentes velocidades que describe un tercer anillo concéntrico. En este escenario no es necesario calcular el número de saltos del camino óptimo ya que es siempre 3. Se realizan simulaciones de tres protocolos -DSR, AODV y LUNAR- con algunos cambios relacionados con su procedimiento de petición de ruta. Los resultados presentan la cantidad de paquetes enviados a través de rutas con distinto número de saltos. En este caso, dos protocolos -DSR y LUNAR.15- muestran pobres comportamientos. No obstante, estos resultados no pueden ser fácilmente generalizados debido al bajo número de transmisiones entre fuente y destino $\approx 10^4$ y la particular colocación de los nodos en la red utilizada para el experimento.

Entre el grupo de trabajos que usan *path optimality* en estudios comparativos de las prestaciones de protocolos de encaminamiento, existe otra tendencia para la presentación de resultados de simulaciones en la que esta métrica se muestra frente a distintos tiempos de espera. Este tipo de representación parece especialmente adaptada para el análisis del impacto de la velocidad de los nodos en la eficiencia de encaminamiento de los protocolos. Por la

misma razón, no se estima especialmente apropiada para revelar los detalles intrínsecos del propio encaminamiento. En [Reddy y Reddy, 2006] se realiza una vez más una comparación entre DSDV, DSR, AODV y TORA en función de su *path optimality* entre otras métricas. Los autores utilizan ns-2 para simular una red de 50 nodos moviéndose de acuerdo con distintos escenarios de tiempos de espera en el rango de $[0, 200]$ ms. Los resultados muestran diferencias en cierto modo significativas entre los protocolos bajo análisis y, en algunos casos, entre los tiempos de espera de cada protocolo individual, pero sin una tendencia obvia. En [Talooki y Ziarati, 2006], se realiza el mismo tipo de experimentos sobre los mismos cuatro protocolos. Los parámetros originales son restringidos a 40 nodos y unos tiempos de espera en el intervalo $[0, 100]$. La única diferencia apreciable es el uso de *weighted path optimality*, que añade al cálculo del cociente original un término relacionado con el número de paquetes transmitidos a través de una ruta específica. Estas simulaciones producen resultados similares a los del trabajo previo excepto por el hecho de que AODV y DSR cambian sus posiciones en la clasificación de los protocolos en función de sus prestaciones.

Otros trabajos que utilizan *path optimality* para evaluar las prestaciones de nuevas estrategias relacionadas con el encaminamiento también adoptan la representación de resultados contra tiempos de espera. En [Li y Mohapatra, 2003], los autores proponen PANDA, un algoritmo de descubrimiento de ruta. A través de simulaciones con ns-2 en las que PANDA es integrado en DSR, llevan a cabo experimentos en redes con 100 nodos móviles con base en tiempos de espera en el rango de $[0, 500]$ ms. Los resultados demuestran que el nuevo algoritmo aumenta *path optimality* en comparación con la aproximación del retardo aleatorio del reenvío (*Random Rebroadcast Delay*). En [Wang y Zhang, 2005], se propone un método de reenvío de paquetes con dos potencias de transmisión distintas en función de la posición de los vecinos. Los experimentos son ejecutados mediante un simulador desarrollado específicamente y consisten en una red con distintas densidades de hasta 100 nodos móviles. Los resultados muestran cómo esta nueva estrategia ofrece una mejora en términos de *path optimality* respecto a técnicas similares como *4-direction forwarding* y *8-direction forwarding*. Desafortunadamente, el uso de un simulador particular y la falta de información sobre los parámetros seleccionados para las simulaciones hace imposible la reproducción y comparación de los resultados ofrecidos.

Por último, siguiendo la línea expresada en el párrafo anterior, existe un conjunto de trabajos que utilizan *path stretch* como métrica para la evaluación de las prestaciones de nuevos protocolos propuestos. En [Eriksson et al., 2007] se propone la utilización de direccionamiento dinámico para conseguir preservar el comportamiento del encaminamiento ante aumentos en el tamaño de la red, teniendo en cuenta la movilidad de los nodos. Así, se realizan experimentos de redes de hasta 1000 nodos, con una media de 8 vecinos, que siguen un patrón de movimiento basado en tiempos de espera de hasta 100 segundos. Para ello se hace uso

de ns-2 y un simulador propio empleado para los casos de redes extensas. En los escenarios implementados para el estudio del *path stretch*, el tamaño de las redes varía entre 125 y 1000 nodos. No obstante, tan sólo se realizan transmisiones entre 1000 parejas lo que se antoja insuficiente para obtener datos con significatividad estadística. Dado que el objeto principal de los experimentos es mostrar la conservación de las prestaciones del protocolo frente a incrementos en el número de nodos en la red, el *path stretch* se muestra en relación con este parámetro. Un segundo grupo de trabajos se centra en el encaminamiento geográfico para proponer mejoras a los algoritmos ya existentes. En [Cheng et al., 2006] los autores presentan ORRP, cuyo fundamento es el uso de comunicaciones direccionales en redes malladas. De esta forma, se consigue eliminar los procedimientos basados en inundación durante las fases de descubrimiento de red o diseminación. Sin embargo, se incurre en ineficiencias en términos de *path stretch*, aunque se afirma que no son significativas en comparación con el camino óptimo posible. Las simulaciones son llevadas a cabo mediante ns-2 y Matlab donde se recrean tres topologías de tipo cuadrado, circular y rectangular. Los resultados se presentan sombreando las distintas regiones en función de los valores recogidos para la métrica considerada. Se debe señalar que la evaluación comparativa de los mismos no es posible al no estar disponibles las variables fundamentales utilizadas durante el experimento. Finalmente, en [Leong et al., 2005] se presenta un estudio comparativo de distintos protocolos de encaminamiento geográfico: GPSR, OPVFR y GPVFR. Los experimentos son implementados mediante un simulador propio y muestran que OPVFR ofrece el mejor comportamiento en redes con una baja densidad de nodos, mientras que GPVFR mantiene unas prestaciones aceptables y muy superiores a GPSR en esta zona, que tienden a óptimas a partir de 8 nodos por disco unidad. Una vez más, la valoración de los datos obtenidos y su recuperación son inviables dada la ausencia de información sobre los parámetros de diseño seleccionados y el uso de un simulador específico.

A partir de los trabajos revisados, pueden extraerse dos conclusiones fundamentales:

- Existe una clara separación entre trabajos teóricos y empíricos lo que conlleva que los estudios experimentales arrojen tan sólo resultados relativos, útiles para establecer comparaciones entre distintos escenarios de encaminamiento, pero que no son capaces de alcanzar conclusiones absolutas que requieren estar soportadas por un modelo teórico. Asimismo, se constata una carencia de confirmaciones experimentales de los modelos teóricos propuestos en el Apartado 1.4.
- Los resultados generados no son fácilmente reproducibles ni muestran de manera apropiada las características esenciales del encaminamiento. Por ello deben tenerse en cuenta algunas consideraciones durante el diseño de las simulaciones para solventar este problema.

1.6 Motivación y organización de la tesis

Como ha quedado reflejado en los apartados anteriores, existe un evidente interés y una clara proyección del campo de las Redes Ad Hoc Inalámbricas. Asimismo, se observa la trascendencia del encaminamiento para la optimización del rendimiento en la operación de dichas redes. Por estos motivos, se ha llevado a cabo una multitud de iniciativas con dos objetivos independientes: por una parte el estudio de distintos aspectos relacionados con las Redes Ad Hoc Inalámbricas y su encaminamiento y, por otro, la propuesta de una gran cantidad de protocolos de encaminamiento cuyas prestaciones son establecidas, de forma relativa, en comparación con las de otros ya existentes.

Los trabajos teóricos fundamentan sus bases en diversos enfoques de investigación que generan importantes resultados dentro de su ámbito como los presentados durante este capítulo introductorio. No obstante, en ellos se desarrollan modelos particulares de diferentes características de la red para la obtención de conclusiones parciales sobre factores particulares del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas. Así, como se detalla en el Apartado 1.4, se aportan modelos de distribución de nodos y distancias, de enlace o de interferencia entre otros. Estos modelos son aplicados específicamente para extraer conclusiones acerca de aspectos concretos como la conveniencia del empleo de saltos cortos o largos dentro de la estrategia de encaminamiento. En consecuencia, es necesario un marco teórico para la evaluación objetiva del encaminamiento, bajo cualesquiera circunstancias, en pie de igualdad. Asimismo, este marco teórico debe proporcionar resultados a nivel tanto cualitativo como cuantitativo. Por consiguiente, se establece la siguiente Hipótesis de Partida y Objetivo de la tesis:

Hipótesis de Partida 1: *Posibilidad de existencia de un modelo genérico que describa el encaminamiento con base en un parámetro o conjunto de parámetros característicos.*

Objetivo 1: *Desarrollo de un modelo teórico que caracterice el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas a través de un solo parámetro representativo del mismo.*

Por otra parte, hasta donde alcanza nuestro conocimiento, las conclusiones extraídas a través de los trabajos teóricos previos no son confirmadas empíricamente. Esta independencia de los ámbitos teórico y experimental hace que ambos no se vean beneficiados por las contribuciones del otro. De esta forma, los estudios teóricos no tienen acceso a las particularidades que surgen de la práctica, que concretan el planteamiento genérico sobre el que se construyen. Al mismo tiempo, los resultados experimentales no pueden ser extrapolados como principio general a no ser que se apoyen en una descripción formal de carácter universal. Por este motivo, esta tesis incluye como Hipótesis de Partida y Objetivo:

Hipótesis de Partida 2: *La validación de los modelos teóricos se restringe al ámbito analítico. Por tanto, en la mayor parte de los casos no se aporta una constatación empírica de los principios teóricos establecidos.*

Objetivo 2: *Realización de un conjunto de experimentos que validen o falseen desde el punto de vista empírico el modelo teórico desarrollado en el Objetivo 1.*

Finalmente, para la evaluación de distintas estrategias, protocolos o algoritmos de encaminamiento y diferentes técnicas asociadas al mismo, se requiere que dichos experimentos hayan seguido unos criterios similares que, por tanto, conduzcan a unos resultados directamente comparables. En la práctica existe una importante heterogeneidad en la implementación de experimentos en el campo de las Redes Ad Hoc Inalámbricas que hace especialmente dificultosa la evaluación conjunta de los mismos y su reproducción. Por consiguiente, se contemplan la Hipótesis de Partida y Objetivo indicados a continuación:

Hipótesis de Partida 3: *La evaluación de resultados experimentales referentes al encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas no es posible en la mayor parte de los casos, al carecer de un procedimiento general de diseño de experimentos que establezca un marco común de comparación.*

Objetivo 3: *Creación de una metodología global para el diseño de experimentos que establezca unos criterios generales que produzcan resultados comparables.*

La presente tesis se estructura con base en las hipótesis de partida y objetivos descritos anteriormente. El Capítulo 2 se centra en la Hipótesis de Partida 1 y el Objetivo 1, desarrollando un modelo que caracteriza el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas en función de un parámetro, el llamado radio de persistencia, que incluye las contribuciones de los distintos factores involucrados en el mismo. En el mismo, se presentan como resultado las distintas distribuciones extremo a extremo de la eficiencia de encaminamiento en función de distintos valores de dicho radio de persistencia.

Este modelo de encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas es confirmado empíricamente en el Capítulo 3, en función del Objetivo 2 referente a la Hipótesis de Partida 2. Los experimentos realizados para dicha confirmación siguen una metodología genérica propuesta expresamente para su diseño según lo indicado en la Hipótesis de Partida 3 y Objetivo 3.

El grado de consecución de los objetivos definidos y las conclusiones que se derivan de los mismos, así como las líneas futuras de investigación que se abren a partir del marco teórico-práctico propuesto, son expuestas en el Capítulo 4.

Modelo teórico

El encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas es de vital importancia para las prestaciones ofrecidas por ellas. Por este motivo, el estudio del mismo ocupa un lugar preferente en la investigación en este campo. La componente teórica de dicho estudio se hace al mismo tiempo imprescindible debido a la carga computacional que requieren los experimentos basados en simulación, para alcanzar representatividad estadística en sus resultados. En consecuencia, es necesario el desarrollo de modelos teóricos que sean capaces de caracterizarlo.

Una de las premisas fundamentales a cumplir por un modelo teórico es su generalidad, entendida como la capacidad de ser aplicado a toda una clase de fenómenos que muestren una determinada particularidad [Hardy, 1992]. En este sentido, el modelo que describa el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas debe contener todos los factores que influyen en el mismo independientemente de su naturaleza o, en otros términos, de la capa OSI a la que pertenezcan, tal y como se detalló en el Capítulo 1.

Asimismo, dicho modelo debe ser construido con base en una variable medible que represente el aspecto fundamental del fenómeno a modelar. En concreto, en el caso que nos ocupa, el parámetro elegido para la caracterización del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas es la capacidad de dirigir la información desde la fuente al destino a través del camino más cercano a la línea recta que une los dos extremos. Como ya se ha adelantado, esta capacidad es denominada eficiencia de encaminamiento. Desde la misma, pueden derivarse conclusiones acerca de otros parámetros relacionados con éste como retardo o tasa de transferencia, pero éstos no definen la operación intrínseca del encaminamiento.

A partir de estas bases se propone por tanto un modelo teórico que describe el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas en sí mismo sobre una métrica genérica y medible que lo caracteriza de forma cualitativa y cuantitativa, recogiendo las contribuciones de todos los factores que intervienen en el mismo. Además, este modelo es validado empíricamente mediante los experimentos que se detallan en el Capítulo 3, lo que supone una nueva aportación en el campo de investigación tratado. Este modelo teórico está basado en la evaluación de la probabilidad de existencia de un camino con una eficiencia dada, mediante los principios relativos a la integral de camino [Feynman y Hibbs, 1965]. La aportación principal del capítulo actual de la presente tesis es la aplicación de los mismos en el ámbito del encaminamiento en

Redes Ad Hoc Inalámbricas, con las consiguientes interpretaciones particulares de aquéllos y la generación de nuevas variables relativas al caso particular a estudio.

El desarrollo del presente capítulo comienza con la enumeración de las premisas de partida sobre las que se construye el modelo teórico, junto con una serie de consideraciones generales. En éstas últimas se formalizan los conceptos de *ruta y eficiencia de encaminamiento* y su representación en función de su distribución estadística, la llamada *distribución extremo a extremo* (DEaE), así como la herramienta matemática para obtener dichas distribuciones, la *integral de camino*. Esta primera aproximación a la solución del problema es a continuación refinada mediante la inclusión de las dos características específicas del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas que lo concretan: la existencia de una serie de direcciones preferenciales y la movilidad de los nodos. Consiguientemente, se añaden al modelo genérico los modelos de *directividad y movilidad* respectivamente. Sobre estas bases se presenta la expresión de la DEaE particularizada para cada tipo de encaminamiento posible: *aleatorio* (EA), *dirigido* (ED) y *óptimo* (EO), observando la aparición de una relación directa entre el conocimiento espacial de la red que tienen sus nodos y la directividad. Con el objetivo de obtener ecuaciones evaluables analíticamente se recurre a los *momentos* de las expresiones de las DEaE en cada caso. Estos momentos son caracterizados por un parámetro denominado *radio de persistencia*, ξ , que engloba las variables de directividad y movilidad antes presentadas. Finalmente, todas las expresiones obtenidas son extendidas al caso de Redes Ad Hoc Inalámbricas de *gran escala*, presentando los resultados teóricos de las DEaE para 2 y 3 dimensiones, y concluyendo con determinados comentarios sobre los mismos.

2.1 Consideraciones generales

El primer dato de partida para la construcción de un modelo teórico sobre el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas es la definición de la propia red. Así, una Red Ad Hoc Inalámbrica se entiende como un conjunto de nodos distribuidos de forma aleatoria en un espacio D -dimensional. En la misma, la comunicación puede ser generada por cualquier nodo de la red, que actúa por tanto como fuente, hacia cualquier otro nodo, que asume el papel de destino. Dicha comunicación se produce mediante un esquema multisalto en el que los datos son retransmitidos por una serie de nodos intermedios hasta alcanzar este último.

Bajo estas premisas básicas, una ruta establecida entre una fuente \mathbf{x}_0 y un destino \mathbf{x}_H es concebida como una cadena de H saltos de distancia media a . Según puede apreciarse en la Figura 2.1 esta ruta se caracteriza mediante dos magnitudes vectoriales: por una parte, la suma de los vectores de cada salto, $\mathbf{L} = \sum_{h=1}^H \Delta\mathbf{x}_h$, y, por otra, la separación entre fuente y destino, $\mathbf{R} = \mathbf{x}_H - \mathbf{x}_0$. De esta forma, el encaminamiento se describe mediante su capacidad de encontrar rutas desde la fuente hasta el destino cuya longitud $L = \sum_{h=1}^H |\Delta\mathbf{x}_h|$ sea

lo más próxima posible a la distancia euclídea $R = |\mathbf{R}|$ que separa ambos extremos. Esta métrica, expresada como el cociente R/L , es utilizada para la determinación de la *eficiencia de encaminamiento*.

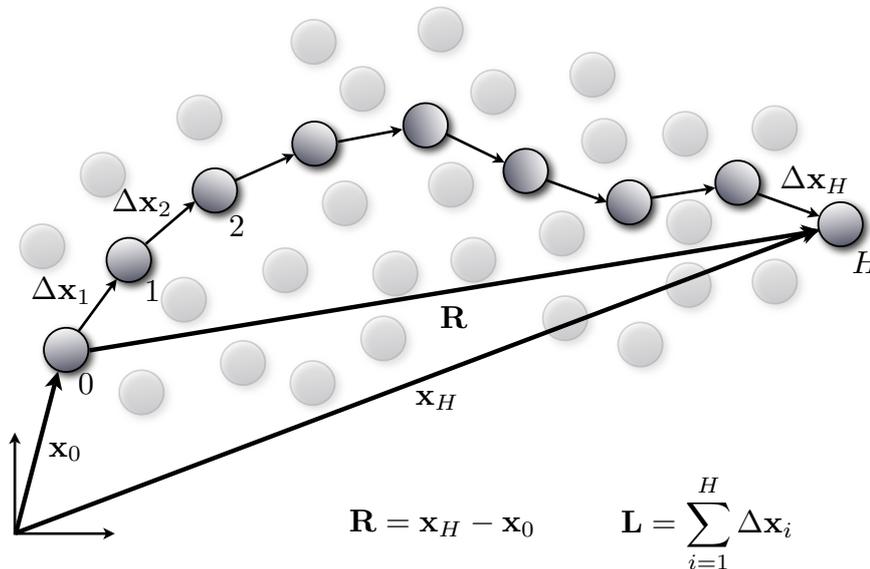


Figura 2.1 : Ruta en una Red Ad Hoc Inalámbrica compuesta por H saltos $\Delta \mathbf{x}_i$ que conectan la fuente \mathbf{x}_0 y el destino \mathbf{x}_H .

El conjunto de todas las rutas posibles dentro de una red bajo sus condiciones particulares de topología, protocolo de encaminamiento, patrón de movilidad, rango de cobertura de los nodos, interferencia y, en definitiva, cualquier variable que incide en el encaminamiento, da lugar a toda la serie de valores del cociente R/L que lo caracterizan en el supuesto a estudio. La representación general de este conjunto de valores viene dada mediante su distribución estadística, descrita a través de una función densidad de probabilidad con soporte compacto en el intervalo $[0, 1]$. Esta distribución estadística resultante será denominada *Distribución Extremo a Extremo* (DEaE).

Dado que la DEaE debe contener la contribución de cada camino posible de H saltos desde fuente a destino, su obtención requiere un método que contemple esta suma sobre todas las rutas posibles. Este problema encuentra solución en la teoría cuántica a través de la llamada *integral de camino*. El cálculo de la DEaE mediante los principios de la integral de camino proporciona por tanto el fundamento genérico para su determinación. Esta primera fase de la construcción de la DEaE es tratada en el Apartado 2.2.

Nótese que dentro del cálculo de la amplitud de probabilidad no se tiene en cuenta la existencia de posibles direcciones preferentes. Este procedimiento no refleja en su totalidad la realidad del encaminamiento, en el que los distintos factores involucrados -principalmente

protocolo y topología- inducen ciertas tendencias en la elección del nodo hacia el que enviar la información en cada salto. Por este motivo, el modelo debe añadir un parámetro más que represente este hecho: la directividad. La formulación de dicha directividad queda recogida en el Apartado 2.3.

Por su parte, el rasgo diferenciador de las Redes Ad Hoc Inalámbricas referente a su carácter dinámico requiere ser expresamente contemplado dentro del modelo teórico. Consiguientemente, la movilidad de los nodos es asimismo descrita e incluida en el mismo. El modelo de movilidad se expone en el Apartado 2.4.

2.2 Fundamento genérico de la DEaE: la integral de camino

Tal y como se introduce en el apartado anterior, la DEaE contiene la representación estadística de todos los valores posibles de R/L en el caso a estudio. La búsqueda de los mismos comienza, por tanto, por la determinación del conjunto de caminos que podrían establecerse entre cualquier pareja F-D de la red. Esta base genérica aún no contiene la información sobre el encaminamiento procedente de las restricciones impuestas por las distintas variables que intervienen en el mismo. Bajo este punto de vista, estas variables seleccionan el grupo particular de caminos posibles bajo las condiciones específicas a estudio. Por consiguiente, esta primera aproximación a la DEaE supone un punto de partida óptimo para abordar la construcción de la misma de forma secuencial, en la que las distintas peculiaridades del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas son añadidas a esta base fundamental en fases posteriores.

Dado el carácter genérico de este estadio del modelo, se debe recurrir a una herramienta que contemple el conjunto de todas las rutas posibles entre fuente y destino sin excepción. La integral de camino [Kleinert, 2004] incluye esta característica. Su fundamento es la determinación de la amplitud de probabilidad de que una partícula cuántica que parte de una posición x_a en un tiempo τ_a se encuentre en una posición x_b en un tiempo τ_b . Por consiguiente, se tienen en consideración todas las posibles trayectorias de uno a otro punto. La analogía con el caso del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas es directa ya que, tal y como se ha planteado, en esta primera fase del estudio el objetivo es determinar todas las posibles rutas entre una fuente y un destino determinados.

Este conjunto del total de rutas entre fuente y destino puede ser determinado a través de una distribución de probabilidad del vector \mathbf{R} que contemple las contribuciones de cada salto, Δx_h . La obtención de dicha distribución se parte de las siguientes premisas:

1. Todos los saltos son de longitud a . Esta restricción se impone en primera instancia para la reducción de la complejidad analítica. En el ámbito de las Redes Ad Hoc Inalámbricas puede ser asumida admitiendo una densidad homogénea de nodos que permita una aproximación a dicho valor a a partir de un número suficiente de los mismo. Durante

el desarrollo de esta tesis se procede a la relajación de esta premisa mediante la consideración de espacio continuo que es tratada en el Apartado 2.6. Por su parte, los experimentos recogidos en el Capítulo 3 incluyen variaciones de distinta magnitud en las distancias de salto para comprobar la validez de la presente asunción.

2. La dirección de cada salto es independiente de la del resto. Cada uno de los H saltos es implementado sin una dirección preferente, formando la ruta que conecta fuente y destino.
3. El destino se alcanza mediante H saltos. De esta forma, el vector \mathbf{L} que caracteriza la ruta a través de H saltos $\Delta\mathbf{x}_h$ coincide con el que une fuente y destino, \mathbf{R} .

Las anteriores premisas pueden expresarse como:

1. Saltos de longitud a :

$$\delta(\Delta\mathbf{x}_h - a) \quad (2.1)$$

donde δ es la delta de Dirac.

2. Direcciones independientes:

$$P(\{\Delta\mathbf{x}_h\}) = \prod_h P(\Delta\mathbf{x}_h) \quad (2.2)$$

3. Destino alcanzado en H saltos:

$$P(\mathbf{R} | \{\Delta\mathbf{x}_h\}) = \delta(\mathbf{R} - \sum_h \Delta\mathbf{x}_h) \quad (2.3)$$

A partir de estas premisas, la distribución $P_H(\mathbf{R})$ se obtiene integrando sobre todas las direcciones posibles de cada salto, lo que en D dimensiones resulta en:

$$P_H(\mathbf{R}) = \left(\frac{1}{S_D a^{D-1}} \right)^H \int d^D \Delta\mathbf{x}_1 \delta(|\Delta\mathbf{x}_1| - a) \int d^D \Delta\mathbf{x}_2 \delta(|\Delta\mathbf{x}_2| - a) \dots \int d^D \Delta\mathbf{x}_H \delta(|\Delta\mathbf{x}_H| - a) \delta^D(\mathbf{R} - \sum_{h=1}^H \Delta\mathbf{x}_h) \quad (2.4)$$

donde S_D denota la superficie de una esfera unidad en D dimensiones. Este término forma parte del factor de normalización $1/(S_D a^{D-1})$, que se introduce debido a que los ángulos descritos según la asunción del presente estadio de construcción de la DEaE tienen la misma probabilidad.

La Ecuación 2.4 contiene las contribuciones de cada uno de los H saltos de longitud a de cualquier ruta que conecta fuente y destino separados según \mathbf{R} . Por ello, se ha de señalar

una vez más que, en este punto del desarrollo, aún no se ha introducido la componente de directividad impuesta por variables como la topología de la red o el protocolo de encaminamiento. Por este motivo, la expresión recogida en la Ecuación 2.4 representa la DEaE de un encaminamiento que es referido en la presente tesis como *encaminamiento aleatorio* y su DEaE es denotada como $P_H^{EA}(\mathbf{R})$.

2.3 Modelo de directividad

El siguiente paso en la construcción del modelo teórico propuesto para la caracterización del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas es refinar la aproximación genérica descrita en el apartado anterior mediante la inclusión de direcciones preferentes inducidas por los distintos factores que participan en dicho encaminamiento. Este conjunto de factores se engloba en el término *directividad* ante la ausencia de una voz aprobada por la Real Academia Española que se ajuste a su definición. Así, la directividad es entendida como el mantenimiento en cada salto de la dirección trazada previamente. Por consiguiente, su caracterización requiere la construcción de un parámetro que refleje las variaciones en dicha dirección de la ruta. Esta construcción parte de la definición de la propia ruta como una función continua y derivable, dependiente de un único parámetro, $\mathbf{r}(s)$. Para determinar la desviación en cada salto respecto de la dirección trazada previamente se hace uso del vector unitario tangente a la misma, que puede expresarse como $\mathbf{u}(s) = \partial\mathbf{r}(s)/\partial s$. Por último, la variación de estas desviaciones es determinada a través de la derivada parcial del vector unitario tangente $\partial\mathbf{u}(s)/\partial s$.

A partir de la misma, se construye un funcional cuadrático de una ruta de longitud que toma la forma de una cierta “energía de la ruta” de la forma

$$E^L = \int_0^L \frac{\kappa}{2} \left(\frac{\partial\mathbf{u}(s)}{\partial s} \right)^2 ds \quad (2.5)$$

donde κ se define como la *constante de rigidez*.

Esta energía expresa el carácter sinuoso o recto de dicha ruta. Por consiguiente, la energía de una ruta da idea de cuán cerca se encuentra de la línea recta que une fuente y destino. En la Ecuación 2.5, dicha energía depende de dos términos de directividad referentes a ámbitos distintos. El primero de ellos, $(\partial\mathbf{u}(s)/\partial s)^2$, se refiere a los cambios de trayectoria en cada punto de la ruta. Así, puede hablarse de *directividad de ruta* ya que se ciñe al ámbito de la misma. Por su parte, el segundo es el representado por la constante κ . Este factor engloba la directividad impuesta por las condiciones genéricas del caso a estudio, en lo que puede denominarse la *directividad del escenario*. En él se incluyen componentes relativas al protocolo, la topología de la red y la propagación.

$$\kappa = \kappa_{\text{prot}} + \kappa_{\text{topol}} + \kappa_{\text{propag}} \quad (2.6)$$

El valor de κ genera un volumen entre fuente y destino, caracterizado por un determinado radio, en el que se confinan los caminos posibles entre una y otro en función de su energía. Valores altos de la directividad generan tamaños reducidos del radio de dicho volumen, que indican que la mayor parte de las rutas describe una trayectoria muy próxima a la línea recta que une una fuente y destino.

Estas consideraciones son tenidas en cuenta en la construcción de la expresión de la DEaE de tal forma que la eficiencia de encaminamiento en un escenario dado sea directamente proporcional a su directividad.

Por otra parte, dado que la ruta no es continua, $\partial \mathbf{u}(s)/\partial s$ debe sustituirse por la diferencia entre los vectores unitarios, \mathbf{u} , que especifican la dirección de cada conexión entre dos nodos consecutivos $h - 1$ y h . Estos vectores unitarios de cada salto del camino resultan de la normalización por a de los vectores $\Delta \mathbf{x}_h$ definidos en el Apartado 2.1. El funcional original se transforma por tanto en

$$E^H = \frac{\kappa}{2a} \sum_{h=1}^H (\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_{h-1})^2 . \quad (2.7)$$

Con base en la nomenclatura utilizada, el vector de distancia extremo a extremo se define como

$$\mathbf{R} \equiv \mathbf{x}_H - \mathbf{x}_0 = a \sum_{h=1}^H \mathbf{u}_h . \quad (2.8)$$

2.4 Modelo de movilidad

El carácter dinámico de las Redes Ad Hoc Inalámbricas tiene en la movilidad de los nodos uno de sus principales exponentes. Asimismo, esta movilidad impone restricciones importantes para el encaminamiento que obligan a incluirlo dentro del modelo teórico que lo caracteriza.

Con este fin, se presenta un modelo de movilidad de los nodos en una Red Ad Hoc Inalámbrica. El objetivo principal es la caracterización de la dependencia del encaminamiento con la movilidad de los nodos en este tipo de redes. Por consiguiente, la aspiración de este modelo de movilidad no es la representación detallada de todos los aspectos que impactan en la misma sino su influencia en el encaminamiento.

En este sentido, se pretende conseguir reducir la descripción de la movilidad de los nodos a un solo parámetro conservando en todo momento el carácter analítico del modelo. De esta forma, se consigue una descripción sencilla de la movilidad presente en una Red Ad Hoc Inalámbrica que, no obstante, es capaz de preservar el grado de generalidad del modelo de encaminamiento en el que se incluye.

La representación de la movilidad y su impacto en el encaminamiento de Redes Ad Hoc Inalámbricas con base en un único factor implica centrar el desarrollo en los rasgos característi-

cos de dicha movilidad a nivel de red. Así, no se tiene la pretensión de describir el movimiento de cada nodo sino la movilidad de la red en promedio.

Como respuesta las premisas anteriores se recurre a la mecánica estadística [Huang, 1987] para la construcción del modelo de movilidad deseado. Esta disciplina estudia el comportamiento en equilibrio de un sistema molecular macroscópico a partir de la aplicación de la Estadística y la Mecánica tradicional al ámbito microscópico. Su postulado fundamental expresa que “*un sistema aislado en equilibrio se encuentra con igual probabilidad en cualquiera de los microestados accesibles*”.

La elección de la mecánica estadística como base para el modelo de movilidad propuesto para Redes Ad Hoc Inalámbricas conlleva una serie de asunciones:

- *El movimiento de los nodos en una Red Ad Hoc Inalámbrica es análogo al de las partículas en un sistema.* Aunque, evidentemente, esta afirmación no se cumple en el global de los detalles, puede resultar válida para representar la movilidad de una Red Ad Hoc Inalámbrica bajo un modelo genérico y bien conocido. De hecho, obviando pormenores como la existencia de choques entre partículas, este modelo se aproxima ciertamente a uno de los más utilizados en este tipo de redes: el *Random Waypoint*. Este modelo se propone en [Johnson y Maltz, 1996] aunque toma este nombre en [Broch et al., 1998]. El movimiento de los nodos se describe como una serie de traslaciones en línea recta y con velocidades constantes hacia puntos seleccionados de forma aleatoria e independiente de las trayectorias anteriores. La asunción planteada es, si cabe, más genérica ya que no impone las restricciones de movimientos rectilíneos y velocidades constantes.
- *Los nodos están confinados en un volumen determinado.* Una red de comunicaciones debe asegurar su conectividad. Esta necesidad conlleva que los nodos de la misma deban marcar un límite para su movimiento. Por ello, esta asunción se observa válida para el caso de las Redes Ad Hoc Inalámbricas.
- *El sistema es aislado.* Esta propiedad implica que la energía es una constante del movimiento, es decir, no depende de otros factores. Esta asunción es a todas luces ideal. Sin embargo, no hace sino ceñir las conclusiones que sean alcanzadas al ámbito exclusivo de la movilidad lo que encaja en el objetivo planteado para este modelo.
- *La energía cinética se mantiene constante.* La conservación de la energía también es una premisa ideal, que, no obstante, genera resultados consistentes.
- *Impenetrabilidad de los nodos.* Los nodos tienen un volumen y una densidad y, al confluir varios en un mismo punto, colisionan. Evidentemente, esta característica es representativa de cualquier tipo de nodo físico.

- *El sistema está en equilibrio.* El equilibrio del sistema conlleva que existe la misma probabilidad de encontrarlo en cualquiera de los microestados disponibles para la energía. De esta forma, el macroestado más probable es el asociado a un mayor número de microestados. El equilibrio conlleva la ausencia de una dirección preferente en el sistema. La condición de equilibrio se selecciona como primera aproximación al problema. El tratamiento de cualquier estado transitorio siempre introduce una complejidad añadida y, por tanto, es pertinente que sea abordado una vez se haya alcanzado un nivel de conocimiento suficiente de las condiciones estacionarias.

A partir de estas premisas se puede inferir el movimiento global de los nodos en una Red Ad Hoc Inalámbrica con base en la función de distribución de probabilidad de los nodos en un volumen determinado dependiendo de su energía cinética. Este desarrollo desemboca finalmente en la distribución de Maxwell-Boltzmann mediante la cual es posible derivar directamente las velocidades promedio de los nodos, que, en este caso coinciden con la velocidad media del sistema. Asimismo, se deriva la representación de dichas velocidades a través de un solo parámetro, β , que puede, por consiguiente, ser utilizado para la caracterización del movimiento en el modelo de encaminamiento de Redes Ad Hoc Inalámbricas propuesto.

2.4.1 Función de distribución de celda

Como premisa de partida para dicho desarrollo se considera una función de distribución arbitraria de N nodos encerrados en un volumen V . Asumiendo la igualdad de los mismos, su masa puede ser considerada igual a 1 sin pérdida de generalidad; de esta forma, se evita la inclusión de una constante en el desarrollo matemático que tan sólo afecta como un parámetro de renormalización. Para la construcción de la función de distribución de un nodo, se define un espacio de fases (espacio- μ) descrito por la posición, \mathbf{x} , y la velocidad, \mathbf{v} de dicho nodo. Dado que los valores de posición y velocidad son finitos, éste se verá confinado en una región finita de este espacio de fases. Sea esta región finita del espacio- μ cubierta por K celdas de volumen $\omega = d^3x \cdot d^3v$, con K de valor elevado. Así, la celda i -ésima contiene un número de nodos n_i tal que

$$\sum_{i=1}^K n_i = N \quad (2.9)$$

$$\sum_{i=1}^K \epsilon_i n_i = E_c, \quad (2.10)$$

donde ϵ_i es la energía cinética del nodo en la celda i -ésima y E_c es la suma de la energía cinética en cada celda

$$\epsilon_i = \frac{v_i^2}{2}, \quad (2.11)$$

donde v_i es la velocidad del nodo.

Por consiguiente, un conjunto arbitrario de enteros $\{n_i\}$ que satisfagan las Ecuaciones 2.9 y 2.10 define una función de distribución arbitraria. El valor de dicha función particularizada para la celda i -ésima, f_i , es

$$f_i = \frac{n_i}{\omega} . \quad (2.12)$$

A partir de esta función de distribución de cada celda se obtiene la función distribución de equilibrio del conjunto de celdas, mediante su promedio sobre el conjunto microcanónico, es decir, sobre el total del sistema que cumple las premisas de partida recogidas en el comienzo del presente apartado. Este conjunto microcanónico asigna el mismo peso a cada sistema que satisface las Ecuaciones 2.9 y 2.10.

$$\bar{f}_i = \frac{\langle n_i \rangle}{\omega} . \quad (2.13)$$

2.4.2 Función de distribución global

Una vez caracterizada la función de distribución de un nodo, es necesario extenderla hasta el total de nodos de la red, N . En este punto debe señalarse que, si el estado del conjunto de nodos es conocido, f es unívocamente determinada. Sin embargo, dada una determinada f , el estado del conjunto de nodos no puede ser unívocamente determinado, es decir, un intercambio de la posición y velocidad entre dos nodos cualesquiera no modifica la función de distribución. Así, siguiendo un razonamiento similar al utilizado para el caso de un solo nodo, se define un espacio- Γ que caracteriza el conjunto global de nodos. La función de distribución f en este caso no corresponde a un punto sino a un volumen en el espacio- Γ , que es denominado el *volumen ocupado por f* . Se asume que la función de distribución de equilibrio es la función de distribución más probable, lo que implica que es la que ocupa el mayor volumen en el espacio- Γ . La construcción de la expresión para dicha función de distribución parte, por tanto, de la elección de un conjunto arbitrario $\{n_i\}$ que genera una función de distribución arbitraria. Sobre esta base se calcula el volumen que ocupa considerando el número de sistemas del conjunto que muestran estos valores de ocupación. Finalmente se selecciona la variación de la función de distribución original que maximiza dicho volumen.

Sea $\Omega \{n_i\}$ el volumen del espacio- Γ ocupado por la función de distribución correspondiente a $\{n_i\}$. De acuerdo al mismo planteamiento presentado para el caso de un solo nodo, este volumen es proporcional al número de posibilidades de distribuir N nodos en K celdas de tal forma que la celda i -ésima contenga n_i nodos. Consiguientemente

$$\Omega \{n_i\} = \frac{N!}{n_1!n_2!n_3! \cdots n_K!} . \quad (2.14)$$

Tomando el logaritmo en la ecuación previa se obtiene

$$\log \Omega \{n_i\} = \log N! - \sum_{i=1}^K \log n_i! + \text{constante} . \quad (2.15)$$

Mediante la asunción de que n_i es un número entero elevado, lo que encaja con la filosofía genérica de las Redes Ad Hoc Inalámbricas, puede utilizarse la aproximación de Stirling

$$\log n_i! \approx n_i \log n_i - n_i , \quad (2.16)$$

que resulta en

$$\log \Omega \{n_i\} = N \log N - N - \sum_{i=1}^K (n_i \log n_i - n_i) + \text{constante} . \quad (2.17)$$

Una vez calculado el volumen ocupado por f , se requiere determinar la función de distribución de equilibrio. Con este objeto se varía el conjunto de enteros $\{n_i\}$ que satisfacen las Ecuaciones 2.9 y 2.10 hasta alcanzar un máximo de $\log \Omega$.

Sea $\{\bar{n}_i\}$ el conjunto de enteros que maximiza $\log \Omega$. Igualando el diferencial de la función a 0 para determinar los multiplicadores de Lagrange se obtiene

$$d [\log \Omega \{n_i\}] - d \left(\alpha \sum_{i=1}^K n_i + \beta \sum_{i=1}^K \epsilon_i n_i \right) = 0 . \quad (2.18)$$

Sustituyendo la expresión en 2.17 en la previa 2.18,

$$\sum_{i=1}^K [-\log n_i - \alpha - \beta \epsilon_i] dn_i = 0 . \quad (2.19)$$

A partir de la misma, dado que dn_i suponen variaciones independientes, la condición de equilibrio se alcanza igualando a 0 el sumatorio en $n_i = \bar{n}_i$

$$\begin{aligned} \log \bar{n}_i &= -\alpha - \beta \epsilon_i \\ \bar{n}_i &= e^{-\alpha - \beta \epsilon_i} . \end{aligned} \quad (2.20)$$

Por consiguiente, de acuerdo con las Ecuaciones 2.20 y 2.12, la función distribución más probable es

$$\bar{f}_i = C e^{-\beta \epsilon_i} , \quad (2.21)$$

donde C es una constante.

2.4.3 Cálculo de velocidades

Una vez alcanzada la expresión genérica de la función de distribución más probable, sólo resta proceder a la determinación de la constante que aparece en la misma. Asumiendo que los nodos están uniformemente distribuidos en el espacio, de tal forma que f es independiente de \mathbf{x} , la Ecuación 2.21 se convierte en

$$\int f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) d^3\mathbf{v} = \frac{N}{V} \quad (2.22)$$

por lo que la constante C queda expresada como

$$C = \frac{N}{V} \left(\frac{\beta}{\pi} \right)^{3/2}. \quad (2.23)$$

Definiendo la densidad de los nodos como $\mu = N/V$, se llega finalmente a

$$\bar{f}_i = \mu \left(\frac{\beta}{\pi} \right)^{3/2} e^{-\beta \epsilon_i}. \quad (2.24)$$

Como se adelantó en la introducción al presente apartado, la Ecuación 2.24 refleja la distribución de Maxwell-Boltzmann, mediante la cual se puede calcular la velocidad más probable de cualquier nodo de la red

$$\bar{v} \equiv \frac{\int d^3v v f(v)}{\int d^3v f(v)} = \sqrt{\frac{2}{\beta}} \quad (2.25)$$

y la raíz cuadrada de la velocidad cuadrática media se obtiene como

$$v_{\text{rms}} \equiv \left[\frac{\int d^3v v^2 f(v)}{\int d^3v f(v)} \right]^{1/2} = \sqrt{\frac{3}{\beta}}. \quad (2.26)$$

El modelo teórico del encaminamiento contempla este modelo de movilidad a partir de la dependencia de su parámetro fundamental, el radio de persistencia, ξ , en relación con la variable β que caracteriza las velocidades calculadas anteriormente. De esta forma, el modelo del encaminamiento propuesto incluye de una forma inherente el impacto de la movilidad de los nodos en su eficiencia, completando por tanto la dependencia ya descrita en el Apartado 2.3 respecto a la directividad impuesta por los distintos factores del caso a estudio -topología, protocolo, rango de cobertura, interferencia y demás-.

2.5 Expresión completa de la DEaE

Después de presentar y desarrollar tanto la base de la construcción de la DEaE a través de la integral de camino como los modelos de directividad y movilidad necesarios para comple-

tarla, se está en disposición de obtener la expresión completa de la DEaE que reúna las tres contribuciones señaladas.

El fundamento genérico de la expresión de la DEaE es la Ecuación 2.4, que debe restringirse a partir de las condiciones introducidas por la directividad del encaminamiento y la movilidad de los nodos. La primera modificación que debe llevarse a cabo sobre ella es la referente al conjunto de direcciones consideradas en la constante de normalización. Su expresión original, incluye la superficie de una esfera de radio unidad. Debido a la directividad y la movilidad, esta esfera de ángulos posibles se transforma en un sector esférico delimitado por los valores de κ y β . Además, la formulación completa de la DEaE debe incluir un término que exprese la reducción de la probabilidad de ocurrencia de una ruta determinada en función del parámetro “energético” contemplado en el modelo de directividad a través de la Ecuación 2.7. Asimismo, este nuevo término se extiende de tal forma que contemple la dependencia adicional del encaminamiento con relación a la movilidad de los nodos. Esta extensión se lleva a cabo mediante la inclusión del parámetro β , que describe la velocidad de los mismos según las Ecuaciones 2.25 y 2.26 del modelo de movilidad propuesto en el Apartado 2.4. La implementación de las modificaciones descritas anteriormente resulta en

$$P_H(\mathbf{u}_H, \mathbf{u}_0; \mathbf{R}) = \frac{1}{A} \prod_{h=1}^{H-1} \left[\int \frac{d\mathbf{u}_h}{A} \right] \delta^D(\mathbf{R} - a \sum_{h=1}^H \mathbf{u}_h) \times \exp \left[-\frac{2\pi a}{A^{(D-1)}} \sum_{h=1}^H (\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_{h-1})^2 \right], \quad (2.27)$$

donde A es un factor de medida definido como

$$A = \sqrt{\frac{2\pi a}{\kappa\beta}}^{D-1}. \quad (2.28)$$

La Ecuación 2.27 representa la distribución de los enlaces intermedios de una ruta. Por consiguiente, para la construcción de la expresión completa de la DEaE tan sólo resta considerar la aportación de los saltos inicial y final de cada ruta que pueda ser establecida entre una pareja F-D arbitraria en la red. En consecuencia, la Ecuación 2.27 debe ser integrada sobre los vectores unitarios de todas las direcciones finales y promediada sobre los vectores unitarios de todas las direcciones iniciales. Así, se alcanza la expresión completa de la DEaE

$$P_H(\mathbf{R}) = \int d\mathbf{u}_H \int \frac{d\mathbf{u}_0}{S_D} P_H(\mathbf{u}_H, \mathbf{u}_0; \mathbf{R}). \quad (2.29)$$

Esta expresión restringe la Ecuación 2.4 mediante los parámetros de directividad y movilidad. En este sentido, el encaminamiento generado a partir de las consideraciones anteriores es denominado *encaminamiento directivo* y la DEaE resultante es denotada por $P_H^{\text{ED}}(\mathbf{R})$.

Por último, el extremo opuesto al encaminamiento aleatorio determinado por la Ecuación 2.4 es aquél en el que las conexiones entre cualquier pareja F-D se realizan a través del camino más próximo posible a la línea recta que une ambos extremos. Este encaminamiento es llamado *encaminamiento óptimo* y su DEaE se obtiene directamente como

$$P_H^{EO}(\mathbf{R}) = \frac{1}{S_D R^{D-1}} \delta(R - L), \quad (2.30)$$

donde L es la longitud de la ruta a través de los H saltos.

2.6 Momentos de la DEaE y radio de persistencia

La expresión completa de la DEaE en cualquiera de sus formas relativas al encaminamiento directivo, aleatorio u óptimo es difícilmente evaluable analíticamente. Por este motivo, se debe recurrir a una distinta aproximación a las características intrínsecas de la DEaE. Como es bien sabido, las peculiaridades de una distribución de probabilidad pueden ser unívoca y completamente determinadas mediante la totalidad de sus momentos. Por consiguiente, el cálculo secuencial de los mismos supone un conocimiento gradual de los rasgos de la DEaE a estudio.

Siguiendo la misma categorización del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas descrita en los apartados anteriores, se estudian los momentos de la DEaE para los casos de encaminamiento directivo, aleatorio y óptimo.

2.6.1 Encaminamiento directivo

A partir de la Ecuación 2.29, sus momentos se expresan como

$$\langle R^{2l} \rangle = \int d^{D-1} \mathbf{u}_H \int \frac{d^{D-1} \mathbf{u}_0}{S_D} R^{2l} P_H(\mathbf{u}_H, \mathbf{u}_0; \mathbf{R}). \quad (2.31)$$

Sin embargo, la evaluación de estos momentos es preferible realizarla con base en la asunción de *espacio continuo*. La interpretación de una Red Ad Hoc Inalámbrica bajo la perspectiva de espacio continuo implica que los nodos de la red cubren totalmente el volumen D -dimensional considerado, sin que existan intersticios entre ellos. Por consiguiente, la longitud de cada enlace a cae a 0 y la longitud de las rutas establecidas, $L = Ha$ permanece constante. En este supuesto, cobra validez la forma energética de la probabilidad de ocurrencia de una ruta concreta expresada en la Ecuación 2.5.

La forma discreta de la DEaE para el encaminamiento directivo en 2.27 se transforma en

su expresión continua

$$P_H(\mathbf{u}_H, \mathbf{u}_0|L) = \sum_{l=0}^{\infty} \exp \left[-L \frac{1}{2\kappa\beta} L_2 \right] \sum_{\mathbf{m}} Y_{l\mathbf{m}}(\mathbf{u}_H) Y_{l\mathbf{m}}^*(\mathbf{u}_0) , \quad (2.32)$$

donde $L_2 = (D/2 - 1 + l)^2 - 1/4$ e $Y_{l\mathbf{m}}(\mathbf{u}_h)$ representan los polinomios armónicos. El término L_2 debe ser a su vez corregido mediante los autovalores del operador del momento angular cuadrático en D dimensiones, \hat{L}_2 . De esta forma, se evita la introducción de un nuevo factor de normalización.

$$L_2 \rightarrow \hat{L}_2 = l(l + D - 2) . \quad (2.33)$$

Por su parte, los momentos de la DEaE son definidos mediante la expresión

$$R^{2l} = \left[\int_0^L ds \mathbf{u}(s) \right]^{2l} , \quad (2.34)$$

que, como puede observarse, tan sólo toma valores para momentos pares dada la invariabilidad de la DEaE frente a rotaciones.

En particular, el primer momento no nulo, $\langle R^2 \rangle$, se determina como la integral doble de la función de correlación entre un par de vectores unitarios $\mathbf{u}(s_2)$ y $\mathbf{u}(s_1)$ según

$$\langle R^2 \rangle = \int_0^L ds_2 \int_0^L ds_1 \langle \mathbf{u}(s_2) \mathbf{u}(s_1) \rangle = 2 \int_0^L ds_2 \int_0^{s_2} ds_1 \langle \mathbf{u}(s_2) \mathbf{u}(s_1) \rangle . \quad (2.35)$$

El cálculo de esta función de interés resulta en

$$\langle \mathbf{u}(s_2) \mathbf{u}(s_1) \rangle = \exp \left[- (s_1 - s_2) \frac{D - 1}{2\kappa\beta} \right] \quad (2.36)$$

de la que se deriva el parámetro

$$\xi \equiv 2\kappa\beta / (D - 1) \quad (2.37)$$

denominado *radio de persistencia*. Este parámetro es clave para el modelo teórico propuesto ya que establece una medida de la correlación direccional, $\langle \mathbf{u}(s_2) \mathbf{u}(s_1) \rangle$, es decir, la eficiencia del encaminamiento en función de las características de directividad y movilidad presentes en la red.

Con base en este radio de persistencia, el primer momento no nulo de la DEaE que la determina en una primera aproximación es

$$\langle R_{ED}^2 \rangle = 2 \left[\xi L - \xi^2 \left(1 - e^{-L/\xi} \right) \right] , \quad (2.38)$$

expresión válida para cualquier dimensión D .

El cálculo del siguiente momento no nulo para el caso de encaminamiento directivo es algo

más complejo

$$\begin{aligned} \langle R_{ED}^4 \rangle &= \frac{4(D+2)}{D} L^2 \xi^2 - 8L\xi^3 \left(\frac{D^2 + 6D - 1}{D^2} - \frac{D-7}{D+1} e^{-\frac{L}{\xi}} \right) \\ &+ 4\xi^4 \left[\frac{D^3 + 23D^2 - 7D + 1}{D^3} - \frac{2(D+5)^2 e^{-\frac{L}{\xi}}}{(D+1)^2} + \frac{(D-1)^5 e^{-\frac{2DL}{(D-1)\xi}}}{D^3(D+1)^2} \right] \end{aligned} \quad (2.39)$$

La obtención de momentos de orden superior $\langle R_{ED}^{2l} \rangle$ se hace cada vez más dificultosa. Asimismo, el estado actual del desarrollo permite extraer las conclusiones significativas sobre el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas por lo que se desestima la determinación de los mismos en el ámbito de la presente tesis.

2.6.2 Encaminamiento aleatorio

Para el caso de encaminamiento aleatorio, volviendo de nuevo al espacio discreto, los momentos de la DEaE pueden definirse como

$$\langle R_{EA}^{2l} \rangle = \int d^D R R^{2l} P_H^{EA}(\mathbf{R}) . \quad (2.40)$$

Su obtención es directa a través de la transformada de Fourier de la DEaE. Dado que, una vez más, la ruta creada es invariante ante rotaciones, esta transformada tan sólo contiene coeficientes pares. La expresión transformada presenta la forma

$$\tilde{P}_H(\mathbf{k}) = \sum_{l=0}^{\infty} P_{H,2l} \frac{(ka)^{2l}}{(2l)!} . \quad (2.41)$$

La relación entre los coeficientes de expansión $P_{H,2l}$ y los momentos $\langle R^{2l} \rangle$ se expresa mediante

$$P_{H,2l} = (-1)^l d_{2l} \langle R^{2l} \rangle , \quad (2.42)$$

donde

$$d_{2l} = \frac{(2l-1)!!(D-2)!!}{(D+2l-2)!!} \quad (2.43)$$

quedando así la Ecuación 2.41

$$\tilde{P}_H(\mathbf{k}) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(-1)^l (ka)^{2l}}{(2l)!} d_{2l} \langle R_{EA}^{2l} \rangle \quad (2.44)$$

y la expresión general de los momentos

$$\langle R_{EA}^{2l} \rangle = \frac{(D+2l-2)!!}{(D-2)!! D^l} (aL)^l . \quad (2.45)$$

2.6.3 Encaminamiento óptimo

Por último, para el caso del encaminamiento óptimo, a partir de la expresión particular de la DEaE en 2.30 y la general de los momentos 2.40, se obtiene

$$\begin{aligned}
 \langle R_{EO}^{2l} \rangle &= \int d^D R R^{2l} P_H^{EO}(\mathbf{R}) \\
 &= \int_0^\infty d^D R R^{2l} \delta(R - L) \\
 &= L^{2l}.
 \end{aligned} \tag{2.46}$$

2.6.4 Conclusión parcial

A tenor de lo expuesto en el presente apartado, puede resaltarse como aportación principal el establecimiento de una relación directa entre las restricciones impuestas por la directividad del encaminamiento y la movilidad de los nodos, reunidas bajo el llamado radio de persistencia, ξ , y la DEaE. Por consiguiente, puede considerarse que la DEaE queda caracterizada por el parámetro ξ , que, por ende, expresa la eficiencia de encaminamiento de forma cuantitativa.

2.7 Redes Ad Hoc Inalámbricas de gran escala

El estudio de la DEaE en los distintos casos de encaminamiento puede arrojar ulteriores conclusiones a partir del análisis conjunto de las expresiones halladas para sus momentos, particularizadas para el escenario de redes de *gran escala*. En el mismo, además de la dependencia de la eficiencia de encaminamiento con el radio de persistencia, tal y como se obtiene en el Apartado 2.6, es posible establecer una relación entre éste y el conocimiento espacial de la red que posee cada nodo.

2.7.1 Momentos de la DEaE bajo el supuesto de gran escala

Una red es considerada de gran escala cuando se cumple que $H \rightarrow \infty$. En este caso, la distancia media entre cualquier par de nodos en la red es

$$\langle R \rangle = a\sqrt{N}, \tag{2.47}$$

es decir, un valor finito [Kleinert, 2004].

Esta condición también puede ser representada por un número tendente a infinito de nodos en la red, $N \rightarrow \infty$. Teniendo en cuenta la expresión general de la longitud media de los caminos en una red de N nodos en [Tonguz y Ferrari, 2006]

$$\langle L \rangle \propto N^{1/D}, \tag{2.48}$$

suponiendo que el radio de persistencia ξ es finito, el cociente L/ξ es muy alto y su exponencial negativa tiende a 0

$$e^{-L/\xi} \rightarrow 0 . \quad (2.49)$$

A partir de este supuesto, se realiza un análisis comparativo de los momentos de la DEaE calculados para cada aproximación -encaminamiento aleatorio, directivo u óptimo-.

La expresión general de los momentos pares de la DEaE de un encaminamiento aleatorio se encuentra en la Ecuación 2.45. En la misma se pueden observar dos peculiaridades. En primer lugar, los momentos -y, por consiguiente, la DEaE que caracterizan- no son función del radio de persistencia ξ , lo que es obvio dado que el carácter aleatorio de este escenario hace que no se vea involucrada en su encaminamiento ninguna forma de directividad. La segunda peculiaridad es la dependencia espacial de los momentos que representa su último término, $(aL)^l$. Este factor denota una relación entre la aleatoriedad del encaminamiento y el conocimiento espacial presente en cada nodo acerca de la red, que, en este caso, está restringido a sus vecinos inmediatos, situados a una distancia a .

Para el caso de encaminamiento directivo, se recurre al análisis de las expresiones particulares de los primeros momentos no nulos hallados. Así, reordenando los términos de la Ecuación 2.38 y asumiendo la condición en 2.49, el primer momento no nulo tiene la forma

$$\langle R_{ED}^2 \rangle = 2\xi L \left(1 - \frac{\xi}{L} + \dots \right) . \quad (2.50)$$

Del mismo modo, el momento de orden 4 es

$$\langle R_{ED}^4 \rangle = 4\xi^2 L^2 \frac{D+2}{D} \left(1 - 2\frac{\xi}{L} \frac{D^2+6D-1}{D(D+2)} + \dots \right) . \quad (2.51)$$

A partir de las Ecuaciones 2.50 y 2.51, se advierte que presentan una forma equivalente a la perteneciente al caso de encaminamiento aleatorio en la Ecuación 2.45 con tan sólo sustituir a por 2ξ . De este modo, se define el denominado *radio efectivo* como

$$a_{ef} \equiv 2\xi . \quad (2.52)$$

Siguiendo el mismo tipo de argumentación expuesto para el encaminamiento aleatorio, este radio efectivo denota el conocimiento de la red que posee cada nodo. Este conocimiento es mayor en el caso de encaminamiento directivo que en el de encaminamiento aleatorio y, además, depende de las características de directividad, κ , y movilidad, β , englobadas en el radio de persistencia. Bajo estas consideraciones, los momentos de orden par de la DEaE que

Aproximación	$\langle R^2 \rangle$	$\langle R^{2l} \rangle$
EA	aL	$(aL)^l$
ED	$a_{ef}L$	$\approx (a_{ef}L)^l (1 + \dots)$
EO	L^2	L^{2l}

Cuadro 2.1 : Resumen de momentos de la DEaE

presenta el encaminamiento directivo pueden expresarse como

$$\langle R_{ED}^{2l} \rangle = \frac{(D + 2l - 2)!!}{(D - 2)!! D^l} (a_{ef}L)^l. \quad (2.53)$$

Por último, mediante el estudio del caso de encaminamiento óptimo, se comprueba la validez de la argumentación anterior dado que la expresión general de los momentos de orden par de su DEaE sigue la Ecuación 2.46, en la que el conocimiento espacial de la red se extiende a la totalidad de la misma y, por consiguiente, la dependencia se restringe al parámetro de longitud de la ruta ahora elevado al cuadrado.

El Cuadro 2.1 muestra un resumen de los momentos de la DEaE hallados para cada una de las aproximaciones de encaminamiento estudiadas. A tenor de la interrelación entre los momentos de orden par de las DEaE respectivas y el conocimiento espacial presente en cada situación, se deriva una expresión genérica para el encaminamiento, independiente de su condición aleatoria, directiva u óptima

$$\langle R^{2l} \rangle \propto (aL)^{2l\nu} \quad (2.54)$$

en la que el parámetro ν se denomina *exponente crítico*. Este exponente crítico toma valores en el intervalo $[\frac{1}{2}, 1]$ cuyos límites representan las situaciones de encaminamiento aleatorio y óptimo respectivamente.

2.8 Resultados teóricos

El presente apartado aborda la representación gráfica de las distribuciones obtenidas durante el desarrollo del modelo teórico propuesto. Las figuras resultantes muestran dichas DEaE frente a los valores de R/L , para los casos particulares de dos y tres dimensiones. En las mismas, se presenta conjuntamente una serie de curvas caracterizadas por distintos valores del radio de persistencia, ξ , normalizado a la longitud real del camino, L .

Mediante la integración numérica de la Ecuación 2.29 se obtienen las Figuras 2.2 y 2.3, que contienen las curvas teóricas de las DEaE, $P_L(\mathbf{R})$, del cociente R/L para 2 y 3 dimensiones respectivamente. Nótese que el subíndice de la distribución estadística en este caso se ha tomado como L para denotar su dependencia con la longitud real del camino en lugar de con

su número de saltos, H .

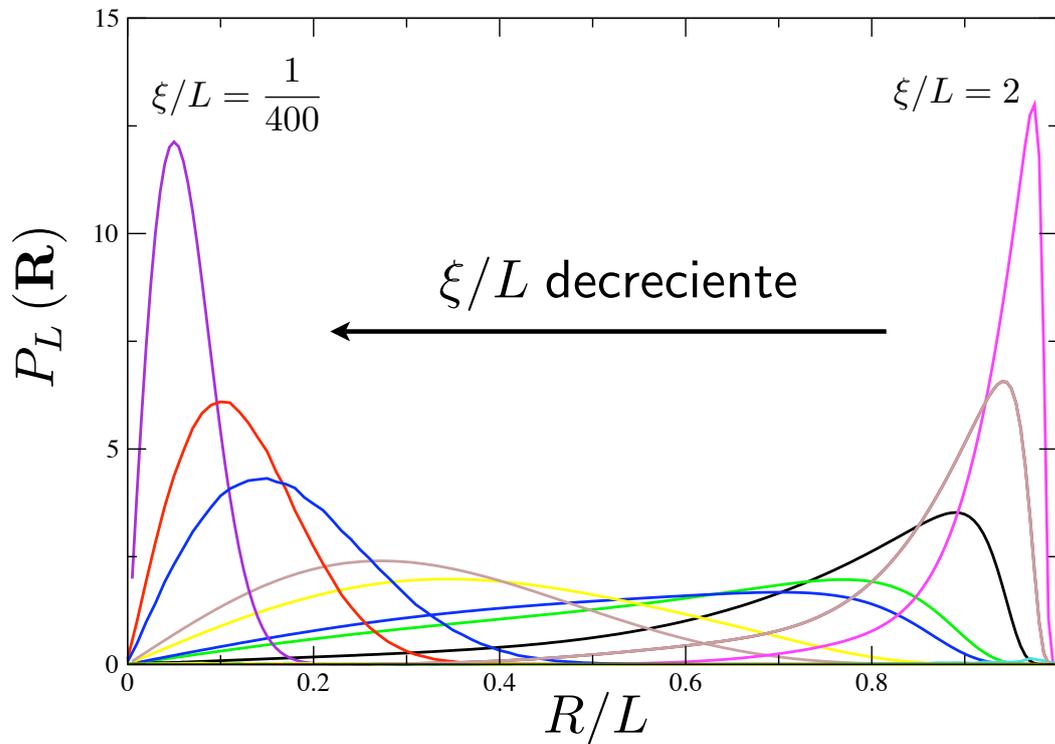


Figura 2.2 : DEaE en 2 dimensiones de rutas con radio de persistencia normalizado (ξ/L).

En las mismas, se puede observar cómo la mayor parte del área de la distribución de R/L se condensa en la zona cercana a 0 cuando el radio de persistencia normalizado, ξ/L , y por tanto la eficiencia de encaminamiento toma valores muy reducidos. Tal y como se ha derivado en el modelo teórico, éste es el caso del encaminamiento aleatorio, $\nu \approx 1/2$, en el que se puede apreciar cómo la distancia entre fuente y destino es despreciable con relación a la longitud de la ruta establecida entre ellos. Por el contrario, los valores elevados del radio de persistencia normalizado describen un comportamiento cercano al encaminamiento óptimo, $\nu \approx 1$, situándose la mayor parte del área de la distribución correspondiente en la zona cercana a 1. En este caso, se comprueba cómo la distancia entre fuente y destino es siempre comparable a la longitud de la ruta. Valores intermedios de ξ/L configuran el resto de curvas teóricas de las DEaE que describen el encaminamiento presente en escenarios con distinta directividad y movilidad.

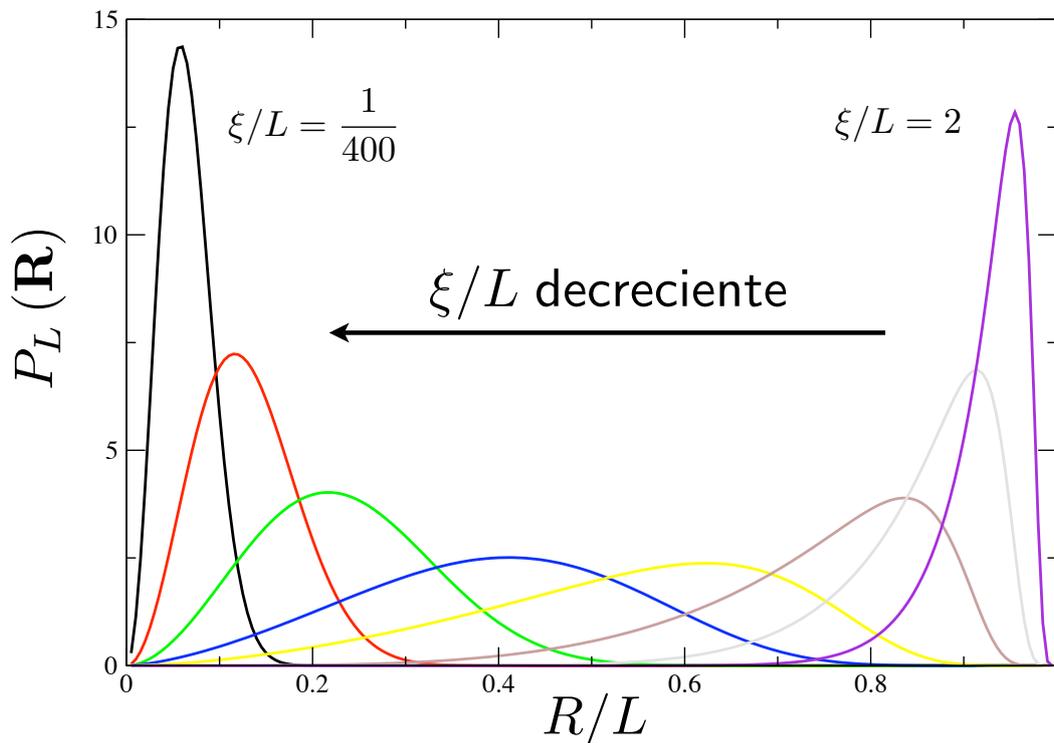


Figura 2.3 : DEaE en 3 dimensiones de rutas con radio de persistencia normalizado (ξ/L).

2.9 Relación con otras aproximaciones al encaminamiento

Como ya se introdujo en el Apartado 1.3, el modelo teórico descrito se interrelaciona con otras aproximaciones teóricas al encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas. Estas correspondencias son estudiadas en mayor profundidad, aportando los razonamientos que las sostienen con base en los principios desarrollados en el presente capítulo.

La *Teoría de la Información* fundamenta su análisis en la capacidad de un canal (*bit/s*) entendida como la cantidad de información que puede ser transmitida a su través [Cover y Thomas, 2006a]. La extensión de este parámetro al global de una red no es evidente; por este motivo, se recurre a la *capacidad de transporte* (*bit · m/s*), que añade la componente de distancia al concepto, para reflejar la habilidad de la red para hacer que la información recorra 1 metro en 1 segundo. Basándose en esta medida de las prestaciones de una red, en [Gupta y Kumar, 2000] se demuestra que la capacidad de transporte de la misma es $\Theta(\sqrt{N})$, es decir, es “de orden Omega mayúscula de \sqrt{N} ” [Anderson, 2001]. Esto implica que la capacidad de transporte simultáneamente domina y es dominada por \sqrt{N} por lo que, en el límite, se puede afirmar que tiende a este valor. En términos de Teoría de la Información esta tendencia

muestra que la tasa de transferencia de cada nodo cae a 0 con una cantidad suficiente de los mismos en la red, $\Theta(1/\sqrt{N})$. Tal y como puede observarse, el conjunto de asunciones sobre las que parten los autores para alcanzar esta conclusión no incluye factores como el retardo o los protocolos de encaminamiento y capa MAC [Tonguz y Ferrari, 2006].

Por su parte, el modelo teórico propuesto demuestra que un encaminamiento caracterizado por un radio efectivo finito pierde sus prestaciones relativas a la eficiencia de encaminamiento al incrementarse el número de nodos en la red, N , convirtiéndose en un camino aleatorio. En estas condiciones cualquier nodo presenta una probabilidad no nula de formar parte de la ruta establecida de una fuente a un destino concretos. La longitud de la ruta resultante puede ser calculada considerando un área circular de radio B , dividida en N áreas circulares de radio b . La longitud del camino que recorre cada una de estas últimas áreas circulares es proporcional a la raíz cuadrada de N

$$L \propto N^{1/2} . \quad (2.55)$$

Este valor se ajusta a la particularización para $2D$ de la regla general expuesta en [Tonguz y Ferrari, 2006] según la cual la longitud media de los caminos en una red de N nodos obedece a la Ecuación 2.48.

Adicionalmente, en el caso de redes de gran escala, la distancia media entre cualquier par de nodos es la expresada en la Ecuación 2.47, que, como puede comprobarse, es independiente de D . Esta cantidad caracteriza el radio medio del “volumen” que ocupa el camino en la red. Por consiguiente, se cumple simultáneamente que la distancia entre nodos, R permanece invariante frente a D mientras que la longitud del camino entre ellos, L , muestra la dependencia descrita en la Ecuación 2.48. Este aparente contrasentido se clarifica considerando que, a mayor dimensionalidad, es posible incluir el mismo número de nodos en un volumen de radio menor al tener un grado de libertad mayor procedente de la propia dimensión.

Esta observación recupera por tanto la aportación fundamental en [Gupta y Kumar, 2000] referida, donde la determinación límite de la capacidad de transporte de una red, $\Theta(\sqrt{N})$, se alcanza a partir de un desarrollo basado en una partición en teselas del espacio en dos dimensiones, similar a la división en áreas circulares descrita anteriormente. Esta capacidad de transporte de la red encaja por consiguiente con la Ecuación 2.55, estableciendo así una relación entre el modelo propuesto en esta tesis y la Teoría de la Información.

Asimismo, la expresión general de dicha capacidad de transporte por nodo, $C \propto \langle L \rangle / N$ puede ser extendida a D dimensiones haciendo uso de la Ecuación 2.48 de forma que

$$C \propto N^{\frac{(1-D)}{D}} \quad (2.56)$$

por lo que a dimensionalidad mayor, la caída a 0 es más brusca. Este resultado es asimismo consistente con el límite superior de la capacidad por nodo en una red aleatoria en tres

dimensiones, $\Theta(N^{-\frac{1}{3}})$ aportado en [Gupta y Kumar, 2001].

La *Teoría de la Comunicación* tiene como objetivo la determinación de variables como BER o SINR para evaluar el comportamiento de la red incluyendo en ella una modulación, una codificación, un acceso múltiple y un comportamiento del canal bien definidos y determinados. De esta forma se diferencia de la Teoría de la Información que, como se ha tratado previamente, se ocupa de los límites superiores de los canales de comunicación asumiendo las variables anteriores como óptimas. La interpretación de una Red Ad Hoc Inalámbrica bajo estas premisas se basa por tanto en la evaluación de estos parámetros particulares [Tonguz y Ferrari, 2006]. En concreto, el encaminamiento se describe como el establecimiento de una ruta compuesta por una serie de enlaces representados por los valores concretos de BER o SINR. El propósito del encaminamiento bajo este punto de vista es la consecución de caminos en los que se minimicen estas variables. Dada esta interpretación de una ruta como una sucesión de enlaces en los que sus parámetros característicos son progresivamente añadidos en una suma total, existe una relación directa entre el número de saltos de la misma y el BER o SINR global. Por ello, un encaminamiento eficiente según el modelo propuesto en la presente tesis logra optimizar la longitud de la ruta y, consiguientemente, el número de saltos en la misma, reduciendo de esta forma el número de sumandos parciales y, por tanto, el valor final de la variable considerada.

Otro tipo de interpretación puede asimismo encontrarse en ámbitos del conocimiento como la *Teoría de Grafos*. En la misma, una Red Ad Hoc Inalámbrica se concibe como un grafo formado por un conjunto de puntos y las interconexiones existentes entre ellos. La comunicación en este campo se basa en encontrar una ruta formada por un grupo de enlaces -*aristas* según la terminología al uso en este campo- a lo largo del grafo, que une fuente y destino. Así, el fin del encaminamiento es la optimización de dicha ruta de tal forma que se aproxime a la mejor, elegida de acuerdo con ciertas métricas independientemente del protocolo seleccionado o su tipo -activo, reactivo, jerárquico, etc.- [Basagni et al., 2004b]. Estas métricas varían desde el camino más corto hasta el de mínima energía, pasando por el menos vulnerable o el que presente la mínima propagación del error. El problema no siempre es resoluble aunque en [Basagni et al., 2004b] se indica que es posible encontrar el camino aproximadamente más corto de forma eficiente siempre que la familia de conjuntos de aristas del grafo sea pequeña. El modelo propuesto en esta tesis se basa precisamente en esta métrica, caracterizando el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas con base en su capacidad para dirigir el paquete de fuente a destino a través del camino más cercano a la línea recta que los une, tal y como se expresa mediante el cociente R/L , que mide la eficiencia de encaminamiento.

La eficiencia de encaminamiento sirve a su vez de nexo de unión con una nueva interpretación de las Redes Ad Hoc Inalámbricas bajo el prisma de la *Teoría del Control*. Esta perspectiva centra su análisis en el carácter dinámico de la red y, por tanto, su objetivo principal es la

adecuación de los criterios que la gobiernan a la situación específica de cada momento. Esta percepción encaja adecuadamente con el entorno inalámbrico y móvil de este tipo de redes, en el que la variabilidad es una característica inherente a la mayor parte de sus procesos. En consecuencia, puede encontrarse un abanico de trabajos que incluye desde estudios centrados en el cálculo del número de caminos independientes ya en Redes de Paquetes Radio [Wang y Silvester, 1993] hasta propuestas de algoritmos multicamino específicos como en [Servetto y Barrenechea, 2002]. Bajo esta aproximación, el encaminamiento tiene como objetivo la provisión no de un solo camino sino de un conjunto de ellos que unan fuente y destino, de manera que se haga posible la conmutación de uno a otro con base en decisiones tomadas por la aparición de fallos en los enlaces o parámetros como balanceo de tráfico, prioridad de los mensajes, etc. En este sentido, los valores cercanos a 1 de la relación R/L implican un encaminamiento muy directivo y por consiguiente la existencia de un grupo de caminos altamente eficientes pero en número reducido. Por el contrario, un cociente R/L alejado de 1 da lugar a un encaminamiento más ineficiente en términos de longitudes recorridas por los paquetes, pero en el que se dispone de un número más elevado de rutas que conectan fuente y destino, ampliando la posibilidad de conmutación dinámica de una a otra.

Por las razones expuestas en el presente apartado puede afirmarse que el modelo teórico propuesto es capaz de establecer nexos de unión con otros tipos de interpretaciones de diversa índole del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas, gozando por tanto de la generalidad perseguida en su concepción.

2.10 Conclusiones

El Capítulo 2 alcanza el Objetivo 1 descrito en el Apartado 1.6 mediante el desarrollo de un modelo teórico para la caracterización del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas. Este modelo teórico toma como base la eficiencia de encaminamiento representada a través de un único parámetro, el radio de persistencia. De este modo, pueden establecerse comparaciones cualitativas y cuantitativas entre cualesquiera escenarios de encaminamiento de forma equitativa.

La eficiencia de encaminamiento, definida como el cociente, R/L , entre la distancia euclídea que separa fuente y destino y el camino recorrido a través de un esquema multisalto de una a otro, es una magnitud medible y objetiva. Su distribución estadística se expresa en función del radio de persistencia, ξ , que contiene las características de directividad, κ , y movilidad de los nodos, β , del caso a estudio. Bajo estas variables, el modelo contempla las contribuciones de todos los factores involucrados que inciden en la eficiencia de encaminamiento. El radio de persistencia establece una medida cuantitativa de la misma.

Adicionalmente, el radio de persistencia constituye una relación entre el conocimiento

espacial de la red que presentan sus nodos y la eficiencia de encaminamiento, en la variable denominada radio efectivo, a_{ef} . A partir de este radio efectivo se resume de forma general el comportamiento de los momentos de la DEaE -que la caracterizan completamente- según el llamado exponente crítico que fluctúa entre las situaciones de encaminamiento aleatorio y óptimo, pasando por el directivo.

Esta variación de acuerdo a una misma regla común implica que, en presencia de un radio de persistencia o radio efectivo finito, el encaminamiento tiende hacia el extremo aleatorio ante un número suficiente de nodos en la red. Es decir, si el conocimiento relativo a la red que muestra cada nodo no es capaz de crecer con el tamaño de la misma -y el número medio de saltos creciente que conlleva-, el encaminamiento pierde toda su eficiencia original y se convierte en un mero camino aleatorio.

Este planteamiento lleva a establecer un nexo directo con la Teoría de la Información. Asimismo, el modelo teórico propuesto se relaciona con aproximaciones como la Teoría de la Comunicación, la Teoría de Grafos o la Teoría del Control, comprobándose la generalidad del mismo en su interpretación del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas.

Por último, se ha de señalar que el modelo propuesto no aporta una determinación a priori del radio efectivo que gobierna las prestaciones del encaminamiento en las condiciones específicas consideradas. Por este motivo, para el análisis del comportamiento del encaminamiento bajo unos supuestos particulares, se propone la realización de una serie de experimentos de simulación cuyas medidas de R/L sean caracterizadas por una curva teórica concreta de entre las presentadas en el Apartado 2.8. Con este fin, que daría lugar a la consecución del Objetivo 2 referente a la Hipótesis de Partida 2, el Capítulo 3 se ocupa del establecimiento de una metodología para el diseño de los mismos -según la Hipótesis de Partida 3 y el Objetivo 3- así como de la creación de un procedimiento específico para realizar el ajuste a dichas curvas teóricas. Los resultados experimentales en él recogidos validan el modelo teórico propuesto y permiten la extracción de conclusiones cualitativas y cuantitativas de aspectos particulares del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas incluidos en el estudio.

Medida Experimental de la Eficiencia de Encaminamiento

En la literatura existe cierta cantidad de modelos teóricos en el ámbito del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas. La validación de estos modelos se realiza exclusivamente mediante formulaciones matemáticas. Sin embargo, si además fueran respaldados por una confirmación empírica de los resultados obtenidos, el modelo podría gozar de un grado de confianza óptimo.

Por su parte, los experimentos en este campo se restringen a la evaluación comparativa de las prestaciones mediante simulación de algoritmos y protocolos de encaminamiento. Su objetivo, por tanto, es poner de manifiesto las diferencias entre distintos protocolos en lugar de ofrecer una medida del comportamiento del encaminamiento bajo determinadas condiciones -protocolo, topología de la red, etc.-. Por consiguiente, puede afirmarse que este tipo de experimentos tiene un carácter relativo -muestra las diferencias entre protocolos- y no absoluto -no representa las características del encaminamiento en sí-.

El seguimiento de una metodología adecuada para la selección de los parámetros que intervienen en dichas simulaciones es esencial para alcanzar los objetivos perseguidos. Todo un área de conocimiento de la Estadística, el *Diseño de Experimentos*, se centra en el desarrollo de estas metodologías [Cochran y Cox, 1992], de tal forma que los resultados generados cumplan como premisas básicas:

- Ser representativos del objeto a estudio.
- Ser presentados con base en métricas generalizables y objetivas.
- Ser fruto de la influencia de una única variable o de un conjunto separable de las mismas.

Este proceder es adaptado al caso a estudio del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas. De esta forma, se sistematiza el proceso de simulación y se especifican todos los parámetros comunes y particulares seleccionados. Se establece por tanto un marco genérico para la realización de experimentos en este ámbito, lo que permite la reproducción de los mismos y la posibilidad de comparación objetiva de los resultados obtenidos.

La primera conclusión de los resultados producidos es la validez del modelo teórico, que cumple de esta forma el Objetivo 2 planteado en el Apartado 1.6. Esta validación se realiza mediante la comprobación del ajuste, a través de un método genérico expresamente desarrollado para este fin, basado en la divergencia de Kullback-Leibler [Cover y Thomas, 2006b], de las medidas empíricas a las curvas expuestas en el Apartado 2.8. Asimismo, de la posterior observación de los resultados experimentales se extraen conclusiones sobre el comportamiento del encaminamiento en función de variables como el tamaño de la red, el rango de cobertura de los nodos o el uso de técnicas de caché.

Una vez establecida la base de conocimiento que aporta tanto el modelo teórico como la metodología de diseño de experimentos y los resultados obtenidos, se realiza un análisis de los trabajos previos descritos en el Apartado 1.5. Este análisis ofrece una nueva interpretación de los mismos y justifica las observaciones realizadas acerca de ellos previamente.

Finalmente, se concluye con las aportaciones realizadas en este capítulo.

3.1 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos juega un papel fundamental a la hora de conseguir los resultados deseados para la caracterización de las propiedades del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas. Por ello, este apartado parte de una metodología genérica que sienta las premisas básicas que deben observarse y el listado de objetivos particulares de las simulaciones que se llevan a cabo. A partir de las mismas, se describen en detalle los experimentos realizados junto con los parámetros elegidos en cada uno de los mismos.

3.1.1 Metodología para el diseño de experimentos

Desde que en el primer cuarto del siglo XX Sir Ronald A. Fisher (1890 - 1962) introdujera el cálculo estadístico en la investigación empírica - [Fisher, 1970] y [Fisher, 1971]-, el diseño de experimentos es un procedimiento habitual en doctrinas de ciencias sociales y naturales -sociología, biología, genética, etc.-. No obstante, su utilización en otros ámbitos como el que nos ocupa no sólo es posible sino que además se sugiere altamente recomendable.

En el libro de referencia de este campo, [Cochran y Cox, 1992], se define un conjunto de pasos que deben seguirse para la construcción de un experimento genérico:

- Definir el objeto de la investigación.
- Seleccionar las variables controladas durante el experimento -*variables de diseño*- y sus rangos.
- Elegir las variables a medir para la descripción del resultado de las realizaciones del experimento -*variables de respuesta*- y su precisión.

La generación del conocimiento se produce por tanto a partir de la realización de los experimentos definidos en función de los criterios apuntados anteriormente según una serie de aproximaciones graduales que aportan nuevos detalles a la base ya establecida por las iteraciones anteriores. De esta forma, se distinguen las siguientes fases:

- *Diseño de exploración*, que restringe el campo de variables a aquéllas intrínsecamente relacionadas con el objetivo del experimento.
- *Diseño factorial completo*, que estudia la respuesta de cada combinación de factores para revelar la influencia conjunta en la variable de respuesta.
- *Diseño de superficie de respuesta* que finalmente modela la respuesta de forma genérica.

Esta metodología general es aplicada a los experimentos llevados a cabo en este trabajo de tesis para el diseño óptimo de las simulaciones realizadas. Su interpretación particular parte de un diseño de exploración cuyo objetivo es la caracterización del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas. El modelo teórico propuesto describe el encaminamiento en sí, lo que incluye tanto el protocolo como las características específicas de la red. Para producir la distinción necesaria de las características intrínsecas del encaminamiento respecto a otras impuestas por diferentes parámetros, los primeros experimentos se restringen al conjunto mínimo de variables de diseño: topología de la red y protocolo de encaminamiento. La consideración de variables como el rango de cobertura radio de los nodos queda, por tanto, pospuesta hasta la fase de diseño factorial. La representación de los resultados contra otras variables como tiempos de espera, incluidas en trabajos experimentales previos, obvian de esta forma el diseño de exploración lo que conlleva la imposibilidad de separar los efectos propios de dichas variables y las esenciales del encaminamiento. En cuanto a la variable de respuesta se elige la eficiencia de encaminamiento, ya presentada como el cociente entre la distancia euclídea entre fuente y destino, R , y la longitud del camino recorrido por el paquete de una a otro, L . Esta métrica constituye una medida fiel del objetivo de los experimentos -la caracterización del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas-. Así, se aleja de propuestas que tienen en cuenta factores que son consecuencias de éste como energía consumida, porcentaje de paquetes entregados, retardo medio de entrega, etc., e incluso de otras que, siguiendo la misma filosofía de calibrar la ruta real en relación con el camino óptimo, se ven obligadas a recurrir a una estimación para el cálculo de este último, lo que resta precisión y consistencia al experimento.

Es evidente que, además de cumplir con los requisitos especificados para el diseño de las simulaciones, éstas deben ser generalizables y gozar de significatividad estadística. En consecuencia deben contener un número elevado de nodos en la red y, sobre todo, de conexiones establecidas entre parejas F-D. Aunque ambos parámetros son necesarios, el último es esencial para la obtención de una cantidad suficiente de rutas de tal forma que se alcance un alto

grado de precisión para la evaluación de las prestaciones del encaminamiento; nótese que la variabilidad estadística es provista por las rutas establecidas y no por el número de paquetes enviados.

Finalmente, señalar que la última fase del diseño de experimentos, el diseño de superficie de respuesta, se corresponde con el desarrollo del modelo teórico descrito en el Capítulo 2.

3.1.2 Descripción de los experimentos realizados

Tal y como se apunta en el apartado anterior, el objetivo principal de las simulaciones llevadas a cabo es la caracterización del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas con base en medidas del cociente R/L como métrica de la eficiencia de encaminamiento de una forma generalizable y reproducible. Por este motivo, se selecciona el *Network Simulator-2* (*ns-2*) [Fall y Varadhan, 2005] en su versión 2.29. Este simulador de sucesos discretos es validado en [Johnson, 1999]. Asimismo, distintos artículos como [Li et al., 2001] verifican sus prestaciones para la reproducción de escenarios inalámbricos. Los resultados de dichas simulaciones son obtenidos mediante un post-procesado de los ficheros de trazas generados por el simulador, sin realizar modificación alguna con este propósito.

Según la metodología adoptada, los experimentos se llevan a cabo de manera secuencial, partiendo de un primer diseño de exploración seguido de un diseño factorial. Ambos comparten una misma variable de respuesta: la eficiencia de encaminamiento. Por su parte, las variables de diseño son divididas entre variables de diseño comunes y específicas.

Diseño de exploración

Cada simulación ejecutada comparte un conjunto de parámetros implementados en *ns-2*: canal inalámbrico, modelo de propagación de espacio libre, interfaz de red Wireless/Phy, capa MAC de 802.11 y fuentes de tasa de bit constante (CBR). Estas fuentes CBR se asocian a cada nodo transmisor 25 segundos después del comienzo de la simulación o de la última transmisión. La toma de esta decisión es debida a la necesidad de *ns-2* de un tiempo de estabilización que depende del tamaño de la red, antes de conseguir las mejores prestaciones en cuanto a búsqueda de la ruta óptima desde fuente a destino; una vez estabilizado, esta ruta se mantiene de forma sostenida. Cada fase de transmisión se lleva a cabo durante 7 segundos.

Adicionalmente, se selecciona el protocolo *Dynamic Source Routing* (DSR), dado el amplio conocimiento presente en la comunidad investigadora sobre su operación y la elevada cantidad de trabajos experimentales basados en el mismo, algunos de los cuales se comentan en el Apartado 1.5. No obstante, debe subrayarse el hecho de que tanto el modelo teórico como el diseño de simulaciones son aplicables a cualquier otro protocolo y por tanto los resultados y conclusiones que se presentan en los próximos apartados no están restringidos a él. Los detalles

de la operación de DSR pueden ser consultados en [Johnson et al., 2004]. En particular, DSR presenta una fase de descubrimiento de ruta en la que cada nodo transmite un paquete RREQ (*route request*) a sus vecinos, que lo retransmiten de nuevo hasta que se alcance el destino indicado. Cuando finalmente se produce su recepción, el nodo destino envía un paquete de respuesta RREP (*route reply*) a la fuente, en el que se incluye el camino seguido a través de la red por el paquete RREQ recibido. La Figura 3.1 muestra un esquema de la fase de descubrimiento de ruta descrita. Si un paquete RREQ llega a un nodo retransmisor con una

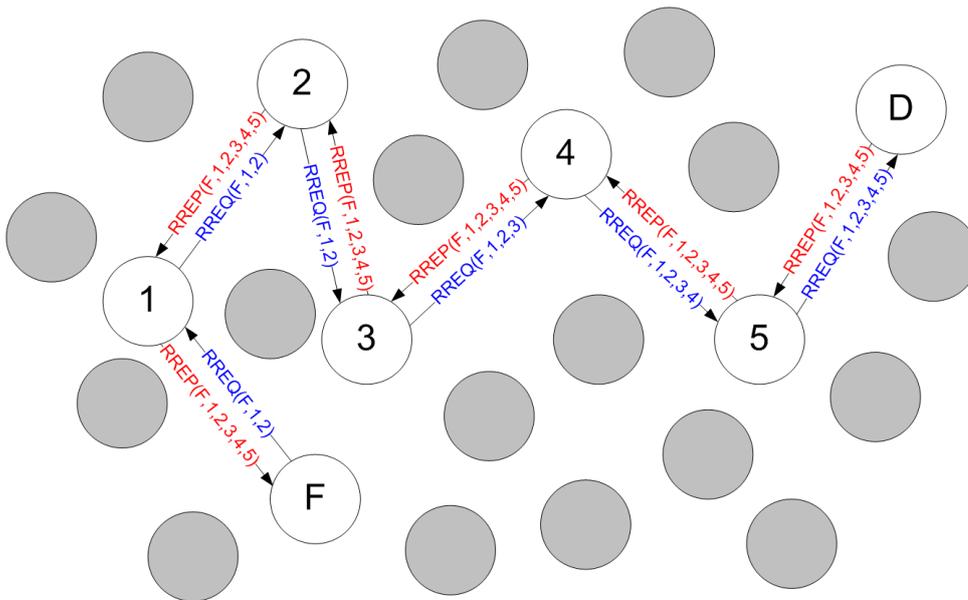


Figura 3.1 : Esquema de descubrimiento de ruta implementado en DSR. Cronológicamente, los paquetes RREP (rojo) son enviados una vez que el último RREQ (azul) es recibido en el nodo destino.

ruta hacia el destino previamente construida, la fase de descubrimiento de ruta es en ese momento cancelada y un paquete RREP es enviado a la fuente con la suma de los dos tramos: fuente-retransmisor y retransmisor-destino. Esta técnica es denominada originalmente *caching* y se utiliza durante la exposición de la presente tesis bajo el término de *técnica de caché*. Con el propósito de limitar la sobrecarga de tráfico en la red generada por las solicitudes de descubrimiento de ruta, DSR restringe a 15 el número de saltos permitidos para alcanzar el destino de una comunicación. Esta limitación es ampliada a 20 saltos en las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo de tal forma que pueda mostrarse la disminución de la eficiencia de encaminamiento en redes con un número elevado de nodos.

En cuanto a la estructura de la red, los nodos son colocados formando triángulos equiláteros de 300 metros de lado. Esta elección es tomada con el fin de conseguir una aproximación lo más cercana posible a la red continua [Kleinrock y Silvester, 1987], estableciendo el máximo número de caminos que sea viable. En este sentido, la red triangular es la red regular en dos dimensiones que ofrece un empaquetamiento más denso: 6 nodos. Estas características reproducen aquéllas deseadas, por una parte debido a que la regularidad de la red mantiene

un número de vecinos constante separados una distancia muy similar en media a lo largo de toda la red -en [Rose, 1992] se afirma que la distancia media entre nodos de la mayoría de las redes, incluidas las desplegadas de manera aleatoria, es comparable a la mostrada por una red regular-. Y, por otra, dado que el máximo empaquetamiento implica la máxima variación de direcciones posibles y por tanto la máxima variabilidad de rutas. La opción de utilizar redes aleatorias se descarta en primer lugar por motivos computacionales ya que exige realizar un número suficiente de realizaciones de Monte-Carlo, lo que supone un incremento insalvable de la complejidad del experimento. Además, el uso de redes completamente aleatorias no aporta escenarios con un empaquetamiento más denso de 6 y, por el contrario, implica una conexión no homogénea de la red, permitiendo la formación de conjuntos separados de nodos que inciden directamente en la eficiencia del encaminamiento y cuyos efectos sólo pueden ser contrarrestados mediante una cantidad ingente de simulaciones, lo que no es apropiado por la carga computacional que supone. Nótese que en el diseño de experimentos también debe tomarse en consideración el coste de los mismos.

Esta estructura triangular original es objeto de una leve modificación aleatoria en cada *realización* llevada a cabo. Cada uno de los despliegues de nodos resultantes configura por consiguiente una variable de diseño específica distinta. Estas modificaciones son realizadas para evitar la obtención de estadísticas con una marcada estructura debida al hecho de que la red original genera tan sólo N posiciones permitidas, siendo N el número de nodos en la red y, por tanto, los valores de R/L no cubren más que una parte del intervalo compacto $[0, 1]$. El uso de un conjunto de realizaciones de redes con pequeños cambios en la posición de sus nodos mantiene el mismo número de vecinos y asegura la conectividad global de la red, cubriendo una parte significativa del intervalo $[0, 1]$. Asimismo, en cada realización, las parejas F-D son elegidas de forma arbitraria de tal forma que se garantice que ninguna ruta es priorizada por las técnicas de caché que incluye DSR. Por último, la creación de diferentes realizaciones produce una disminución significativa de los requisitos de procesamiento impuestos por el elevado número de nodos y conexiones F-D que se mantienen. Así, se logra una reducción de la carga computacional, el tiempo de ejecución, la memoria empleada y la fase de post-procesado, mientras se asegura la misma significatividad estadística de los resultados obtenidos.

El diseño de exploración incluye las variables de diseño comunes y específicas detalladas hasta el momento, particularizando el tamaño de la red a 547 nodos con un rango de cobertura a primeros vecinos -potencia de transmisión de 100 mW-.

Diseño factorial

El siguiente paso de los experimentos se realiza bajo la perspectiva del diseño factorial. En el mismo, se estudian los efectos conjuntos y comparativos de distintas variables a estudio, como el tamaño de la red, el rango de cobertura de los nodos y el uso de técnicas de caché, en

la eficiencia de encaminamiento. Siguiendo este esquema, se construyen diferentes *escenarios*. Cada escenario se define mediante el conjunto de variables de diseño comunes, un número concreto de nodos, un rango de cobertura específico y el uso o no de técnicas de caché. Los escenarios se crean con 91, 217 ó 547 nodos dispuestos en una estructura triangular como la mostrada en la Figura 3.2. Esta disposición permite la extracción de conclusiones acerca de la

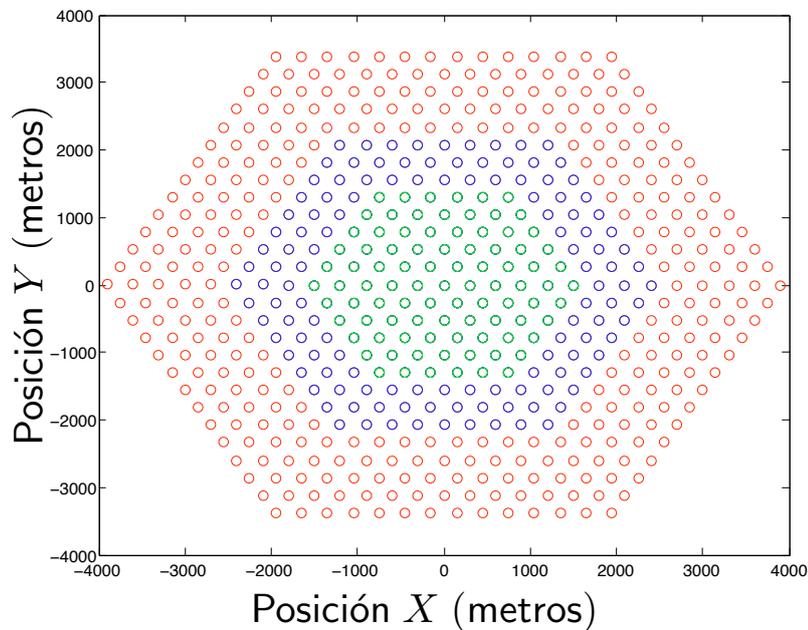


Figura 3.2 : Disposición de 91 (verde), 217 (verde y azul) y 547 (verde, azul y rojo) nodos en una estructura triangular.

eficiencia de encaminamiento en relación con el tamaño de la red. Además, se usan dos valores diferentes de la potencia de transmisión en la red de 547 nodos: 100 y 150 mW, que son denominados *cobertura a primeros vecinos* y *cobertura a segundos vecinos* respectivamente. Por consiguiente, el número de vecinos varía de 6 a 12 de tal forma que es posible la evaluación de la eficiencia de encaminamiento en función del rango de cobertura de los nodos. Por último, para esta misma red de 547 nodos con ambos rangos de cobertura a primeros y segundos vecinos, se añade una variable adicional relativa al uso de técnicas de caché para el descubrimiento de ruta, considerando si este tipo de técnicas ofrece beneficios en cuanto a eficiencia de encaminamiento de forma adicional a los relativos a la reducción de la sobrecarga de tráfico de la red debida a la fase de descubrimiento de ruta. A lo largo del texto se hace uso de los subíndices $1v$ y $2v$ para denotar los escenarios con cobertura a primeros y segundos vecinos respectivamente y los superíndices cc (*con caché*) y sc (*sin caché*) para hacer referencia a los escenarios caracterizados por el uso o la eliminación de técnicas de caché. De esta forma los distintos escenarios descritos anteriormente son identificados por: 91_{1v}^{cc} , 217_{1v}^{cc} , 547_{1v}^{cc} , 547_{2v}^{cc} y 547_{1v}^{sc} .

Aproximaciones TFaTD y FCaTD

A partir de las bases generales del conjunto de variables de diseño -de exploración y factorial- y respuesta descrito anteriormente, se llevan a cabo simulaciones bajo dos *aproximaciones* diferentes: *todas las fuentes a todos los destinos (TFaTD)* y *fuentes central a todos los destinos (FCaTD)*.

Las simulaciones de TFaTD se caracterizan por el establecimiento de rutas desde cada nodo funcionando como fuente a cualquier otro nodo que actúa como destino. Bajo este criterio, se simulan los escenarios 91_{1v}^{cc} , 217_{1v}^{cc} , 547_{1v}^{cc} , 547_{2v}^{cc} y 547_{1v}^{sc} . En las diferentes realizaciones de cada escenario los nodos son arbitrariamente trasladados desde sus posiciones originales a un punto aleatorio de un círculo de 20 metros de radio, centrado en dichas posiciones originales, de acuerdo con una distribución gaussiana. Esta modificación de las ubicaciones de los nodos de la disposición triangular inicial tiene como fin suavizar en cierta medida la estructura que reflejan los histogramas debido al conjunto finito de valores de R/L que produce la propia distribución de los nodos. Ambos tipos de simulación -sobre posiciones originales y modificadas- arrojan los mismos resultados relativos al radio de persistencia que los caracteriza. La demostración de esta afirmación puede encontrarse en la Figura 3.15 presentada en el Apartado 3.2 en la que se observa que, aunque los histogramas de la red de posiciones originales presentan una estructura marcada debida a la colocación invariable de los nodos, la curva teórica a la que se ajusta -que define la eficiencia del encaminamiento- es esencialmente la misma en la que encaja el histograma resultante de la red de posiciones movidas. Se llevan a cabo 600 realizaciones con 500 parejas F-D para los escenarios 91_{1v}^{cc} y 217_{1v}^{cc} y 547 realizaciones con 546 parejas F-D para los escenarios 547_{1v}^{cc} , 547_{2v}^{cc} y 547_{1v}^{sc} . De esta forma, se consigue un número de rutas establecidas en cada escenario en el rango de $3 \cdot 10^5$ -los detalles pueden ser consultados en el Cuadro 3.1-.

Para implementar la ausencia de técnicas de caché, en el caso especial del escenario 547_{1v}^{sc} se lleva a cabo una simulación independiente por cada pareja F-D posible dentro de la red. De esta forma, cada fase de descubrimiento de ruta es siempre la primera en ser implementada y así, se ve forzada a encontrar por sus propios medios el mejor camino entre fuente y destino, no siendo permitida la reutilización completa o parcial de otras rutas previamente establecidas.

La aproximación FCaTD conecta el nodo central con el resto. De esta manera la dispersión espacial de la eficiencia de encaminamiento puede ser observada de forma visual. La ventaja de esta aproximación es que ofrece una interpretación de la disminución de la eficiencia con base en su componente espacial. Así, se accede a detalles sobre la medida de la eficiencia que no son evidentes a partir de su mero valor numérico -evidentemente la interpretación de un valor concreto de eficiencia es reforzada dependiendo de la distancia que separa a fuente y destino-. En este caso se simulan los escenarios 547_{1v}^{cc} , 547_{2v}^{cc} y 547_{1v}^{sc} . Para todos ellos se genera un

Aprox.	Escenario	# Nodos	Potencia (mW)	Caché	Realiz.	Parejas F-D	# Rutas
TFaTD	91_{1v}^{cc}	91	100	Sí	600	500	$3 \cdot 10^5$
	217_{1v}^{cc}	217	100	Sí	600	500	$3 \cdot 10^5$
	547_{1v}^{cc}	547	100	Sí	547	546	$2,98 \cdot 10^5$
	547_{2v}^{cc}	547	150	Sí	547	546	$2,98 \cdot 10^5$
	547_{1v}^{sc}	547	100	No	$2,98 \cdot 10^5$ (546×547)	1	$2,98 \cdot 10^5$
FCaTD	547_{1v}^{cc}	547	100	Sí	200	546	$1,09 \cdot 10^5$
	547_{2v}^{cc}	547	150	Sí	200	546	$1,09 \cdot 10^5$
	547_{1v}^{sc}	547	100	No	$1,09 \cdot 10^5$ (546×200)	1	$1,09 \cdot 10^5$

Cuadro 3.1 : Resumen de las variables de diseño de los experimentos

conjunto de 200 realizaciones, trasladando los nodos desde sus posiciones originales a un punto aleatorio de una circunferencia de radio 20 metros centrada en aquella. Todos los nodos excepto el central son tomados como destino en cada realización. En los escenarios *con caché*, las transmisiones siguen una secuencia aleatoria desde el nodo central a cada destino para evitar priorizar ciertas direcciones mediante el uso de técnicas de caché en los escenarios que las contemplan. En el escenario *sin caché* obviamente esta consideración no tiene sentido puesto que cada transmisión entre una pareja F-D se lleva a cabo en una simulación independiente. En suma, se obtienen más de 10^5 rutas entre parejas F-D para cada uno de los escenarios descritos.

El Cuadro 3.1 muestra un breve resumen del diseño de simulaciones llevado a cabo.

3.2 Resultados empíricos

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones ejecutadas bajo las aproximaciones de TFaTD y FCaTD.

Dado que el objetivo principal de los mismos es la validación o falseo del modelo teórico expuesto en el Capítulo 2, se desarrolla una metodología propia de carácter genérico para el ajuste de medidas experimentales a curvas teóricas. A través de la misma, se obtiene el parámetro ξ que caracteriza la distribución empírica obtenida mediante simulación. A su vez, este mismo procedimiento determina el rango de variación de dicho ajuste, describiendo de manera completa la magnitud establecida para el radio de persistencia.

Una vez demostrada la validez del modelo teórico propuesto, los resultados obtenidos son analizados con el fin de extraer conclusiones relativas al diseño de exploración y factorial. De

esta forma, se realizan observaciones acerca del comportamiento del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas en función de diferentes parámetros como tamaño de la red, radio de cobertura de los nodos o uso de técnicas de caché.

Por último, a partir del modelo teórico y la metodología seleccionada para el diseño de las simulaciones, se realiza un análisis de los trabajos previos presentados en el Apartado 1.5.

3.2.1 Obtención del radio de persistencia característico de los resultados experimentales

La Figura 3.3 muestra los distintos pasos que conforman la metodología desarrollada para la determinación del radio de persistencia, ξ , que representa cada distribución de R/L obtenida empíricamente. El procedimiento parte de la DEaE expresada mediante una función analítica

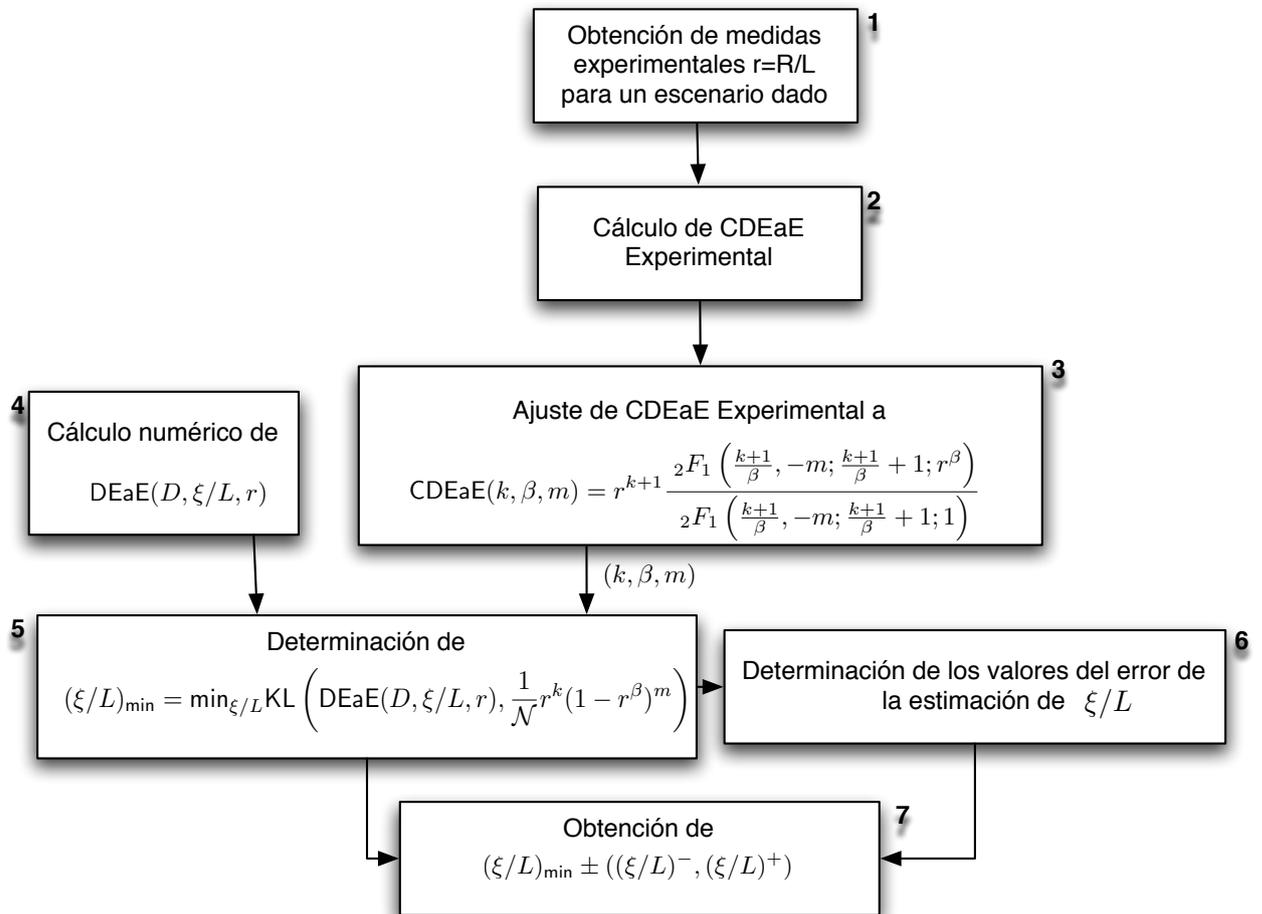


Figura 3.3 : Diagrama del procedimiento para la obtención del ajuste de los datos experimentales a las curvas teóricas definidas en el modelo.

de $r = R/L$ dependiente de los parámetros k , β y m -Bloque 1- según

$$P_H(\mathbf{R}) \propto r^k (1 - r^\beta)^m . \quad (3.1)$$

Esta función densidad de probabilidad (fdp) no es utilizada directamente sino a través de su Función de Distribución Cumulativa (CDF) que será referida como CDEaE -Bloque 2-

$$U_H(\mathbf{R}) = \frac{1}{\mathcal{N}} \int_{-\infty}^{\infty} r^k (1 - r^\beta)^m dr, \quad (3.2)$$

donde \mathcal{N} es la constante de normalización

$$\mathcal{N} = \frac{{}_2F_1\left(\frac{k+1}{\beta}, -m; \frac{k+1}{\beta} + 1; 1\right)}{k+1}, \quad (3.3)$$

de tal forma que se elimina la dependencia de la fdp con el número de divisiones que sean tomadas.

La CDEaE experimental producida se expresa a continuación de forma analítica mediante la determinación -Bloque 3- de los parámetros, k , β y m según

$$\text{CDEaE}(k, \beta, m) \equiv r^{k+1} \frac{{}_2F_1\left(\frac{k+1}{\beta}, -m; \frac{k+1}{\beta} + 1; r^\beta\right)}{{}_2F_1\left(\frac{k+1}{\beta}, -m; \frac{k+1}{\beta} + 1; 1\right)}, \quad (3.4)$$

donde ${}_2F_1$ denota la función hipergeométrica. El subproceso que implementa este ajuste entre la CDEaE experimental y su función analítica se lleva a cabo en dos fases. La primera de "ajuste grueso" parte de un submuestreo de 1000 puntos que son seleccionados de forma ordenada. Con éstas se realiza la estimación de los coeficientes de la función de regresión no lineal usando mínimos cuadrados. La serie de iteraciones se abandona al cumplirse una de las siguientes condiciones:

- Se ha llegado a un máximo de 200 iteraciones
- La tolerancia en la estima de los coeficientes es menor de 10^{-8}
- La tolerancia de la suma de los cuadrados de los residuos es menor de 10^{-8}

Los parámetros iniciales así obtenidos, se introducen en la segunda fase de "ajuste fino" en la que se toman todas las muestras originales y se repite el proceder anterior, con la única salvedad de su restricción en este caso a 100 iteraciones. El resultado final de este subproceso es la determinación de la terna (k, β, m) que describe una expresión de la CDEaE capaz de reproducir fielmente aquélla generada por los valores experimentales de R/L .

En paralelo, se lleva a cabo un cálculo numérico de las DEaE teóricas -Bloque 4- presentadas en el Capítulo 2 para distintos valores de dimensión, radio de persistencia normalizado y eficiencia ($\text{DEaE}(D, \xi/L, r)$).

La expresión analítica de la fdp experimental a partir de la terna (k, β, m) seleccionada en el Bloque 3 y las distintas curvas teóricas de la DEaE para diferentes casos -Bloque 4- son

comparadas mediante el método de la *divergencia de Kullback-Leibler*.

La divergencia de Kullback-Leibler (*divergencia K-L*) [Cover y Thomas, 2006b] es una medida de la distancia entre una distribución de probabilidad P real y una Q arbitraria. En la mayor parte de los casos, es utilizada para la determinación del ajuste de una serie de datos empíricos generados mediante observaciones, tomas de muestras o simulaciones (P) a un modelo o aproximación (Q) que describe su distribución de probabilidad. Dadas unas distribuciones de probabilidad P y Q de una variable aleatoria continua, se define la divergencia K-L de Q sobre P como

$$DL_{KL}(P||Q) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} dx \quad (3.5)$$

que, para el caso discreto se expresa como

$$DL_{KL}(P||Q) = \sum_i P(i) \log \frac{P(i)}{Q(i)}, \quad (3.6)$$

donde p y q son las densidades de P y Q .

A través de este método se selecciona el radio de persistencia mínimo, $(\xi/L)_{min}$ -Bloque 5- y, a partir del mismo y de la curva de divergencia K-L, los radios de persistencia de corte, $(\xi/L)_{corte}^{min}$ y $(\xi/L)_{corte}^{max}$ -Bloque 6-. El primero de ellos caracteriza la curva teórica que arroja el menor valor de la divergencia K-L respecto de la fdp experimental. De esta forma, se concluye que este valor de $(\xi/L)_{min}$ es también el representativo de los resultados empíricos obtenidos. Al mismo tiempo, los segundos determinan el rango de variación del parámetro $(\xi/L)_{min}$. Así, se establecen los límites dentro de los cuales se confinan todos los valores de ξ/L susceptibles de caracterizar la distribución experimental en cada punto, con una desviación de un tanto por ciento determinado de su divergencia K-L respecto del mínimo obtenido. En este caso, el valor seleccionado es 10 %.

Finalmente, reuniendo los resultados de los Bloques 5 y 6, se obtiene la expresión global del ajuste:

$$(\xi/L)_{min} \pm \left[(\xi/L)_{corte}^{min}, (\xi/L)_{corte}^{max} \right] \quad (3.7)$$

recogida en el Bloque 7.

3.2.2 TFaTD

Se presentan los resultados del cociente R/L , obtenidos a partir del conjunto de simulaciones de los escenarios 91_{1v}^{cc} , 217_{1v}^{cc} , 547_{1v}^{cc} , 547_{2v}^{cc} y 547_{1v}^{sc} descritos anteriormente. Debido a la dependencia de la eficiencia de encaminamiento con el número de saltos de la ruta, tal y como se afirma en el Capítulo 2, se representa una gráfica para cada uno de los valores de

este parámetro, -2 a 20 saltos-.

Asimismo, estas medidas experimentales de R/L se muestran bajo la forma de ambas, su CDEaE (CDF) -Figuras 3.4, 3.6, 3.8, 3.10 y 3.12- y su DEaE (fdp) basada en histogramas normalizados de 100 divisiones -Figuras 3.5, 3.7, 3.9, 3.11 y 3.13-. En las primeras es posible apreciar el grado de ajuste de las curvas teóricas y experimentales. Este ajuste es independiente del número de divisiones que se seleccione para la representación de la fdp correspondiente. Por consiguiente, ofrece una demostración de la validez del modelo. Por su parte, la DEaE de R/L aporta otro tipo de observaciones referentes a la propia estructura de los datos recogidos, que no se hacen tan evidentes mediante la inspección de la CDEaE.

Adicionalmente, para completar la información ofrecida, se presenta la Figura 3.14, que muestra, como ejemplo, toda la secuencia de gráficas del escenario 547_{2v}^{cc} en una sola representación. De este modo, se obtiene una idea más visual de la evolución de las curvas de eficiencia representativas de cada salto en dicho escenario.

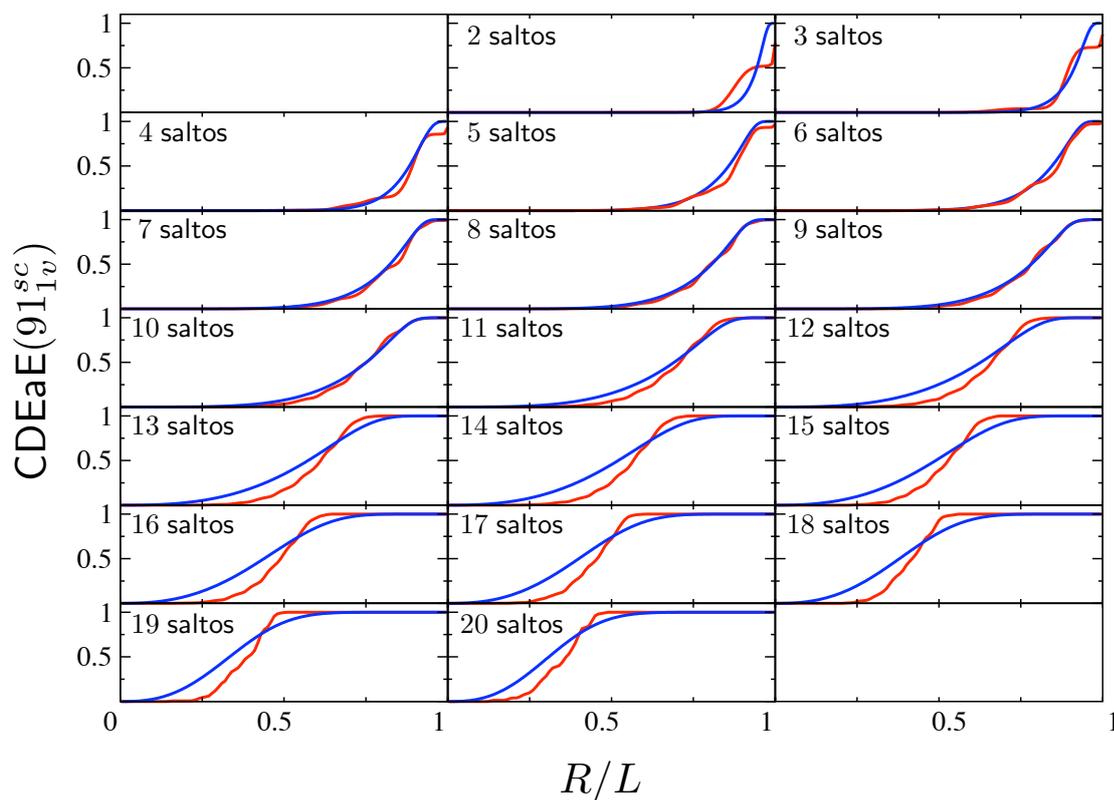


Figura 3.4 : CDEaE experimentales (rojas) y teóricas (azules) del cociente R/L de las rutas para el escenario 91_{1v}^{cc}

Es constatable que los resultados empíricos presentados reproducen las curvas teóricas descritas mediante distintos valores del radio de persistencia, ξ , normalizado a la longitud de

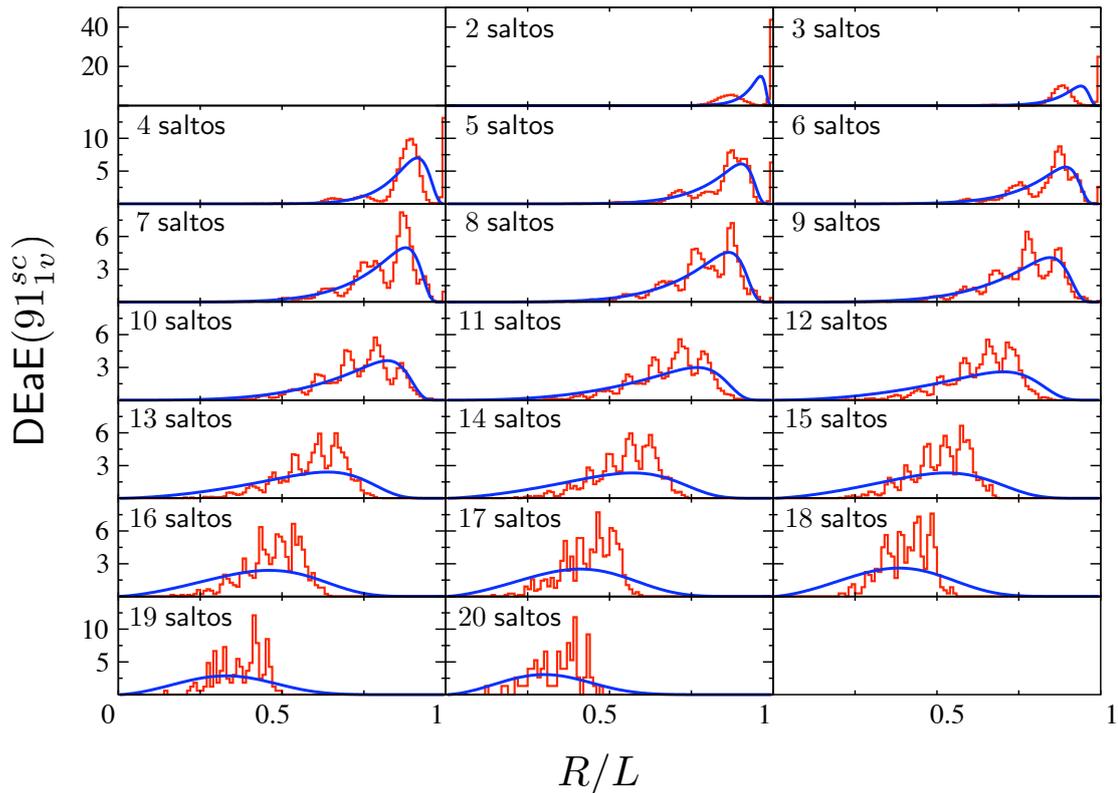


Figura 3.5 : DEaE en forma de histogramas experimentales (rojos) y curvas teóricas (azules) del cociente R/L de las rutas para el escenario 91_{1v}^{cc}

la ruta, L . De esta forma, puede afirmarse la corrección del modelo teórico y la validación de la Hipótesis de Partida 2 expuesta en el Apartado 1.6.

Observaciones generales

Las figuras relativas tanto a la CDEaE como a la DEaE de los valores empíricos de R/L presentan una serie de rasgos comunes que se describen a continuación.

- *Ajuste a curvas teóricas de 3D.* Las figuras experimentales no se ajustan a las curvas teóricas de 2 dimensiones sino de 3 dimensiones, aunque los nodos se distribuyen sobre un plano en todas las redes. La razón que explica este fenómeno es motivo de una investigación actual que pretende establecer la relación entre el espacio D -dimensional continuo sobre el que se desarrolla el modelo teórico y el espacio discreto sobre el que se realizan los experimentos descritos en el presente capítulo. Este paso de continuo a discreto modifica esencialmente la topología efectiva de la red pudiendo justificar un comportamiento tridimensional de una red desplegada de forma bidimensional dependiendo de parámetros como el número de vecinos que observa cada nodo.

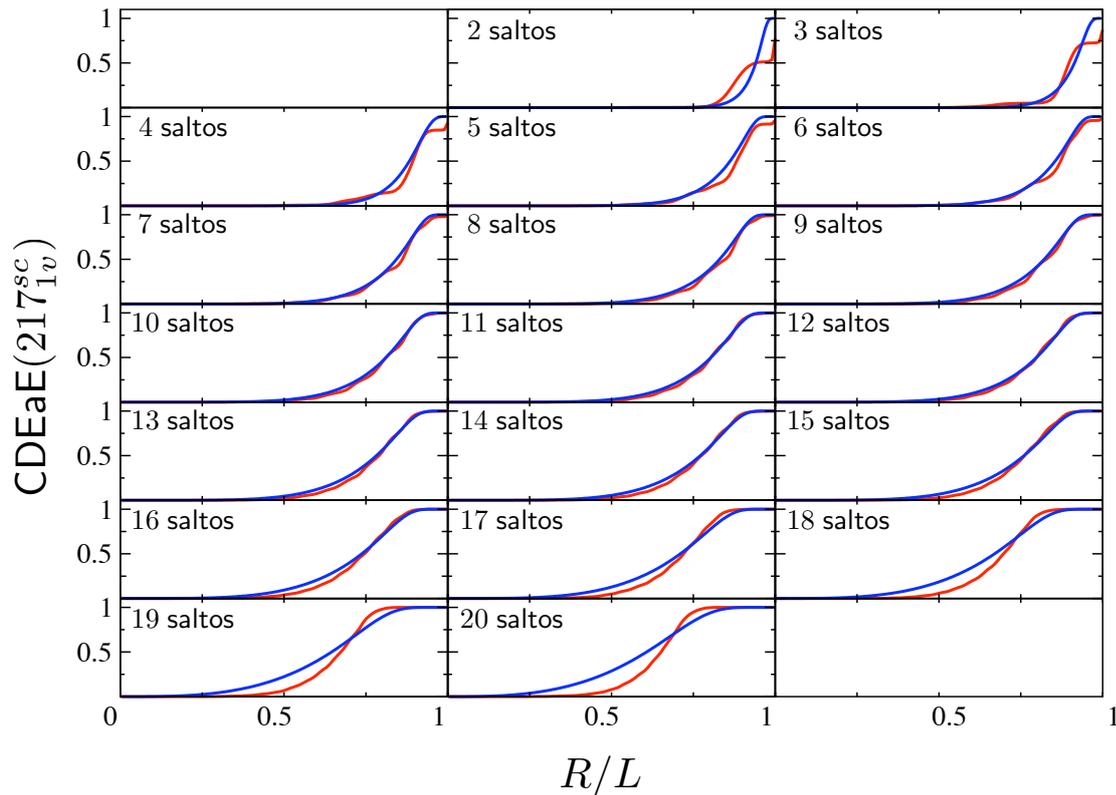


Figura 3.6 : CDEaE experimentales (rojas) y teóricas (azules) del cociente R/L de las rutas para el escenario 217_{1v}^{cc}

- *Disminución de la precisión del ajuste.* De forma mayoritaria, en las gráficas referentes a un número elevado de saltos, puede apreciarse una reducción de la precisión del ajuste de los datos experimentales a la curva teórica hallada. La razón de este efecto es que los caminos estadísticamente menos probables para un valor de ξ/L determinado sólo son registrados cuando se alcanzan cantidades muy elevadas de rutas establecidas. En las figuras representadas mediante la fdp, esta falta de valores extremos de R/L en ciertos escenarios y números de saltos también produce un incremento del valor máximo del histograma, debido a su normalización, que distribuye el área no cubierta a lo largo del resto de las divisiones del mismo.

Adicionalmente, a partir de las Figuras 3.5, 3.7, 3.9, 3.11 y 3.13, se generan las siguientes observaciones generales:

- *Laguna de eficiencia.* En la parte derecha de las gráficas se observa una ausencia de valores de R/L cercanos a 1. Esta laguna indica la existencia de un conjunto de niveles de alta eficiencia de encaminamiento que no son alcanzables para cada número concreto de saltos y que aumentan a medida que decae la eficiencia. En la Figura 3.14, puede

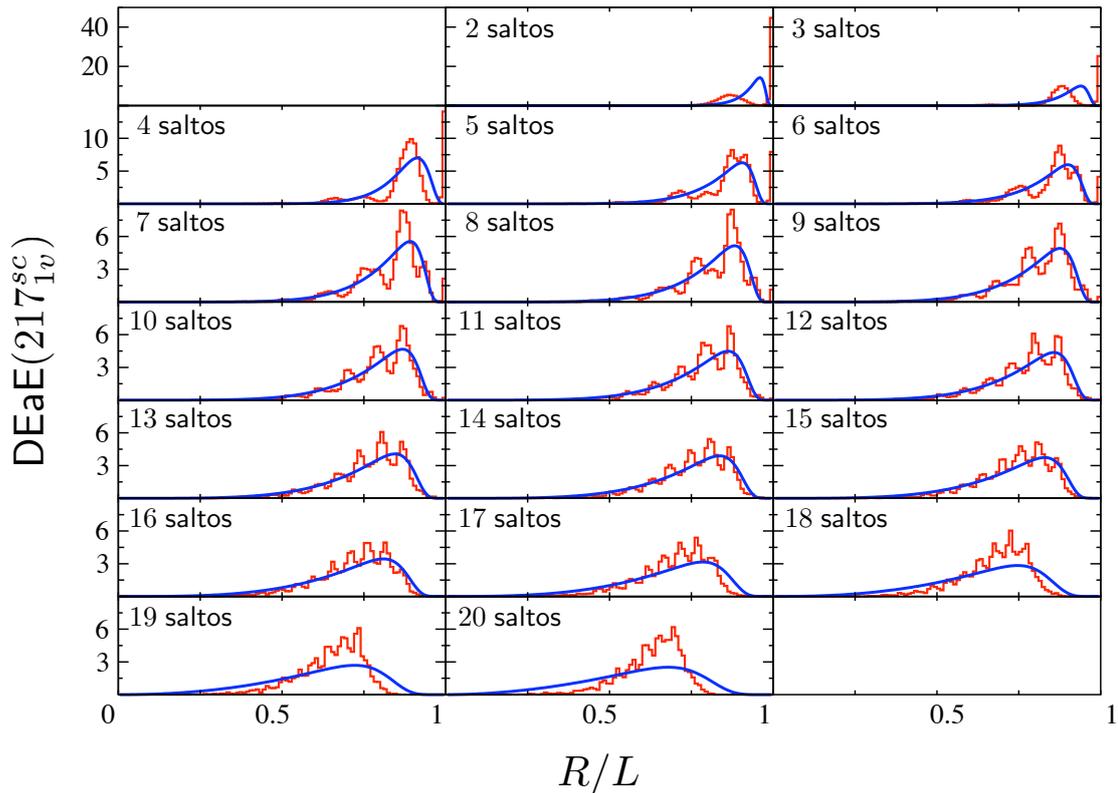


Figura 3.7 : DEaE en forma de histogramas experimentales (rojos) y curvas teóricas (azules) del cociente R/L de las rutas para el escenario 217_{1v}^{cc}

observarse una reducción de ξ/L en las rutas según se incrementa el número de saltos. En la misma, el máximo de las curvas disminuye y se desplaza hacia el 0, aumentando la laguna de eficiencia.

- *Estructura en el histograma.* La topología de la red incluye tan sólo un ligero grado de aleatoriedad. En consecuencia, los histogramas presentados muestran cierta estructura debida a que únicamente existe un número discreto de valores permitidos de R/L . Este efecto se muestra claramente en el escenario 547_{2v}^{cc} -Figura 3.11- donde el contorno más suave de sus histogramas es debido al nuevo conjunto de longitudes de salto permitidas en este escenario, que incrementa el conjunto de valores permitidos de R/L . No obstante, esta estructura no invalida el ajuste a las curvas teóricas. En la Figura 3.15 se presenta la distribución de R/L en rutas de 10 saltos producida por las simulaciones del escenario 547_{1v}^{cc} , en el que los nodos se colocan respectivamente en sus posiciones originales y en las mismas movidas a un punto de un círculo de radio 20 metros siguiendo una distribución gaussiana. El ajuste de dichos histogramas a las curvas teóricas se muestra en la Figura 3.16. De la observación de ambas puede deducirse que el histograma de la

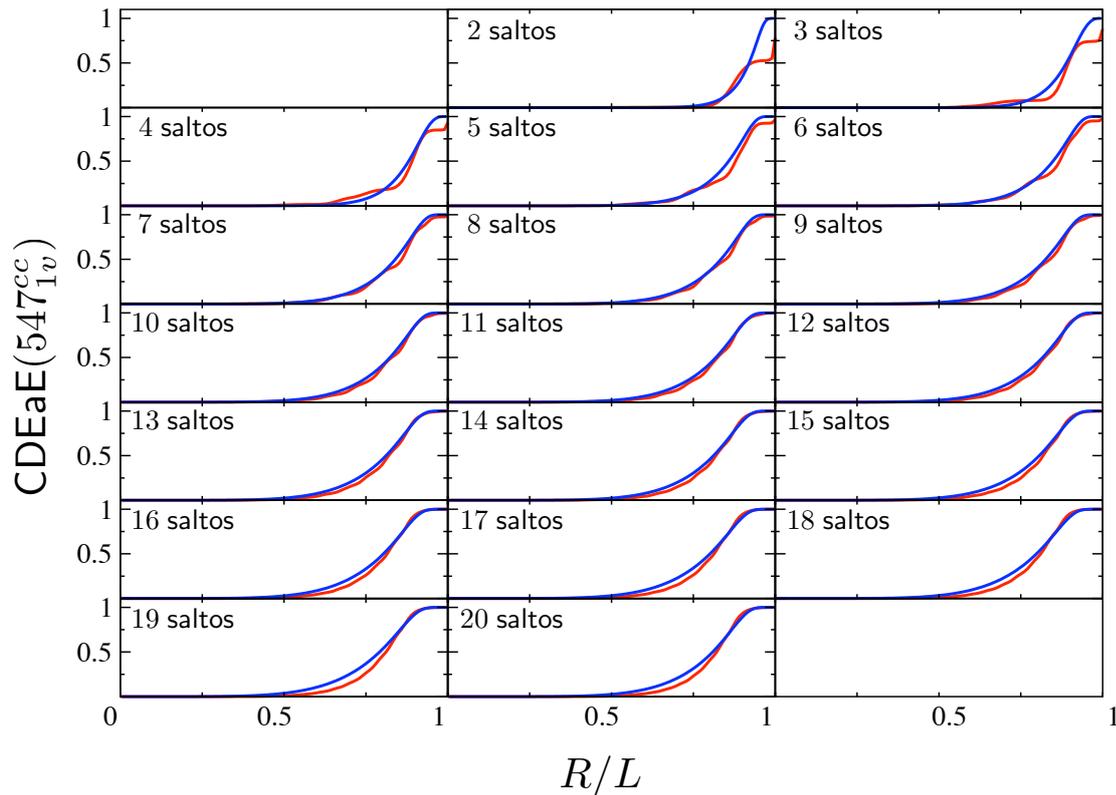


Figura 3.8 : CDEaE experimentales (rojas) y teóricas (azules) del cociente R/L de las rutas para el escenario 547_{1v}^{cc}

red de posiciones modificadas (histograma rojo) se ajusta a la curva teórica $\xi/L = 0,68$ y, por su parte, el de la red de posiciones originales (histograma verde) lo hace a una curva de $\xi/L = 0,67$. Teniendo en cuenta que la precisión en el error de las aproximaciones es de 0,01 debido al propio muestreo, ambas curvas pueden asumirse iguales, afirmándose por tanto la conservación de la distribución de valores de R/L a pesar de la estructura inducida por la topología de la red.

Observaciones del diseño factorial

El análisis comparativo de los resultados obtenidos en función de los distintos parámetros a estudio -número de nodos de la red, rango de cobertura y uso de técnicas de caché- da lugar a una serie de observaciones derivadas de las Figuras 3.5, 3.7, 3.9, 3.11 y 3.13. A su vez, para este análisis se aportan las Figuras 3.17 y 3.18, que representan los valores de ξ/L de cada experimento frente al número de saltos para los casos de rango de cobertura a primeros y segundos vecinos respectivamente; en todos los escenarios incluidos se permite el uso de técnicas de caché. Tal y como se demuestra en el Apartado 2.6, el radio de persistencia, ξ , no depende de la longitud de la ruta, L , y por tanto decae con la inversa de N , siendo N

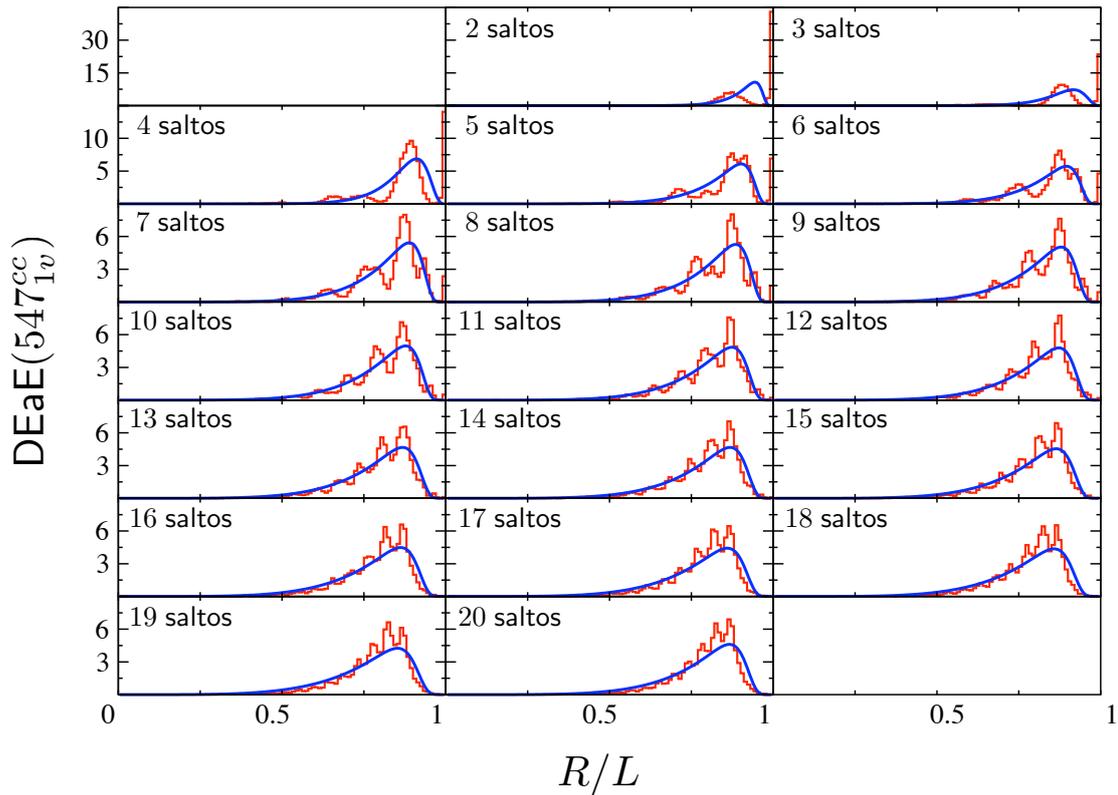


Figura 3.9 : DEaE en forma de histogramas experimentales (rojos) y curvas teóricas (azules) del cociente R/L de las rutas para el escenario 547_{1v}^{cc}

el número de saltos de la ruta -nótese que $L = N \cdot a$, donde a es la distancia media entre nodos-. Las curvas en esta figura son definidas como ajustes no lineales de la función

$$f(N) = a + b/N, \quad (3.8)$$

donde a y b son determinados para cada caso. La coincidencia de estos valores teóricos con los empíricos que fueron obtenidos mediante simulación provee una validación cuantitativa del modelo propuesto.

- *Comportamiento común en primeros saltos.* Considerando los rangos de variación del valor de ξ/L representados por las barras de la Figura 3.17, se observa que las curvas producidas por los escenarios de cobertura a primeros vecinos y uso de caché -91_{1v}^{cc} , 217_{1v}^{cc} y 547_{1v}^{cc} - comparten un mismo comportamiento en los primeros saltos y, desde un punto específico, comienzan a divergir. La Figura 3.19 muestra los ajustes de los escenarios 91_{1v}^{cc} , 217_{1v}^{cc} y 547_{1v}^{cc} a la misma curva teórica para un número de saltos igual a 6 y sus diferencias relativas. Estos puntos de divergencia marcan el número de saltos a partir del cual la topología de la red empieza a limitar la eficiencia de encaminamiento.

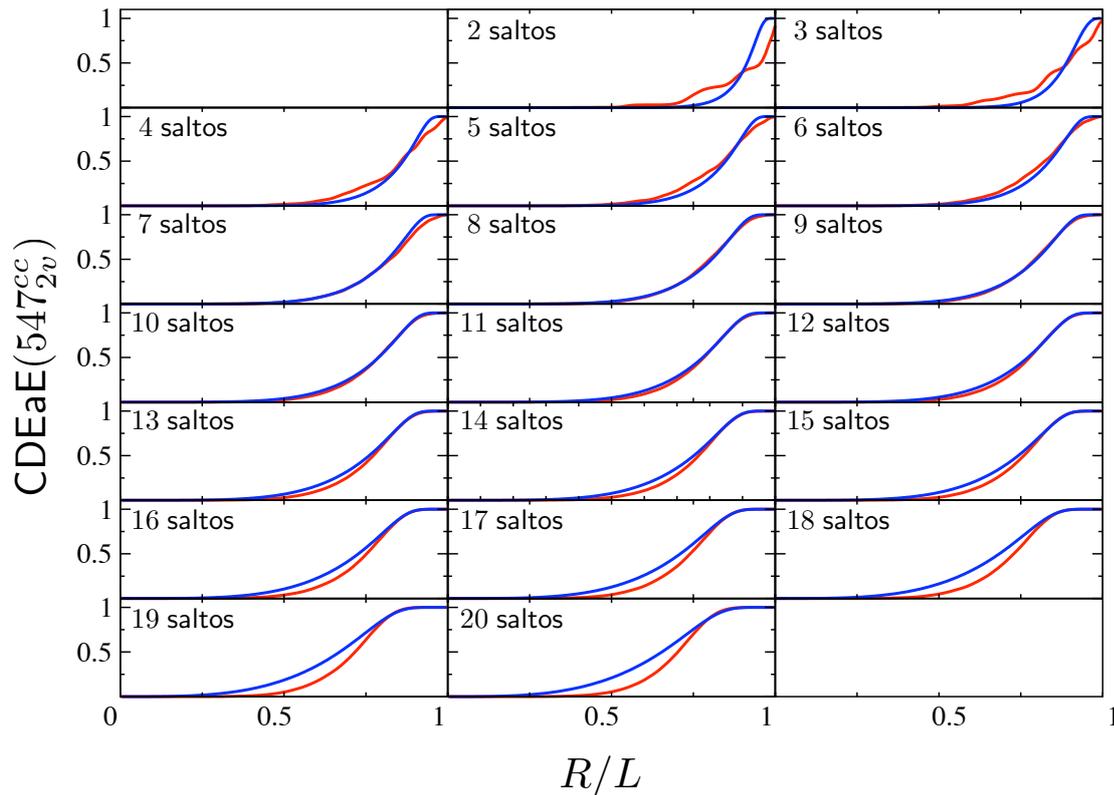


Figura 3.10 : CDEaE experimentales (rojas) y teóricas (azules) del cociente R/L de las rutas para el escenario 547_{2v}^{cc}

Para los escenarios 91_{1v}^{cc} y 217_{1v}^{cc} los puntos de divergencia se encuentran en 6 y 9 saltos respectivamente. De esta forma, puede afirmarse que el punto de divergencia está relacionado con el número medio de saltos en la red dado por $\sqrt{N/\pi}$ [Tonguz y Ferrari, 2006].

- *Variaciones de pendiente.* Por encima del doble del valor medio del número de saltos en la red -10 y 16 saltos respectivamente-, las curvas para 91_{1v}^{cc} y 217_{1v}^{cc} presentan una variación en su pendiente. La explicación de este efecto es objeto de estudio en la actualidad, tomando como partida la posible relación del mismo con el tamaño finito de la red y la imposición al encaminamiento relativa a evitar bucles en las rutas establecidas. Un comportamiento similar puede ser observado en la Figura 3.18, que muestra un cambio abrupto de la pendiente de la curva de 547_{2v}^{cc} a partir del salto 15. Esto no hace sino corroborar la aseveración anterior ya que el aumento del radio de cobertura de los nodos hasta los segundos vecinos, implica una reducción efectiva del tamaño de la red de $\sqrt{3}$ debido a la topología triangular de la red. Teniendo en cuenta este factor, el valor

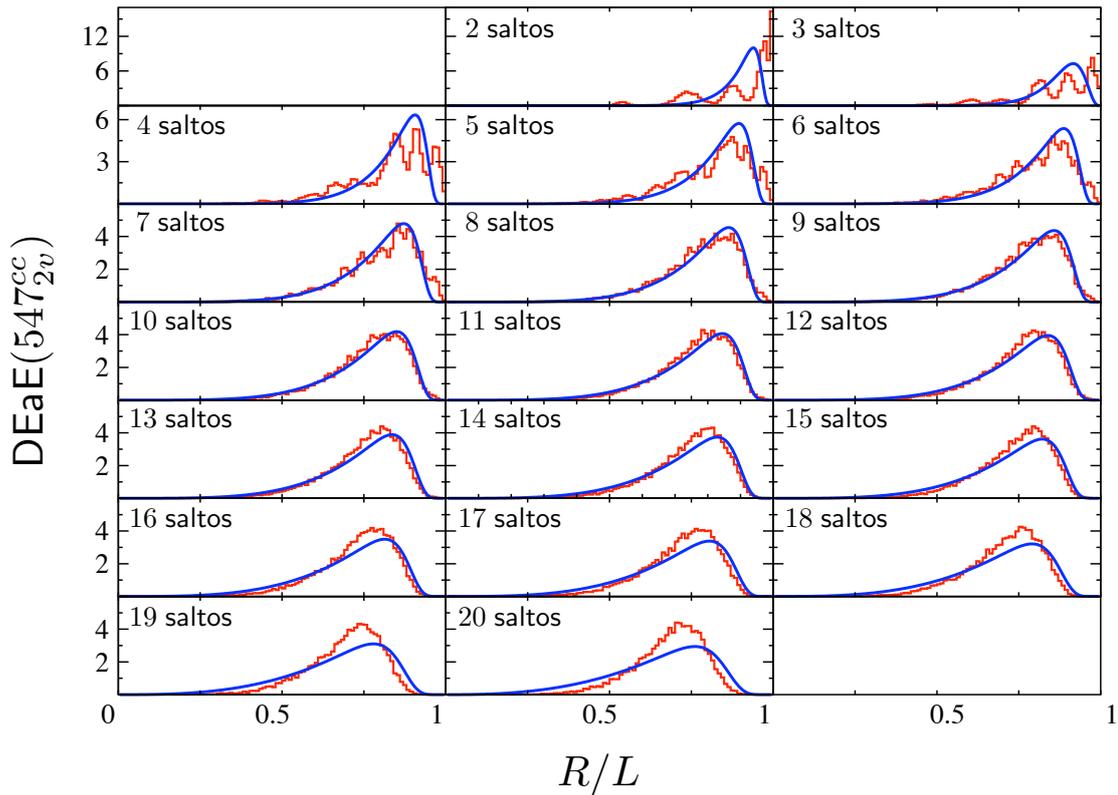


Figura 3.11 : DEaE en forma de histogramas experimentales (rojos) y curvas teóricas (azules) del cociente R/L de las rutas para el escenario 547_{2v}^{cc}

máximo del número de saltos en la red es:

$$2 \cdot \frac{\sqrt{547/\pi}}{\sqrt{3}} = 15 . \quad (3.9)$$

- *Mayor eficiencia de encaminamiento en saltos cortos.* La Figura 3.18 muestra que el escenario 547_{1v}^{cc} presenta una eficiencia de encaminamiento mayor que el 547_{2v}^{cc} . Este hecho contradice la intuición original con base en la cual cabe esperar un mejor ajuste del escenario 547_{2v}^{cc} a la línea recta que una fuente y destino debido a su mayor grado de libertad para elegir ángulos de salida en cada salto -12 frente a los 6 de 547_{1v}^{cc} -. Sin embargo, este razonamiento no incluye las consideraciones fundamentales a tener en cuenta para la explicación de este fenómeno. Por una parte, en 547_{2v}^{cc} los saltos largos son mucho más probables que los saltos cortos. Esto es producido por la operación de la fase de descubrimiento. En la misma, la respuesta, RREP, de un nodo alejado una cierta distancia de la fuente, llega más rápido a través de la ruta con menor número de saltos. Por consiguiente, en la elección del ángulo de salida no se incluyen 6 nuevos valores sino

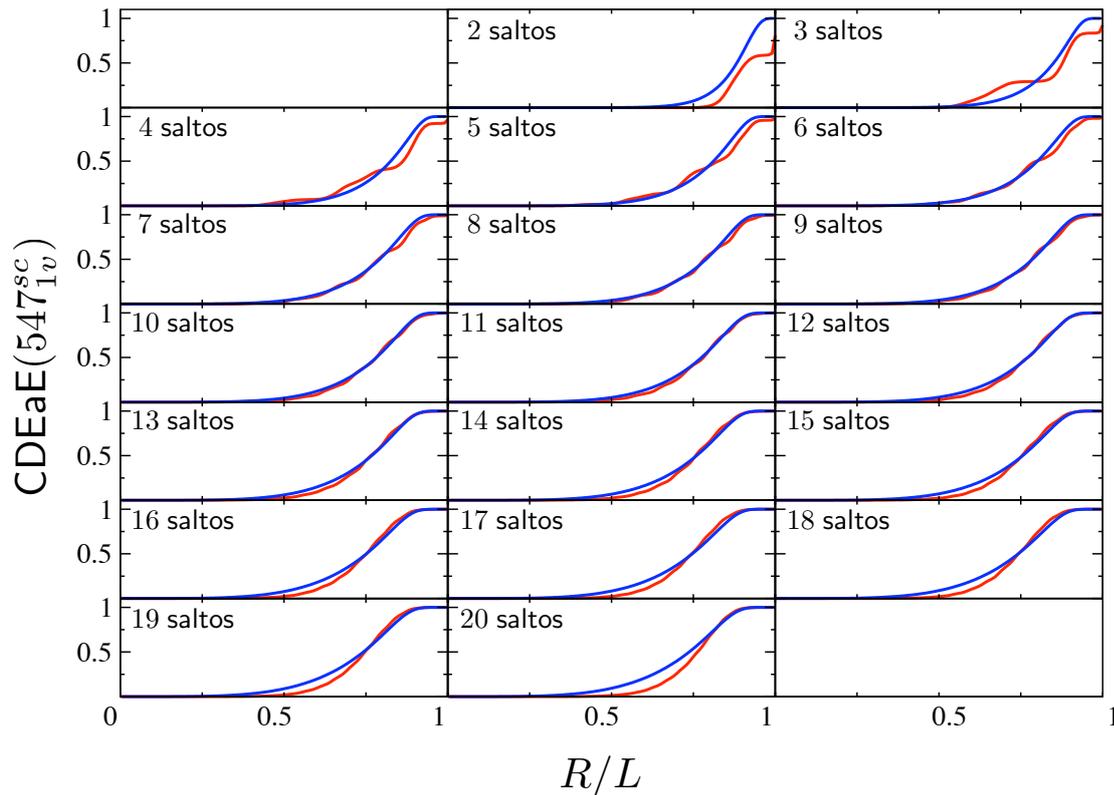


Figura 3.12 : CDEaE experimentales (rojas) y teóricas (azules) del cociente R/L de las rutas para el escenario 547_{1v}^{sc}

que, prioritariamente, se mantienen los 6 originales cambiando su orientación. Los saltos largos son en promedio más ineficientes que los cortos y, por ello, el escenario 547_{2v}^{cc} muestra una eficiencia de encaminamiento menor. Por otra parte, cabe pensar que un conjunto menor de direcciones induce una directividad que incide de manera directa en la eficiencia de encaminamiento.

- *Mejora de la eficiencia de encaminamiento mediante el uso de técnicas de caché.* La comparación de los escenarios 547_{1v}^{cc} -Figura 3.9- y 547_{1v}^{sc} -Figura 3.13- indica que el uso de técnicas de caché para la reutilización de las rutas ya establecidas -o partes de las mismas- mejora la eficiencia de encaminamiento. A la vista de la teoría expuesta y de los resultados obtenidos, que muestran un decaimiento de la eficiencia de encaminamiento con el aumento del número de saltos de la ruta, el motivo de este hecho puede encontrarse en cierta expansión del conocimiento de un nodo acerca de la red provocada por la reutilización de caminos establecidos por nodos más cercanos al destino que la propia fuente.

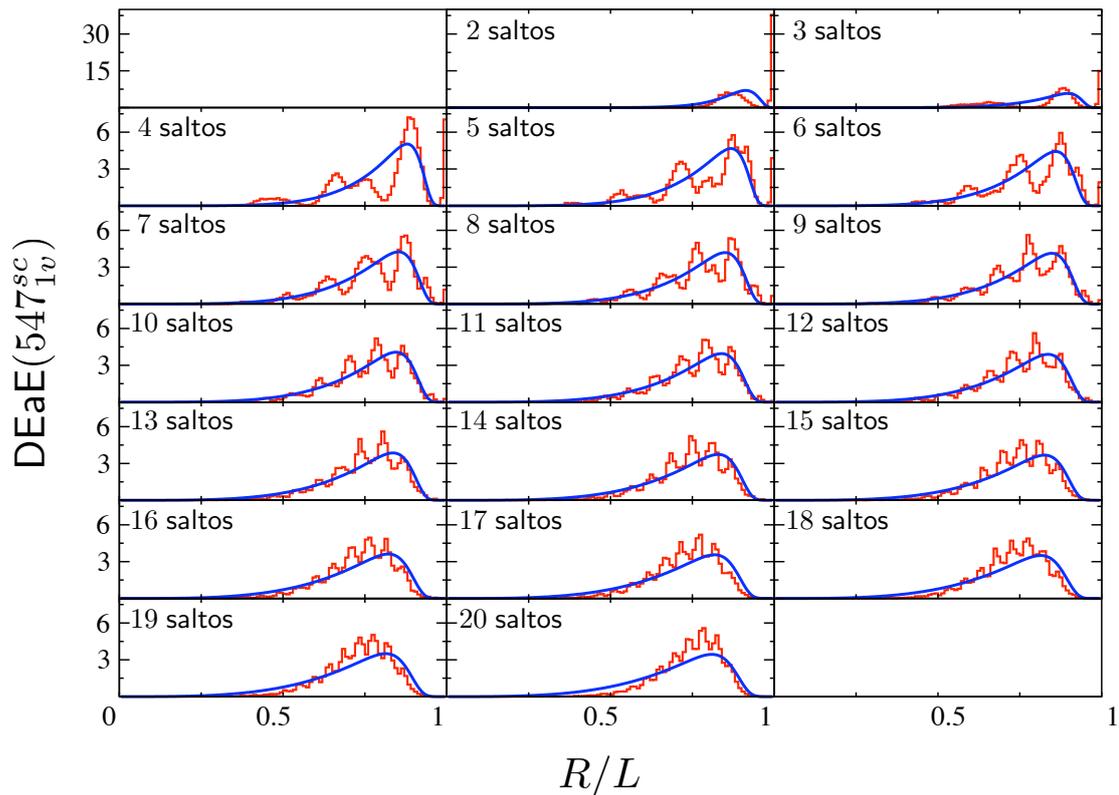


Figura 3.13 : DEaE en forma de histogramas experimentales (rojos) y curvas teóricas (azules) del cociente R/L de las rutas para el escenario 547_{1v}^{sc}

3.2.3 FCaTD

Los resultados de la aproximación FCaTD generan únicamente conclusiones relativas al diseño factorial. Son representados a través de mapas de contorno en los que, a cada posición de los nodos en la red le es asignado un color que varía desde el azul oscuro -altamente ineficiente- hasta el rojo -altamente eficiente-. Este color representa el valor medio de las medidas de R/L de las rutas establecidas entre el nodo central y cada uno de los restantes, que actúan como destinos. Los mapas de contorno permiten la inspección visual de la dispersión espacial de los valores de R/L y el radio de persistencia. Bajo esta aproximación se simulan los escenarios 547_{1v}^{cc} , 547_{2v}^{cc} y 547_{1v}^{sc} . Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 3.20, 3.21 y 3.22.

Observaciones generales

Como observación general de los mismos se puede destacar el decaimiento de la eficiencia de encaminamiento a medida que la posición del destino seleccionado está más alejada del nodo central, que siempre actúa como fuente. Este resultado es consistente con los producidos por la aproximación TFaTD en los que se comprueba cómo la eficiencia de encaminamiento

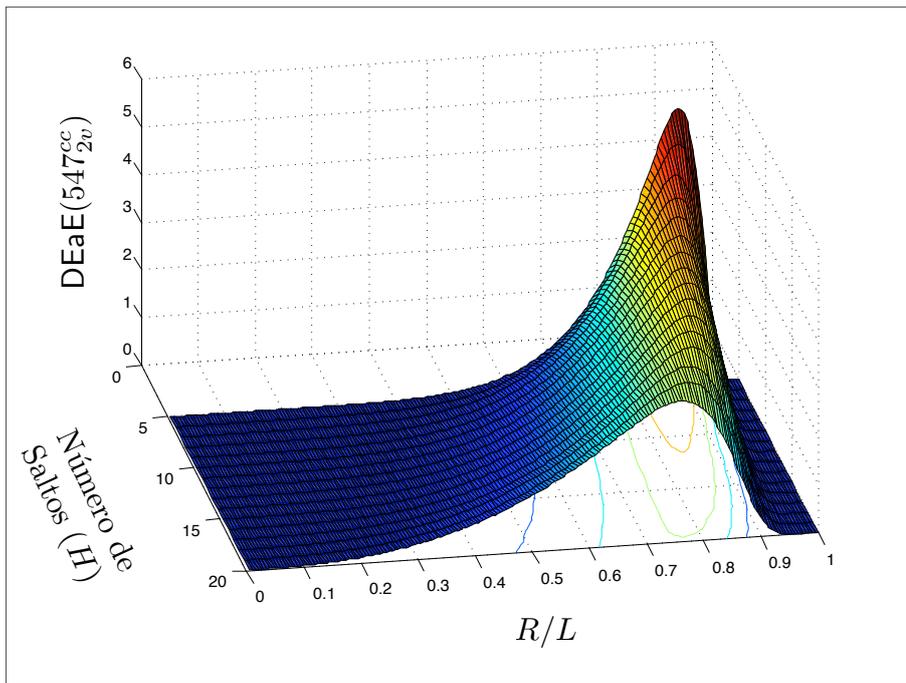


Figura 3.14 : Evolución de la DEaE con el número de saltos de la ruta en el escenario 547_{2v}^{cc}

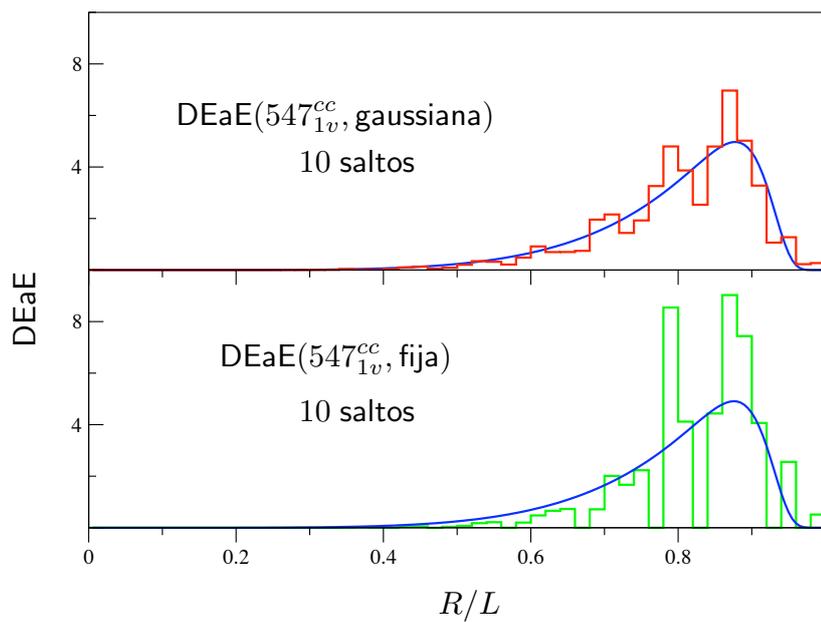


Figura 3.15 : Histogramas experimentales de rutas con 10 saltos generados por el escenario 547_{1v}^{cc} con nodos en posiciones modificadas según gaussiana de $\sigma = 20m$ (rojo) y originales (verde) junto con las curvas teóricas de $\xi/L = 0,68$ y $\xi/L = 0,67$ (azul) respectivamente.

disminuye con el número de saltos en todos los escenarios simulados.

Observaciones del diseño factorial

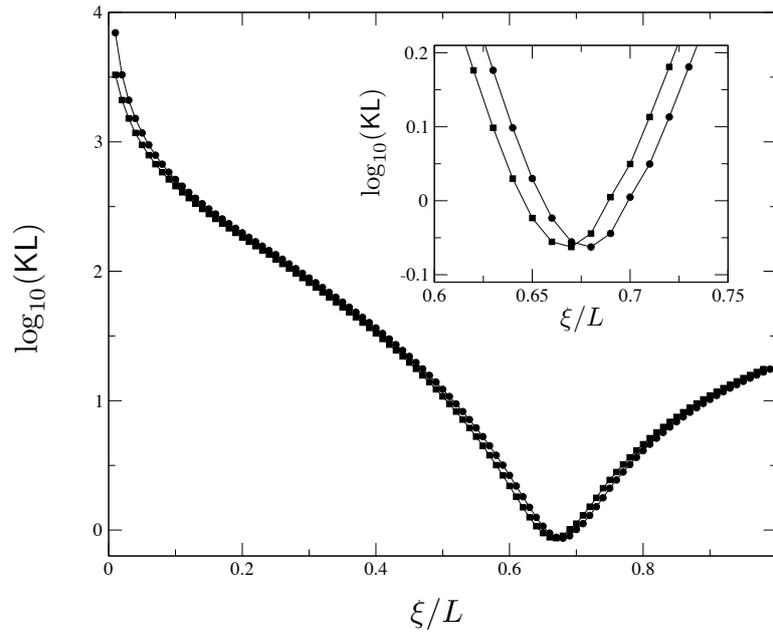


Figura 3.16 : Divergencia de KL para los histogramas experimentales generados por el escenario 547_{1v}^{cc} con nodos en posiciones modificadas según gaussiana de $\sigma = 20m$ (círculos) y originales (cuadrados) de la distribución extremo a extremo de rutas con 10 saltos.

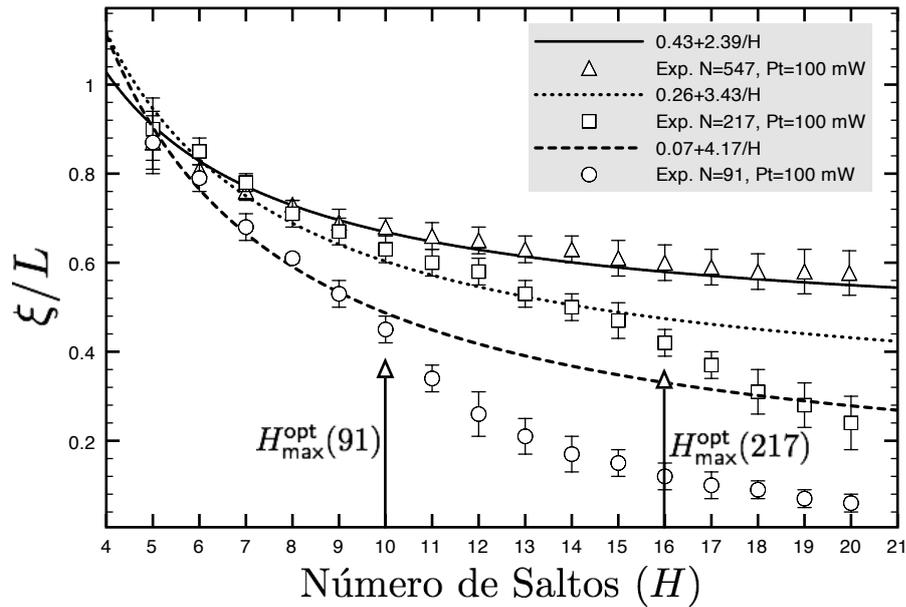


Figura 3.17 : Representación de los valores experimentales de ξ/L y su rango de variación (barra vertical) frente al número de saltos para 91_{1v}^{cc} , 217_{1v}^{cc} y 547_{1v}^{cc} . Las curvas continuas respectivas corresponden a la función $f(N) = a + b/N$, donde a y b son constantes calculadas mediante un proceso de ajuste no lineal.

Una vez más se aborda el estudio conjunto de distintas variables para examinar los efectos que producen en la eficiencia de encaminamiento. Las primeras observaciones que pueden realizarse manifiestan la consistencia entre las aproximaciones TFaTD y FCaTD.

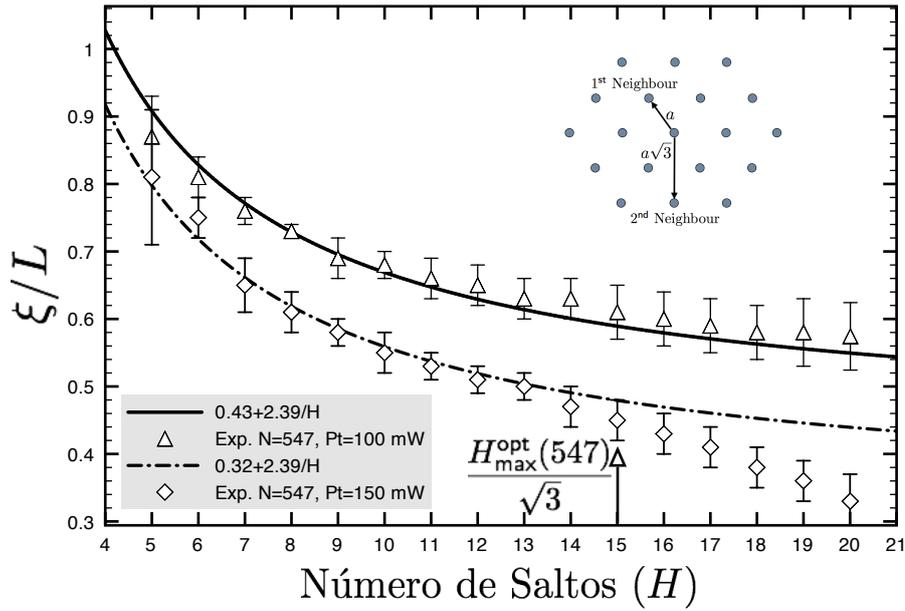


Figura 3.18 : Representación de los valores experimentales de ξ/L y su rango de variación (barra vertical) frente al número de saltos para 547_{1v}^{cc} y 547_{2v}^{cc} . Las curvas continuas respectivas corresponden a la función $f(N) = a + b/N$, donde a y b son constantes calculadas mediante un proceso de ajuste no lineal.

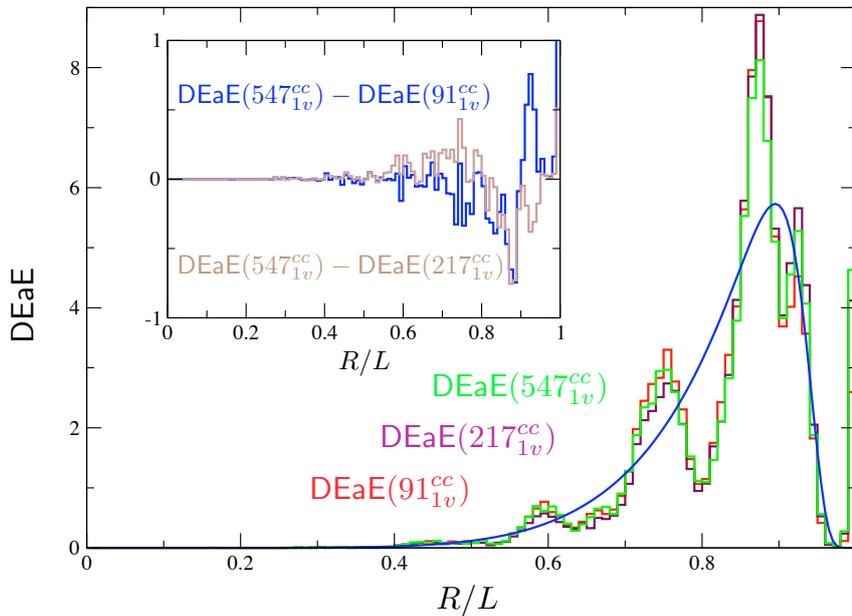


Figura 3.19 : *Figura mayor*: histogramas experimentales de los escenarios 91_{1v}^{cc} (rojo), 217_{1v}^{cc} (granate) y 547_{1v}^{cc} (verde) y la curva teórica (azul) de la distribución extremo a extremo de las rutas con 6 saltos. *Figura menor*: diferencias entre 547_{1v}^{cc} y 91_{1v}^{cc} (azul) y 547_{1v}^{cc} y 217_{1v}^{cc} (marrón).

- *Mayor eficiencia de encaminamiento en saltos cortos.* La observación directa de los escenarios con caché, 547_{1v}^{cc} y 547_{2v}^{cc} , es que la variable relativa a la cobertura radio ofrece mejores prestaciones a primeros que a segundos vecinos, del mismo modo que se

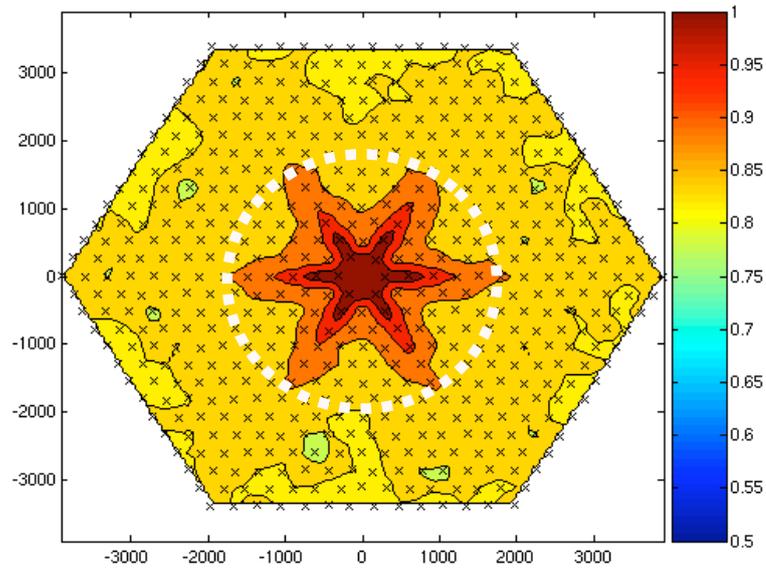


Figura 3.20 : Distribución espacial de R/L para el escenario 547_{1v}^{cc} . La circunferencia discontinua blanca indica el *radio medio de persistencia* para una ruta de 13,2 saltos ($\xi_{1/2}^{cc,1v} = 5,67$ saltos).

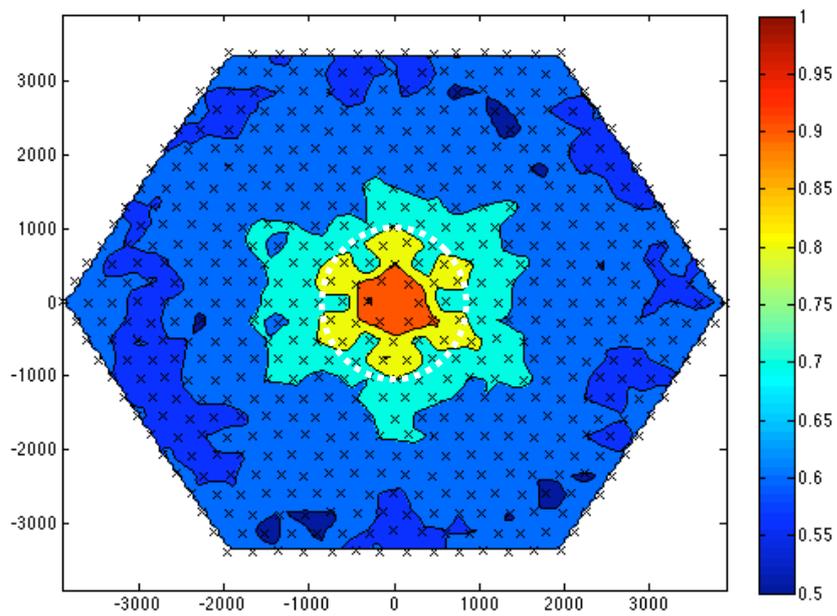


Figura 3.21 : Distribución espacial de R/L para el escenario 547_{2v}^{cc} . La circunferencia discontinua blanca indica el *radio medio de persistencia* para una ruta de 7,6 saltos ($\xi_{1/2}^{cc,2v} = 3,36$ saltos).

constata bajo la aproximación TFaTD.

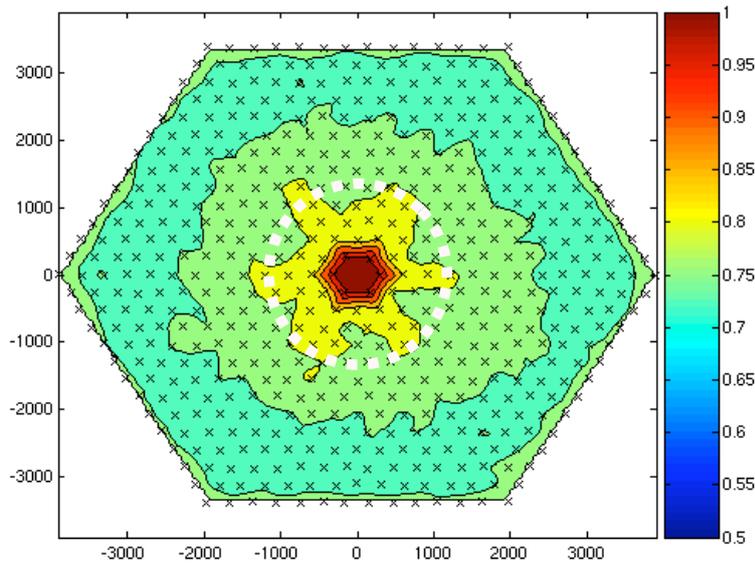


Figura 3.22 : Distribución espacial de R/L para el escenario 547_{1v}^{sc} . La circunferencia discontinua blanca indica el radio medio de persistencia para una ruta de 13,2 saltos ($\xi_{1/2}^{sc,1v} = 3,66$ saltos).

- *Mejora de la eficiencia de encaminamiento mediante el uso de técnicas de caché.* La comparación de los resultados para los escenarios 547_{1v}^{sc} y 547_{1v}^{cc} denota una pérdida de eficiencia del primero frente al segundo. Por consiguiente, se aporta una nueva demostración de la mejora de las prestaciones del encaminamiento que supone el uso de técnicas de caché, no sólo en términos de la reducción del tráfico de control generado durante la fase de descubrimiento de ruta sino también en cuanto a la eficiencia de encaminamiento resultante.
- *Eficiencia de encaminamiento inducida por la topología.* En todas las figuras puede observarse claramente la eficiencia de encaminamiento inducida directamente por la red, en la estrella de seis puntas central. Se ha de señalar a este respecto que, efectivamente, el radio de persistencia engloba el conjunto de variables que inciden en la forma más esencial del encaminamiento -topología y protocolo-.

Radio medio de persistencia

En el Apartado 2.6 se indica que la correlación entre distintos vectores tangentes a la dirección de la ruta en cada salto de un nodo a otro muestra un decrecimiento exponencial con la distancia que los separa según la Ecuación 2.36. A partir del cálculo de este decrecimiento, el radio de persistencia se obtiene según la Ecuación 2.37. Por tanto, una nueva métrica

cuantitativa para evaluar la eficiencia de encaminamiento podría definirse como la distancia en número de saltos en la que la eficiencia de encaminamiento cae de 1 a 1/2. Esta métrica es denominada *radio medio de persistencia*:

$$\xi_{1/2} = \xi \cdot \ln 2 . \quad (3.10)$$

Como puede observarse, el radio medio de persistencia obedece a la misma tendencia de decaimiento que la mostrada en las Figuras 3.17 y 3.18 sin más que incluir un factor $\ln 2$ en las curvas representadas. Sin embargo, esta magnitud añade una información significativa a la evaluación de las prestaciones del encaminamiento ya que denota el número de saltos a partir del cual comienza a perder drásticamente su eficiencia. En función de la curva que trace el radio de persistencia normalizado, ξ/L , respecto del número de saltos de las rutas establecidas, este punto común de pérdida notoria de la eficiencia se manifestará a partir de una mayor o menor distancia desde la fuente.

Dado que, tal y como se ha mostrado, el radio medio de persistencia depende del número de saltos del camino o la longitud del mismo, no es posible la observación del conjunto de valores que toma para cada una de las rutas contempladas en las Figuras 3.20, 3.21 y 3.22. No obstante, puede considerarse que la mayor aportación a las mismas proviene de los caminos con el número medio de saltos de cada escenario:

$$\begin{aligned} \hat{H}(547_{1v}^{cc}) &= \sqrt{\frac{547}{\pi}} = 13,2 \text{ saltos} \\ \hat{H}(547_{2v}^{cc}) &= \frac{\sqrt{547/\pi}}{\sqrt{3}} = 7,6 \text{ saltos} \\ \hat{H}(547_{1v}^{sc}) &= \sqrt{\frac{547}{\pi}} = 13,2 \text{ saltos.} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Tomando este número medio de saltos calculado y su correspondiente valor de ξ/L , e introduciéndolos en la Ecuación 3.10, se obtienen los siguientes radios medio de persistencia para cada uno de los escenarios:

$$\begin{aligned} \xi_{1/2}(547_{1v}^{cc}) &= (\xi/L)_{1v}^{cc} \cdot \ln 2 \cdot \hat{H}(547_{1v}^{cc}) = 0,62 \cdot \ln 2 \cdot 13,2 = 5,67 \text{ saltos} \\ \xi_{1/2}(547_{2v}^{cc}) &= (\xi/L)_{2v}^{cc} \cdot \ln 2 \cdot \hat{H}(547_{2v}^{cc}) = 0,638 \cdot \ln 2 \cdot 7,6 = 3,36 \text{ saltos} \\ \xi_{1/2}(547_{1v}^{sc}) &= (\xi/L)_{1v}^{sc} \cdot \ln 2 \cdot \hat{H}(547_{1v}^{sc}) = 0,4 \cdot \ln 2 \cdot 13,2 = 3,66 \text{ saltos.} \end{aligned} \quad (3.12)$$

A partir de la Ecuación 3.12, se comprueba cómo los valores calculados se ajustan a los anillos punteados que aparecen sobre los respectivos mapas de contorno en las Figuras 3.20, 3.21 y 3.22. Estas circunferencias delimitan la distancia a partir de la cual se pierde la eficiencia de encaminamiento inducida por la estructura de la red. Fuera de los límites marcados por el

radio medio de persistencia, el encaminamiento sufre una disminución drástica de su eficiencia. De este modo, se comprueba la validez de esta métrica para establecer de forma cuantitativa el rango máximo de operación eficiente del encaminamiento.

3.2.4 Observaciones generales de los resultados

Este apartado se centra en resaltar algunas conclusiones derivadas de los resultados anteriormente presentados, para completar el análisis de los experimentos.

- *Número de saltos de los caminos.* Las rutas se comportan de manera más ineficiente a medida que se incrementa su número de saltos tal y como puede observarse de las Figuras 3.17 y 3.18. La explicación de este hecho es que es más probable encontrar rutas largas debidas a una falta de directividad que a la distancia entre fuente y destino. Por este motivo, los experimentos desarrollados para evaluar las prestaciones del encaminamiento deben ser cuidadosamente diseñados en términos de parámetros como tamaño de la red o rango de cobertura de los nodos, dado que estas variables de diseño tienen una influencia directa en el número medio de saltos en una red y, por consiguiente, en la observación de las prestaciones relativas a la eficiencia de encaminamiento.
- *Tamaño de la red.* El tamaño de la red implica un número medio de saltos específico en función del cual aparece cierta ineficiencia del encaminamiento. En este sentido, tanto en las Figuras 3.5, 3.7 y 3.9 como en la 3.17 se muestra el decremento de la eficiencia con el número de nodos. Este decaimiento no está relacionado en esencia con el protocolo de encaminamiento sino con las restricciones impuestas por la red. Así, para obtener una evaluación óptima de las prestaciones de un protocolo de encaminamiento de forma aislada o conjunta, los experimentos deben incluir redes de cierto tamaño que no condicionen los resultados deseados. Desde un punto de vista distinto, pero basado en la misma consideración, debe señalarse que el análisis de la escalabilidad debe tener en cuenta este tipo de restricciones de la red para calcular el número de nodos en ella hasta el que un determinado protocolo de encaminamiento se mantiene en un rango aceptable de eficiencia.
- *Topología de la red.* La estructura de la red también puede inducir directividad y, por consiguiente, eficiencia de encaminamiento, debido a la disposición de sus nodos. Las Figuras 3.20, 3.21 y 3.22 muestran este hecho al presentar áreas con una mayor eficiencia -las formas centrales de estrella de seis puntas- que son producidas por el despliegue triangular de los nodos. Más allá de ellas, la eficiencia sigue un patrón homogéneo. Una vez más, el modelo teórico propuesto revela la necesidad de consideraciones especiales que deben tenerse en cuenta en el diseño de experimentos y la interpretación

de resultados para evitar alcanzar conclusiones erróneas acerca de las prestaciones del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas.

- *Uso de técnicas de caché.* Se comprueba que la reutilización de rutas ofrece ventajas no sólo en función de la reducción de la sobrecarga producida por la fase de descubrimiento de rutas sino también por la mejora de la eficiencia del encaminamiento. La razón de este hecho puede encontrarse en que el uso de rutas previamente establecidas -o parte de ellas- implica una extensión del conocimiento local a zonas alejadas del área de influencia de cada nodo, representado por el radio efectivo. De esta forma, el conocimiento local y preciso de los nodos se distribuye de alguna forma por la red, aumentándose por tanto en cierta medida el radio efectivo y, consiguientemente, la eficiencia del encaminamiento.
- *Rango de cobertura.* En las Figuras 3.20 y 3.21 es reseñable la pérdida de eficiencia de encaminamiento debida al uso de un rango de cobertura extendido a segundos vecinos. De este modo, se hace más conveniente la realización de saltos cortos frente a largos, con base en esta métrica. Tal y como se describe, esta observación se remite al escenario particular simulado ya que no existe una conexión directa con ninguna característica específica del modelo teórico propuesto que lo justifique para el global de las situaciones posibles. No obstante, debe señalarse que la eficiencia de encaminamiento en el modelo propuesto es un cociente entre longitudes y no entre número de saltos. Por este motivo, provee una medida global que puede ser utilizada para la comparación entre distintas aproximaciones como se manifiesta directamente en los mapas de contorno presentados.
- *Dimensión.* Aunque los nodos están desplegados de acuerdo a una disposición en un plano, los gráficos obtenidos de las distribuciones de R/L describen un comportamiento perteneciente a $3D$, lo que puede estar relacionado con el paso de un espacio continuo teórico a un espacio discreto experimental, factor que es objeto de investigación en la actualidad.
- *Medidas cuantitativas de la eficiencia de encaminamiento.* Los resultados presentados permiten la extracción de conclusiones cuantitativas, lo que supone una novedad en la investigación en este campo. Así, la eficiencia de encaminamiento de un caso a estudio concreto es caracterizada mediante un valor específico del radio de persistencia, ξ . Por su parte, la distancia a partir de la cual el encaminamiento pierde sus propiedades de eficiencia se denota mediante el radio medio de persistencia, $\xi_{1/2}$.

3.3 Discusión de otros trabajos

Desde la base del modelo teórico, el diseño de experimentos y los resultados obtenidos en esta tesis, pueden analizarse otras investigaciones empíricas relacionadas con el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas.

La premisa general que debe ser observada en el diseño de experimentos que tienen como objetivo la evaluación de las prestaciones del encaminamiento es la producción de un número significativo de muestras, de tal forma que se consiga una relevancia estadística. Cada una de esas muestras debe representar una ruta entre una pareja F-D distinta. Por este motivo, una gran cantidad de paquetes enviados desde la misma fuente al mismo destino no genera unos resultados óptimos dado que no se origina un amplio rango de caminos establecidos.

El encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas es un proceso complejo que aglutina una gran diversidad de factores que impactan en las prestaciones finales relativas a la eficiencia de formas difícilmente separables. Por ello, siguiendo las bases de la metodología de diseño de experimentos descrita, la investigación debe partir de un diseño de exploración que se centre en el aspecto específico a estudio y el conjunto mínimo de variables de diseño que esté intrínsecamente ligado a él. En el caso particular que nos ocupa, este conjunto mínimo está compuesto por el protocolo de encaminamiento y la topología de la red. A partir del conocimiento generado por el diseño de exploración, se puede pasar al diseño factorial en el que nuevas variables de diseño como movilidad, interferencia, potencia de transmisión o rango de cobertura, pueden ser añadidas para evaluar sus contribuciones conjuntas a la eficiencia de encaminamiento. Por este motivo, los trabajos que incluyen en sus experimentos iniciales variables de diseño como patrones de movilidad dependientes de distintos tiempos de espera, interferencias por transmisiones simultáneas de varias fuentes, etc. producen resultados en los que no es posible diferenciar la contribución de estas variables y la intrínseca al encaminamiento en sí.

En relación con la influencia de la red en el encaminamiento, la selección de la variable de diseño relativa al tamaño de la misma es esencial para la extracción de resultados relevantes para la característica a estudio. Redes demasiado pequeñas implican un número medio de saltos bajo que no permite la observación de los límites de eficiencia dado que se confunden con las restricciones impuestas por la propia red. Así, por ejemplo, el número medio de saltos en una red de 50 nodos es $\sqrt{50/\pi} \approx 4$, zona en la que se espera una alta eficiencia de encaminamiento del DSR tal y como muestran los resultados presentados en el Apartado 3.2. La comparación de diferentes protocolos en redes de este tamaño produce resultados muy similares, perdiendo por tanto los detalles buscados. Las redes extensas establecen caminos de un elevado número de saltos, que son producidos por la ineficiencia en lugar de por los límites topológicos de la red, permitiendo por tanto acceder a dichos detalles.

En esta tesis se propone la eficiencia de encaminamiento como medida de las prestaciones de estrategias de encaminamiento. Dicha métrica es caracterizada por el radio de persistencia, ξ , y su determinación se lleva a cabo mediante la distribución estadística del cociente R/L , que relaciona la distancia entre fuente y destino con la longitud del camino establecido entre ellos. Este cociente, R/L , está en línea con otras métricas como *competitive ratio*, *path optimality* o *path stretch* comentadas en el Apartado 1.5. No obstante, difiere de las dos primeras en el uso de longitudes en lugar de número de saltos. En consecuencia, R/L -al igual que *path stretch*- es una métrica común, objetiva y generalizable mientras que *path optimality* o *competitive ratio* producen observaciones que pueden no ser directamente comparables. Además, el establecimiento de una relación entre los caminos real y óptimo implica la determinación de este último. En los experimentos, esta determinación del número de saltos óptimo requiere que el simulador genere una estimación del mismo durante la propia ejecución de la simulación. En consecuencia, la métrica se fundamenta en un parámetro estimado en lugar de uno objetivo, la distancia euclídea entre fuente y destino, R , calculado a posteriori. Finalmente, la eficiencia de encaminamiento permite la observación conjunta de escenarios con distintos rangos de cobertura para el estudio, por ejemplo, de la conveniencia del uso de saltos cortos o largos en las transmisiones.

3.4 Conclusión

La innovación principal de este capítulo es proveer una confirmación empírica del modelo teórico propuesto en el Capítulo 2. Así, se cumple el Objetivo 2 referente a la Hipótesis de Partida 2 de la presente tesis. Hasta donde alcanza nuestro conocimiento, ésta es la primera vez en el campo del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas que se realiza un trabajo que aúna ambas perspectivas: teórica y experimental.

Esta validación experimental se realiza de forma absoluta, es decir, se recuperan directamente los resultados teóricos presentados, y por tanto no se reduce a una mera comparación de distintos protocolos de encaminamiento en función de una serie de parámetros.

En este sentido, se aporta un procedimiento innovador que sistematiza el ajuste de los datos obtenidos de forma empírica a las curvas teóricas producidas por el modelo propuesto.

Los experimentos llevados a cabo siguen una metodología de diseño que garantiza la relevancia de los resultados. De esta forma, se crea una norma para la generación de simulaciones en este campo, alcanzando el Objetivo 3, y se solventan los problemas detectados en experiencias anteriores, que dan lugar a la Hipótesis de Partida 3. Así, bajo el marco teórico y experimental propuesto, pueden implementarse rigurosas evaluaciones de las prestaciones del encaminamiento en cualquier escenario.

A través de dicho marco, no sólo es posible alcanzar resultados cualitativos sino también

cuantitativos. Estos resultados son precisos y medibles y por tanto permiten la extracción de conclusiones relevantes sobre las prestaciones del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas en términos de eficiencia.

Conclusiones y líneas de trabajo futuras

4.1 Aportaciones

Sobre la base de las necesidades genéricas, las Hipótesis de Partida y los Objetivos descritos en el Capítulo 1 y los trabajos ya desarrollados en este ámbito allí presentados, esta tesis establece un marco teórico y empírico para el análisis del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas como principal contribución. El modelo teórico propuesto caracteriza dicho encaminamiento a partir de su eficiencia de encaminamiento, es decir, su capacidad para dirigir paquetes de fuente a destino a través del camino más cercano a la línea recta que los une. Este atributo es representado por el llamado radio de persistencia, ξ , que contiene dos variables relativas a la directividad, κ , y la movilidad de los nodos, β . De esta forma, engloba todos los aspectos de la red que influyen en el encaminamiento -no sólo el protocolo específico, sino también el conjunto de factores pertenecientes a distintas capas que se ven involucrados en el mismo-.

La determinación de la eficiencia de encaminamiento se lleva a cabo mediante la distribución estadística de la medida del cociente entre la longitud total del camino establecido entre fuente y destino y la distancia euclídea que los separa, R/L , bajo las condiciones del caso a estudio. La obtención de este cociente es directa y objetiva -no se requiere estimación alguna- y responde de forma separable a las influencias de las distintas variables involucradas en el encaminamiento.

A partir de este modelo teórico es posible la interpretación de distintas aproximaciones al estudio de las Redes Ad Hoc Inalámbricas y en particular de su encaminamiento, llevadas a cabo desde enfoques de investigación como Teoría de la Información, de la Comunicación, de Grafos o del Control. Este hecho indica la validez y generalidad del modelo teórico descrito, aportando completitud al estado del arte de dicho análisis y la integración de distintas perspectivas en un único modelo que las aúna.

Como prueba de la corrección de los resultados teóricos hallados, se lleva a cabo una serie de experimentos destinados a recuperar aquéllos. Para asegurar la legitimidad y generalidad de los mismos su diseño obedece a una metodología específica y contrastada que se propone como base para la realización de experimentos en el ámbito de las Redes Ad Hoc Inalámbricas.

Siguiendo este procedimiento se simulan de forma sistemática distintos escenarios que generan idénticos resultados a los identificados de forma teórica y, por consiguiente, queda demostrada la validez del modelo propuesto. El desarrollo de un modelo teórico junto con su confirmación empírica establece una contribución novedosa al estudio del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas, donde, hasta donde alcanza nuestro conocimiento, tan sólo existen experiencias teóricas o empíricas de forma aislada en este sentido.

Más allá de la producción de conclusiones cualitativas, los resultados presentados aportan una medida cuantitativa, el radio de persistencia, que representa la eficiencia de encaminamiento de cualquier escenario a estudio. A través de la misma, se ofrece por tanto un dato numérico mediante el cual clasificar el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas y, desde su conocimiento, deducir su comportamiento en determinadas situaciones.

Por último, a partir de los datos experimentales obtenidos no sólo se obtiene la validación del modelo teórico. Al mismo tiempo, se extraen conclusiones particulares sobre diferentes aspectos específicos involucrados en el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas tales como la dependencia de la eficiencia con el número de saltos de los caminos, el tamaño de la red, el rango de cobertura de los nodos, la disposición física de los mismos o el uso de técnicas de caché durante la fase de descubrimiento de ruta.

4.2 Líneas futuras

La presente tesis establece un marco teórico y empírico sobre el que realizar un estudio completo acerca del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas. Supone por consiguiente la constitución de una base fundamental para análisis ulteriores y, como tal, abre un gran abanico de posibilidades para la futura investigación.

En primer lugar, tal y como se indica durante el desarrollo de los capítulos precedentes, existe en la actualidad una serie de investigaciones en curso:

- Análisis de la relación de la dimensionalidad en espacios continuos y discretos y su influencia en el ajuste de los resultados experimentales a los teóricos.
- Estudio de la influencia de distintas técnicas de caché en diferentes protocolos.
- Establecimiento de una correspondencia entre el cambio de pendiente de la eficiencia de encaminamiento para valores superiores al doble del valor medio del número de saltos en la red con el tamaño finito de la misma y/o el establecimiento de caminos sin bucles.

Por otra parte, a partir de la metodología propuesta para el diseño de los experimentos aquí mostrados, puede proponerse cierta estructura para organizar las próximas líneas de desarrollo. De esta forma, los primeros esfuerzos se dedicarán a la ampliación del conjunto de

variables de entrada en la continuación del diseño factorial ya comenzado en esta tesis. Así, se incluirá una serie de factores cuyas consecuencias serán analizadas con base en el modelo teórico propuesto:

- Movilidad: comprobación empírica de la disminución de la eficiencia en presencia de movilidad de los nodos, tal y como se deduce del modelo teórico. Evaluación de distintos modelos de movilidad propuestos.
- Acceso concurrente al medio: verificación experimental de la predicción teórica del decaimiento de la efectividad del encaminamiento con el acceso concurrente al medio de diferentes pares de nodos.
- Conectividad: evaluación, tanto teórica como experimental, de la influencia de la conectividad de la red en la eficiencia de encaminamiento. Se propone utilizar conjuntamente el marco teórico aquí desarrollado y la Teoría de la Percolación [Jiang y Bruck, 2005].
- Retardo: estudio del retardo introducido en Redes Ad Hoc Inalámbricas y su variación.

Una vez llevados a cabo los distintos experimentos reseñados que producen conclusiones relativas al impacto de las diferentes variables de entrada consideradas, se pasará a realizar estudios comparativos de las prestaciones de algoritmos y protocolos de encaminamiento:

- Caracterización de las propiedades de protocolos de uso extendido tales como el AODV y sus variantes, DSDV, TORA y DSR -ya incluido en los experimentos presentados-.
- Demostración teórica y práctica del carácter óptimo en términos de eficiencia de los protocolos jerárquicos.
- Aplicación del marco teórico al entorno de la Codificación de Red [Ahlsvede et al., 2000] en el caso de encaminamiento multicamino (*multicast*).

Por último, se utilizará el modelo para la particularización a Redes de Sensores Inalámbricas de tal forma que se sometan a estudio las características peculiares de este tipo de Redes Ad Hoc. Al mismo tiempo, cabe destacar la realización de experimentos con dispositivos físicos de tal forma que se evalúen otras variables procedentes de despliegues reales, no consideradas en la implementación de la operación de Redes Ad Hoc Inalámbricas presente en los entornos de simulación. Estos experimentos se llevarán a cabo a través del desarrollo y puesta en marcha de un laboratorio de Redes de Sensores Inalámbricas bajo dos aproximaciones sucesivas:

- Media escala -> 100 nodos-.
- Gran escala -> 500 nodos-.

Bibliografía

- [Abraham y Malkhi, 2004] Abraham, I. y Malkhi, D. (2004). Compact routing on euclidean metrics. In *Proceedings of the 23rd annual ACM Symposium on Principles Of Distributed Computing*, Newfoundland, Canadá.
- [Ahlsvede et al., 2000] Ahlsvede, R., Cai, N., Li, S.-Y. R., y Yeung, R. W. (2000). Network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(4):1204–1216.
- [Anderson, 2001] Anderson, J. A. (2001). *Discrete Mathematics with Combinatorics*. Pearson Prentice Hall, 2ª edición.
- [Basagni et al., 2004a] Basagni, S., Conti, M., Giordano, S., y Stojmenovic, I. (2004a). *Mobile Ad Hoc Networking*, chapter 10, pages 275–300. Wiley-IEEE Press.
- [Basagni et al., 2004b] Basagni, S., Conti, M., Giordano, S., y Stojmenovic, I. (2004b). *Mobile Ad Hoc Networking*, chapter 16, pages 427–445. Wiley-IEEE Press, 2ª edición.
- [Bertsekas y Gallager, 1992] Bertsekas, D. y Gallager, R. (1992). *Data Networks*. Prentice-Hall, Inc., segunda edición.
- [Borodin y El-Yaniv, 1998] Borodin, A. y El-Yaniv, R. (1998). *Online Computation and Competitive Analysis*. Cambridge University Press, 1ª edición.
- [Broch et al., 1998] Broch, J., Maltz, D. B., Johnson, D. B., Hu, Y., y Jetcheva, J. (1998). A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In *Proceedings of the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, Dallas, EE.UU.
- [Cheng et al., 2006] Cheng, B., Yuksel, M., y Kalyanaraman, S. (2006). Orthogonal rendezvous routing protocol for wireless mesh networks. In *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Network Protocols*, Santa Barbara, EE.UU.
- [Clausen et al., 2002] Clausen, T., Jacquet, P., y Viennot, L. (2002). Optimizing route length in reactive protocols for ad hoc networks. In *Proceedings of the First Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop*, pages 496–507.

- [Cochran y Cox, 1992] Cochran, W. G. y Cox, G. M. (1992). *Experimental Designs*. John Wiley and Sons Inc., 2ª edición.
- [Corson y Macker, 1999] Corson, S. y Macker, J. (1999). Mobile ad hoc networking (manet): Routing protocol performance issues and evaluation considerations. Rfc 2501 memo del ietf network working group.
- [Cover y Thomas, 2006a] Cover, T. M. y Thomas, J. A. (2006a). *Elements of Information Theory*, chapter Network Information Theory. Wiley Interscience.
- [Cover y Thomas, 2006b] Cover, T. M. y Thomas, J. A. (2006b). *Elements of Information Theory*. Wiley Interscience.
- [De, 2005] De, S. (2005). On hop count and euclidean distance in greedy forwarding in wireless ad hoc networks. *IEEE Communications Letters*, 9(11):1000–1002.
- [Eriksson et al., 2007] Eriksson, J., Faloutsos, M., y Krishnamurthy, S. V. (2007). Dart: Dynamic address routing for scalable ad hoc and mesh networks. *IEEE Transactions on Networking*, 15(1):119–132.
- [Fall y Varadhan, 2005] Fall, K. y Varadhan, K. (2005). Ns notes and documentation. The vint project, UC Berkeley.
- [Feeney, 1999] Feeney, L. M. (1999). A taxonomy for routing protocols in mobile ad hoc networks. Sics technical report t99/07.
- [Feynman y Hibbs, 1965] Feynman, R. P. y Hibbs, A. R. (1965). *Quantum Physics and Path Integrals*. McGraw-Hill.
- [Fisher, 1970] Fisher, R. A. S. (1970). *Statistical Methods for Research Workers*. Hafner Press, 14ª edición.
- [Fisher, 1971] Fisher, R. A. S. (1971). *The Design of Experiments*. Macmillan Pub Co; 9ª edición.
- [Gupta y Kumar, 2000] Gupta, P. y Kumar, P. R. (2000). The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(2):388–404.
- [Gupta y Kumar, 2001] Gupta, P. y Kumar, P. R. (2001). Internets in the sky: The capacity of three dimensional wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1(1):39–50.
- [Haenggi, 2005a] Haenggi, M. (2005a). On distances in uniformly random networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 51(10):3584–3586.

- [Haenggi, 2005b] Haenggi, M. (2005b). On routing in random rayleigh fading networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 4(4):1553–1562.
- [Haenggi y Puccinelli, 2005] Haenggi, M. y Puccinelli, D. (2005). Routing in ad hoc networks: A case for long hops. *IEEE Communications Magazine*, 43(10):93–101.
- [Hardy, 1992] Hardy, G. H. (1992). *A Mathematician's Apology*. Cambridge University Press, Reimpresión.
- [Hassin y Peleg, 2000] Hassin, Y. y Peleg, D. (2000). Sparse communication networks and efficient routing in the plane. In *Proceedings of the 19th annual ACM Symposium on Principles Of Distributed Computing*, pages 41–50, Portland, EE. UU.
- [Hu, 1993] Hu, L. (1993). Topology control for multihop packet radio networks. *IEEE Transactions on Communications*, 41(10):1474–1481.
- [Hu y Johnson, 2000] Hu, Y. y Johnson, D. B. (2000). Caching strategies in on-demand routing protocols for wireless ad hoc networks. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, EE.UU.
- [Hu y Johnson, 2001] Hu, Y. y Johnson, D. B. (2001). Implicit source routes for on-demand ad hoc network routing. In *Proceedings of the ACM 2nd Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, Long Beach, EE.UU.
- [Huang, 1987] Huang, K. (1987). *Statistical Mechanics*. John Wiley and Sons.
- [Jiang y Bruck, 2005] Jiang, A. y Bruck, J. (2005). Monotone percolation and the topology control of wireless networks. In *Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005)*, volume 1, pages 327–338.
- [Johnson, 1999] Johnson, D. (1999). Validation of wireless and mobile network models and simulation. In *Proceedings of the DARPA/NIST Network Simulation Validation Workshop*, Fairfax, EE.UU.
- [Johnson et al., 2004] Johnson, D. B., Maltz, D., y Hu, Y. (2004). The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (dsrc). Rfc 2026 memo del ietf manet working group.
- [Johnson y Maltz, 1996] Johnson, D. B. y Maltz, D. A. (1996). *Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks*.
- [Kleinert, 2004] Kleinert, H. (2004). *Path Integrals in Quantum Mechanics, Statistic, Polymer Physics and Financial Markets*. World Scientific, 3ª edición.

- [Kleinrock y Silvester, 1978] Kleinrock, L. y Silvester, J. A. (1978). Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number. In *National Telecommunications Conference*, pages 4.3.1–4.3.5, Birmingham, EE.UU.
- [Kleinrock y Silvester, 1987] Kleinrock, L. y Silvester, J. A. (1987). Spatial reuse in multihop packet radio networks. In *Proceedings of the IEEE*, volume 75, pages 156–167.
- [Kuhn et al., 2003a] Kuhn, F., Wattenhofer, R., Zhang, Y., y Zollinger, A. (2003a). Geometric ad-hoc routing: Of theory and practice. In *Proceedings of 22nd ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*, Boston, EE.UU.
- [Kuhn et al., 2003b] Kuhn, F., Wattenhofer, R., y Zollinger, A. (2003b). Worst-case optimal and average-case efficient geometric ad-hoc routing. In *Proceedings of 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, Annapolis, EE.UU.
- [Lang, 2003] Lang, D. (2003). A comprehensive overview about selected ad-hoc networking routing protocols. Technical report. department of computer science, Universidad Técnica de Munich.
- [Leong et al., 2005] Leong, B., Mitra, S., y Liskov, B. (2005). Path vector face routing: Geographic routing with local face information. In *Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Network Protocols*, Boston, EE.UU.
- [Levedeb y Steyaert, 2004] Levedeb, D. y Steyaert, J. M. (2004). Path lengths in ad-hoc networks. In *Proceedings of the 2004 International Workshop on Wireless Ad-Hoc Networks*, pages 207–211.
- [Li et al., 2001] Li, J., Blake, C., De Couto, D., Lee, H., y Morris, R. (2001). Capacity of ad hoc wireless networks. In *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Roma, Italia.
- [Li y Mohapatra, 2003] Li, J. y Mohapatra, P. (2003). A novel mechanism for flooding based route discovery in ad hoc networks. In *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 692–696, San Francisco, EE.UU.
- [Liu y Kaiser, 2003] Liu, C. y Kaiser, J. (2003). A survey of mobile ad hoc network routing protocols. Technical report tr-4. nr. 2003-08, Universidad de Ulm.
- [Miller, 2001] Miller, L. E. (2001). Distribution of link distances in a wireless network. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 106(2):401–412.

- [Mullen, 2003] Mullen, J. P. (2003). Robust approximations to the distribution of link distances in a wireless network occupying a rectangular region. *ACM Mobile Computing and Communications Review*, 7(2):80–91.
- [Osipov y Tschudin, 2004] Osipov, E. y Tschudin, C. (2004). Improving the path optimality of reactive ad hoc routing protocols through de-coherent rreq waves. Technical report cs-2004-002, Universidad de Basel.
- [Ramanathan y Steenstrup, 1996] Ramanathan, S. y Steenstrup, M. (1996). A survey of routing techniques for mobile communications networks. *Mobile Networks and Applications*, 1(2):89–104.
- [Ravelomanana, 2004] Ravelomanana, V. (2004). Extremal properties of three-dimensional sensor networks with applications. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3(3):246–257.
- [Reddy y Reddy, 2006] Reddy, P. C. y Reddy, P. C. (2006). Performance analysis of ad hoc network routing protocols. *Academic Open Internet Journal*, 17.
- [Rose, 1992] Rose, C. (1992). Mean internodal distance in regular and random multihop networks. *IEEE Transactions on Communications*, 40(8):1310–1318.
- [Royer y Toh, 1999] Royer, E. M. y Toh, C. K. (1999). A review of current routing protocols for ad-hoc mobile wireless networks. *IEEE Personal Communications*, 6(2):46–55.
- [Servetto y Barrenechea, 2002] Servetto, S. D. y Barrenechea, G. (2002). Constrained random walks on random graphs: Routing algorithms for large scale wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA)*.
- [Society, 1997] Society, I. C. (1997). IEEE std 802.11-1997 information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements-part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. Technical report.
- [Sousa y Silvester, 1990] Sousa, E. S. y Silvester, J. A. (1990). Optimum transmission ranges in a direct-sequence spread-spectrum multihop packet radio network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 8(5):762–771.
- [Takagi y Kleinrock, 1984] Takagi, H. y Kleinrock, L. (1984). Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals. *IEEE Transactions on Communications*, COM-32(3):246–257.

- [Talooki y Ziarati, 2006] Talooki, V.Ñ. y Ziarati, K. (2006). Performance comparison of routing protocols for mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the IEEE Asia-Pacific Conference on Communications*, pages 1–5, Busan, Corea.
- [Tonguz y Ferrari, 2006] Tonguz, O. K. y Ferrari, G. (2006). *Ad Hoc Wireless Networks: A Communication-Theoretic Perspective*. John Wiley and Sons, Ltd., 1ª edición.
- [Wan y Yi, 2004] Wan, P. y Yi, C. (2004). Asymptotic critical transmission radius and critical neighbor number for k-connectivity in wireless ad hoc networks. In *Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pages 1–8, Tokio, Japón.
- [Wang y Silvester, 1993] Wang, J. L. y Silvester, J. A. (1993). Maximum number of independent paths and radio connectivity. *IEEE Transactions on Communications*, 41(10):1482–1493.
- [Wang y Zhang, 2005] Wang, Z. y Zhang, J. (2005). Grid based two transmission range strategy for manets. In *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Computer Communications and Networks*, pages 235–240, San Diego, EE.UU.
- [Xue y Kumar, 2004] Xue, F. y Kumar, P. R. (2004). The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks. *Wireless Networks*, 10(2):169–181.
- [Zorzi y Pupolin, 1995] Zorzi, M. y Pupolin, S. (1995). Optimum transmission ranges in multi-hop packet radio networks in the presence of fading. *IEEE Transactions on Communications*, 41(7):2201–2205.