



Máster en Redes y Servicios de Comunicación Móviles

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación

## **PROYECTO FIN DE MÁSTER**

*Estudio de la eficiencia de encaminamiento en redes ad hoc*

*móviles con el protocolo AODV*

Autor: Hugo López Nombela

Tutor: Inmaculada Mora Jiménez

Co-tutor: Lorena Fernández Martínez

*Curso académico 2008/2009*







## Resumen

En los últimos años, el auge de las tecnologías inalámbricas ha provocado una auténtica revolución en las telecomunicaciones. Esto, unido a la explotación de la movilidad que ofrecen los dispositivos portátiles y que requieren los usuarios de hoy día, ha permitido que se presente un nuevo escenario de operación, el enmarcado dentro de lo que se conoce como redes ad hoc móviles. La necesidad de movilidad hace que en muchos casos no se disponga de conectividad directa con el destinatario de la información, por lo que, para conseguir buenas prestaciones, es importante que el protocolo de encaminamiento utilizado sea eficiente.

El presente proyecto estudia, desde un punto de vista experimental (en base a simulación), cómo afecta la movilidad de los nodos a la eficiencia de encaminamiento, entendida ésta como la capacidad para establecer el camino más corto entre un nodo origen y un nodo destino. Como protocolo de encaminamiento consideraremos el protocolo AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*), por tratarse de uno de los protocolos de encaminamiento en redes ad hoc inalámbricas más utilizados.



# Índice

|  |    |
|--|----|
| Capítulo 1. Introducción .....   | 1  |
| 1.1. Redes ad hoc inalámbricas.....  | 1  |
| 1.2. Encaminamiento en redes ad hoc inalámbricas .....                           | 5  |
| 1.2.1. Perspectiva global del encaminamiento .....                               | 8  |
| 1.2.2. Principales algoritmos de encaminamiento .....                            | 9  |
| 1.2.3. Protocolo de encaminamiento AODV .....                                    | 13 |
| 1.3. Eficiencia de encaminamiento .....  | 19 |
| <br>   |    |
| Capítulo 2. Movilidad en redes ad hoc .....                                      | 21 |
| 2.1. Modelos de movilidad .....  | 21 |
| 2.2. Modelo de movilidad <i>Random Waypoint</i> .....                            | 23 |
| 2.3. Estabilización de las posiciones de los nodos en el modelo RWP .....        | 25 |
| <br>   |    |
| Capítulo 3. Objetivos .....  | 27 |
| <br>   |    |
| Capítulo 4. Etapas del Proyecto Fin de Máster. Planificación y Metodología ..... | 29 |
| 4.1. Etapas del proyecto y planificación .....                                   | 29 |
| 4.2. Metodología .....   | 34 |
| <br>   |    |
| Capítulo 5. Resultados .....   | 51 |
| 5.1. Distancia entre fuente y destino .....                                      | 52 |
| 5.2. Número de nodos vecinos .....   | 57 |
| 5.3. Distancia a primeros y últimos vecinos .....                                | 59 |
| 5.4. Número de saltos .....  | 63 |
| 5.5. Eficiencia de encaminamiento .....  | 66 |
| <br>   |    |
| Capítulo 6. Conclusiones y líneas de trabajo futuras .....                       | 76 |
| <br>   |    |
| Anexo I. Instalación del NS-2 .....  | 78 |
| Anexo II. Instalación <i>mobgen-ss</i> .....                                     | 79 |
| <br>   |    |
| Referencias .....  | 80 |





# Capítulo 1. Introducción

Este documento describe el trabajo realizado como Proyecto Fin de Máster en el estudio de la eficiencia de encaminamiento en redes ad hoc móviles mediante el uso del protocolo de encaminamiento AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*) a través de la simulación de distintos escenarios.

En primer lugar, se ofrecerá una visión global sobre las redes ad hoc, definiendo los conceptos básicos y analizando el proceso de encaminamiento que tiene lugar en este tipo de redes. Posteriormente, se centrará el análisis en aquellos aspectos que resulten relevantes para redes ad hoc en entornos móviles.

Una vez definidos todos los conceptos que intervendrán en este estudio, se procederá a presentar los objetivos que se pretenden conseguir, y se detallarán las herramientas utilizadas para su consecución.

Para finalizar, se definirá una metodología de trabajo y se procederá a la ejecución de las simulaciones necesarias para el cumplimiento de los objetivos propuestos, con el consiguiente análisis de resultados.

## 1.1 Redes ad hoc inalámbricas

Las redes ad hoc, también conocidas como MANET (*Mobile Ad hoc Network*), son redes inalámbricas que se componen de un conjunto de elementos que denominaremos nodos, y que deben cubrir unas necesidades específicas, como son la comunicación de forma flexible y autónoma, la autoconfiguración y la independencia de una estructura fija [nist]. Estas características suponen importantes retos de diseño que obligan a desarrollar nuevas propuestas capaces de adaptarse dinámicamente ante los cambios continuos de las características de la red, tales como variabilidad en la topología y en el canal, y la ausencia de infraestructura.

Este tipo de redes se ha proyectado para que operen en condiciones diferentes a las redes convencionales, tales como campos de batalla o zonas de desastre natural, donde se requiere que de, forma rápida, se puedan desplegar y establecer procesos de comunicación efectivos entre los diferentes elementos o unidades involucradas.

A continuación, se enumeran las principales características [nist] de una red ad hoc :

- Topología dinámica: en una red ad hoc los nodos se comportan de forma autónoma, permitiendo que estos se muevan libremente en cualquier dirección y en cualquier momento de forma independiente respecto de los demás nodos.
- Variabilidad del canal radio: como resultado de la característica anterior, de la diversidad de potencia que presentan los dispositivos, y de efectos de interferencia entre otros, las redes ad hoc presentan una elevada variabilidad en las condiciones de propagación del canal radioeléctrico.
- Ancho de banda limitado: debido a la naturaleza inalámbrica de la red ad hoc, los enlaces radio presentan una capacidad más reducida que los enlaces de las redes cableadas.
- Uso de comunicaciones multisalto (*Multihop*): las redes ad hoc, al contrario que las redes convencionales, realizan sus comunicaciones (de forma general) basándose en enlaces de múltiples saltos radioeléctricos, cada uno de ellos con diferentes condiciones de propagación y efectuados a través de los diferentes nodos que conforman la red.
- Carencia de infraestructura de red: por definición, las redes ad hoc no requieren que exista una infraestructura de red disponible para poder operar. Pueden tener de forma autónoma su propio conjunto de protocolos de encaminamiento, mecanismos de gestión de red y procesos de establecimiento de la comunicación e intercambio de información.

- Uso de baterías: los elementos de la red, que en adelante denominaremos nodos, están pensados para operar en ambientes inalámbricos y de alta movilidad, y por lo tanto, basarán su fuente de energía en baterías, las cuales tienen una vida útil limitada.

Para que las redes ad hoc puedan desarrollarse, es necesario superar una serie de desafíos técnicos y tecnológicos, entre los que se encuentran:

- Encaminamiento efectivo: uno de los aspectos más interesantes y más desafiantes en las redes ad hoc se refiere a la búsqueda e implementación de un protocolo de encaminamiento que sea lo suficientemente bueno para operar en las condiciones de alta movilidad y bajo ancho de banda que suelen presentar estas redes.
- Acceso al medio: es necesario un mecanismo de acceso al medio o canal que sea adecuado para disminuir el nivel de colisiones que se pueda dar entre las comunicaciones de los diferentes usuarios, que permita un acceso equitativo y justo entre ellos y que contribuya a evitar los problemas de nodo oculto, problema que surge cuando un nodo cree que el canal de transmisión está libre, pero en realidad no lo está. Como consecuencia, se produce la transmisión simultánea de varios nodos.
- Gestión de potencia: dado que los dispositivos que van a ser utilizados en este tipo de redes son móviles y portátiles y basan su funcionamiento en el uso de baterías, es necesario que existan mecanismos (protocolos de acceso, protocolos de encaminamiento, modos de ahorro de energía, etc.) que optimicen el consumo de potencia de operación, haciendo que la vida útil de las redes se extienda el mayor tiempo posible.
- Mecanismos de seguridad: la alta movilidad potencial de estas redes y el uso de canales radioeléctricos compartidos, hacen que las redes ad hoc sean mucho más vulnerables a ataques de seguridad (denegación de servicio, escucha sin

autorización, etc.) que las redes cableadas [Téllez, 2002]. Por lo tanto, es un aspecto importante la creación de redes ad hoc seguras.

- Adaptación a nuevas tecnologías hardware: se busca que los diferentes mecanismos de operación de las redes ad hoc puedan adaptarse fácilmente a la diversidad de dispositivos que aparecen en el mercado y que puedan hacer uso de innovaciones y mejoras que brinden mejores características de operación, como el caso de las antenas inteligentes que existen hoy día.
- Calidad de servicio: actualmente uno de los aspectos más relevantes es la garantía de calidad de servicio [Lujan, 2002] que la red debe ofrecer a los usuarios. El aspecto de calidad de servicio en una red ad hoc es mucho más crítico que en las redes actuales (como, por ejemplo, Internet), pues es mucho más difícil garantizar niveles o límites de retardo entre redes, *jitter* o probabilidad de pérdida de paquetes, entre otros, cuando se opera en un entorno altamente dinámico y cuyos enlaces de comunicación inalámbricos son más vulnerables a diferentes efectos de propagación, niveles elevados de potencia de los nodos vecinos, condiciones del entorno, etc.
- Escalabilidad: se buscan mecanismos que permitan que el número de usuarios de la red se incremente y que la red continúe suministrando el nivel de servicio que se espera sin degradarse ni colapsar la operatividad de la misma.

## **1.2 Encaminamiento en redes ad hoc inalámbricas**

Como ya se ha comentado, el encaminamiento en redes ad hoc inalámbricas adquiere gran importancia puesto que estará asociado a las prestaciones que ofrece la red.

Las diferentes técnicas utilizadas para encaminar paquetes de datos en las redes clásicas cableadas carecen de validez para las redes ad hoc inalámbricas. Los algoritmos clásicos presuponen una topología de red poco cambiante y, en consecuencia, se basan en complicados sistemas para conocer la mejor ruta desde el origen hacia cualquier destino. En las redes ad hoc, debido a la potencial variabilidad de la topología de red, y sus características específicas, las soluciones planteadas en los algoritmos clásicos de encaminamiento resultan inviables.

Sobre las bases expuestas anteriormente, el encaminamiento en redes ad hoc inalámbricas debe satisfacer ciertos objetivos [Vinagre, 2007]:

- **Minimización de costes inherentes:** debido a la escasez de recursos energéticos y ancho de banda, se deberá reducir 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 radio de 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.

Con estos propósitos se ha desarrollado una gran cantidad de protocolos de encaminamiento que optan por diferentes criterios de diseño. Cada uno de los mismos conlleva un conjunto de características, tanto a nivel de funcionalidad como de prestaciones. En la mayor parte de los casos, estas peculiaridades no son completamente separables, dando lugar a distintas clasificaciones dependiendo de los criterios establecidos.

El nivel de clasificación más habitual, se basa en la estructura de los protocolos en cuanto a la homogeneidad o heterogeneidad de los roles 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 [*nist*]. 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 [*nist*]. 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:

- Proactivo: su funcionamiento se basa en tablas, creadas a partir de una fase original de descubrimiento de ruta, y que albergan la información referente a los caminos en la red obtenidos con distintos criterios. Esta información es de ámbito

global y, por tanto, todos los nodos conservan caminos posibles hacia el resto. Para difundir esta información, los nodos intercambian datos bien periódicamente o bien ante la aparición de un cambio en ella. Los protocolos proactivos logran que el envío de datos se produzca con un retardo despreciable, ya 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, por lo que no resulta viable para entornos móviles.

- **Reactivo o 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 los dos procedimientos anteriores en distintos niveles del encaminamiento. Así, se consigue reducir la sobrecarga de la red con mensajes de control, originada por los protocolos proactivos, mientras que se reduce la latencia de las operaciones de búsqueda (latencia presente en los protocolos reactivos).

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.

### 1.2.1. Perspectiva global del encaminamiento

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. Al igual que en [Vinagre, 2007], esta capacidad es denominada en el presente estudio *eficiencia de encaminamiento*. Esta eficiencia de encaminamiento no debe asociarse 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 tener en consideración factores que no siempre tienen su origen en la capa de red, sino que pueden encontrarse también en las capas físicas y de enlace. El hecho de no considerar estos factores puede llevar a conclusiones erróneas o incompletas. Por estos motivos, el estudio del encaminamiento toma como base el protocolo de encaminamiento, cuyo objetivo es encontrar una ruta lo más cercana posible a la línea recta que une fuente y destino. No obstante, se debe considerar como una parte integrante del mismo las restricciones impuestas por el resto de variables involucradas en el proceso global del encaminamiento.

En este sentido, distintos factores de la capa física 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 (aquellos dispositivos con los que tendrá conectividad directa un nodo determinado); la movilidad de los nodos 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 otra parte, las variables de la capa de enlace, como por ejemplo el número de retransmisiones, influyen directamente sobre las comunicaciones realizadas con éxito entre los dos nodos de cada salto [Vinagre, 2007].



## 1.2.2. Principales algoritmos de encaminamiento

A continuación se describen los principales algoritmos de encaminamiento para redes ad hoc y sus características más relevantes.

- **DSDV (*Destination Sequenced Distance Vector*):** Este protocolo, basado en tablas de encaminamiento y descrito en [DSDV], fue diseñado por Charles E. Perkins y Pravin Bhagwat. Cada nodo de la red mantiene una tabla de encaminamiento que contiene todos los posibles destinos y el número de saltos que daría un paquete que viajara hacia el destino especificado. Cada entrada de esta tabla de encaminamiento, posee un número de secuencia asignado por el nodo destino. Los números de secuencia permiten distinguir rutas antiguas de rutas más recientes. Continuamente se deben enviar mensajes de actualización a través de la red para mantener la consistencia de las tablas.  
Para ayudar a minimizar la gran cantidad de tráfico que ocasionan estas actualizaciones, se utilizan dos tipos de paquetes:
- **Paquetes *full Gump*:** este tipo de paquetes tienen toda la información disponible sobre el encaminamiento y pueden requerir que su envío se divida en varias unidades más pequeñas. Cuando los cambios en la red son pequeños, es raro que se use este tipo de paquetes.
- **Paquetes intermedios:** sólo contienen la información que ha variado desde el último *full dump*. Los nodos disponen de una tabla adicional donde guardan los datos recibidos por los paquetes incrementales.

Las nuevas rutas contienen la dirección de destino, el número de saltos requeridos para alcanzar al destino, el número de secuencia asociado al destino y un nuevo número que identifica todo el mensaje. En caso de que haya dos rutas distintas hacia un destino, se usará la que contenga el número de secuencia más reciente.

Además, si ambos números coincidieran, la ruta con menor número de saltos sería la que se usaría.

En general, DSDV es un protocolo aceptable en escenarios en los que todos los nodos intervienen en las comunicaciones y en los lo que la movilidad es media.

- WRP (*Wireless Routing Protocol*): Creado por S. Murthy y J.J. García- Luna-Aceves [WRP]. Es un protocolo basado en tablas cuyo objetivo principal es mantener información actualizada de todos los nodos de la red. Cada nodo es responsable de mantener cuatro tablas:
  - Tabla de distancias.
  - Tabla de encaminamiento.
  - Tabla de coste de ruta.
  - Tabla con la lista de mensajes retransmitidos (MRL: *Message Retransmission List*).

La MRL se utiliza para gestionar el envío de los paquetes de actualización de rutas. Cada entrada de la MRL contiene el número de secuencia que identifica el paquete de actualización de rutas, un contador de retransmisiones, un vector de asentimientos con una entrada por vecino y una lista de las unidades enviadas en el paquete de actualización (en ocasiones, el paquete se trocea en unidades más pequeñas). Esta MRL almacena qué unidades deben ser retransmitidas y qué vecinos deben asentir todavía los envíos.

Los nodos se informan entre ellos de los cambios en las rutas a través de los paquetes de actualización. Estos paquetes son enviados sólo entre vecinos y contienen los elementos a actualizar en las rutas. Los nodos envían estos paquetes cuando procesan las actualizaciones recibidas de otros vecinos o cuando ellos mismos detectan un cambio en el enlace con algún vecino.

Los nodos mantienen activo el enlace con los vecinos, siempre y cuando reciban de ellos asentimientos u otros mensajes. Si un nodo no está enviando mensajes, debería enviar un paquete *HELLO* cada cierto tiempo a sus vecinos, para que éstos no creyeran que el nodo se había vuelto inalcanzable. Por consiguiente, la omisión de mensajes por parte de un nodo ocasionará la ruptura de ese enlace. Cuando un nodo recibe un mensaje *HELLO* de un nuevo nodo, este nodo será añadido a la tabla de encaminamiento y una copia de esta tabla será enviada al nuevo nodo.

- *AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector)*: Creado por Charles E. Perkins [AODV] como evolución de su anterior protocolo (DSDV). Mantuvo la idea de mantener números de secuencia y tablas de encaminamiento, pero se añadió el concepto de encaminamiento bajo demanda, es decir, sólo se guarda información de los nodos que intervengan en la transmisión de datos. La optimización primordial que se consiguió en relación a su anterior diseño fue el decremento del tiempo de proceso, de la memoria y del tráfico de control por la red. Además, AODV es “muy cuidadoso” con las rutas, manteniéndolas en caché mientras son necesarias e inhabilitándolas cuando su información no es útil. En la siguiente sección se explicará con detalle este protocolo.
- *DSR (Dynamic Source Routing)*: Creado por David B. Johnson y Josh Broch [DSR]. Se trata de un algoritmo basado en el concepto de encaminamiento en origen. Los nodos mantienen *cachés*, cuyas entradas incluyen el destino y la lista de nodos para llegar a él. Las entradas de esta tabla son actualizadas según se aprendan rutas nuevas.

El protocolo consta de dos mecanismos principales: descubrimiento de ruta y mantenimiento de ruta. Cuando un nodo quiere enviar un paquete a un destino, primero consulta su caché para determinar si dispone de una ruta hacia el destino. Si tiene una ruta válida, la usará para enviar el paquete. Sin embargo, si el nodo no dispone de dicha ruta, iniciará un descubrimiento de ruta enviando un

paquete RREQ (*Route REQuest*). Este paquete contiene la dirección de destino buscada, la dirección del nodo que origina el envío y un identificador único. Cada nodo que reciba el paquete verificará si posee una ruta hacia el destino. Si no la tiene, añadirá su propia dirección en el registro de rutas del paquete y después reenviará el paquete a través de todos sus enlaces. Para limitar la propagación excesiva de mensajes de descubrimiento de ruta, un nodo solo reenviará este mensaje si la misma petición no fue recibida con anterioridad.

Cuando un paquete RREQ alcanza su destino final, este nodo genera un paquete de respuesta de ruta (RREP). También podría contestar con un RREP un nodo intermedio que tuviera en su caché una ruta válida hacia el destino del RREQ. Si el nodo que genera la respuesta es el destino, colocará el registro de rutas contenido en el RREQ dentro del RREP. Si es un nodo intermedio el que responde, extraerá de su caché la ruta para llegar al destino, que unida al registro de rutas contenido en el RREQ, compondrá la ruta a introducir en el RREP.

El mantenimiento de rutas se completa con el uso de paquetes de error en ruta (RERR) y asentimientos. Los paquetes de error en ruta son iniciados por un nodo cuando encuentra un problema en la transmisión con algún enlace. Cuando un RERR es recibido, el nodo que provocó el error es eliminado de la caché de rutas. También serán borradas todas las rutas en las que intervenga el enlace roto. Además de los mensajes de error, se usan asentimientos para verificar que las operaciones con los enlaces son correctas.

- ZRP (*Zone Routing Protocol*): Creado Nicklas Beijar [ZRP]. Es un protocolo híbrido a medio camino entre los algoritmos basados en tablas y los basados en encaminamiento bajo demanda. Es utilizado en una clase particular de redes *ad hoc* llamadas RWNs (*Reconfigurable Wireless Networks*). Estas redes se caracterizan por tener gran cantidad de nodos, mucha movilidad y alto tráfico. Los protocolos anteriores no satisfacían las necesidades específicas de estas redes y los autores se decidieron a crear un nuevo protocolo. ZRP usa zonas similares a

*clusters*, en las que los nodos que actúan de bordes se van seleccionando dinámicamente. Además, el radio de estas zonas se reajusta sobre la marcha según las condiciones de la red. Se pueden usar protocolos distintos para comunicarse dentro de las zonas y entre zonas distintas.

- TORA (*Temporally Ordered Routing Algorithm*): Creado por M. Scott Corson y Vincent Park [TORA]. Es un algoritmo que se basa en mantener un grafo dirigido y sin ciclos para llegar al destino. El objetivo es minimizar la carga sobre la red. La diferencia con otros algoritmos es la imposibilidad de estimar constantemente la distancia hacia el destino o de mantener siempre la ruta más corta. Sin embargo, tiene la ventaja de que es un algoritmo muy eficiente pues no satura en exceso de tráfico la red.

### 1.2.3 Protocolo de encaminamiento AODV

Como ya se ha comentado anteriormente, el protocolo AODV surge como evolución del protocolo DSDV, el cual inundaba la red de mensajes de control, de forma que la red se congestionaba y limitaba la duración de las baterías de los terminales. AODV es uno de los protocolos más utilizados dentro de la categoría de algoritmos reactivos, siendo apropiado para las redes ad hoc, ya que intercambia mensajes únicamente cuando necesita establecer una comunicación, es decir, envía mensajes a los vecinos para calcular cada ruta. Gracias a las mejoras incorporadas en AODV se evita la problemática de DSDV, pero, por el contrario, introduce una latencia cada vez que se busca una ruta, por lo que este protocolo está indicado para aplicaciones en las que sea asumible una latencia alta para el primer paquete de una ruta [AODV].

Las principales características del protocolo son:

- Señalización de control baja
- Señalización de procesamiento mínima
- Prevención de bucles
- Funciona sólo con enlaces bidireccionales

Cada nodo tiene asociada una tabla de encaminamiento que utiliza para poder establecer enlaces con otros nodos. En estas tablas de encaminamiento se encuentran las direcciones IP del origen y del destino, el tiempo de vida del paquete y dos indicadores: el número de secuencia de destino y un contador de saltos (*hop count*).

El tiempo de vida que se almacena en las tablas de encaminamiento sirve para evitar que se utilicen enlaces de los que se desconoce su estado desde hace mucho tiempo.

El campo que contiene el número de secuencia del destino, se utiliza para distinguir entre información nueva e información antigua y, de esta forma, evitar la formación de bucles.

El contador de saltos se utiliza cuando a un destino le llegan, de la misma fuente, dos paquetes por caminos distintos. El contador de saltos permite saber qué ruta es la más corta, siendo ésta la seleccionada para enviar la información.

Cada vez que se quiere comunicar una fuente con un destino, se inicia un proceso de descubrimiento de ruta, proceso que finaliza cuando el nodo origen recibe un paquete con la ruta calculada. Una vez establecida la ruta, el proceso de mantenimiento de ruta que sirve para actuar en caso de que se rompa un enlace de la ruta. Estos procesos se detallan a continuación [Domingo, 2005].

### 1.2.3.1 Descubrimiento de rutas

Cuando un nodo quiere transmitir un paquete a un destino, lo primero que debe hacer es buscar en su tabla de encaminamiento y ver si existe una ruta previamente calculada hacia este destino. En caso de encontrarla no iniciaría ningún proceso de descubrimiento de ruta, supondría que la ruta almacenada en su tabla de encaminamiento es correcta y está actualizada. En caso contrario, comenzará el proceso de descubrimiento de ruta (*Route Discovery*) para encontrar un camino válido.

El proceso comienza con el envío de un paquete RREQ (*Route REQuest*) en modo *broadcast*. Este paquete llega a los nodos vecinos con los que tiene conectividad y estos, a su vez, lo reenvían a sus vecinos y así sucesivamente hasta llegar al destino.

Cualquier nodo que durante el proceso de búsqueda conozca la ruta hacia el destino, puede contestar con un paquete de RREP al nodo origen indicando la ruta solicitada.

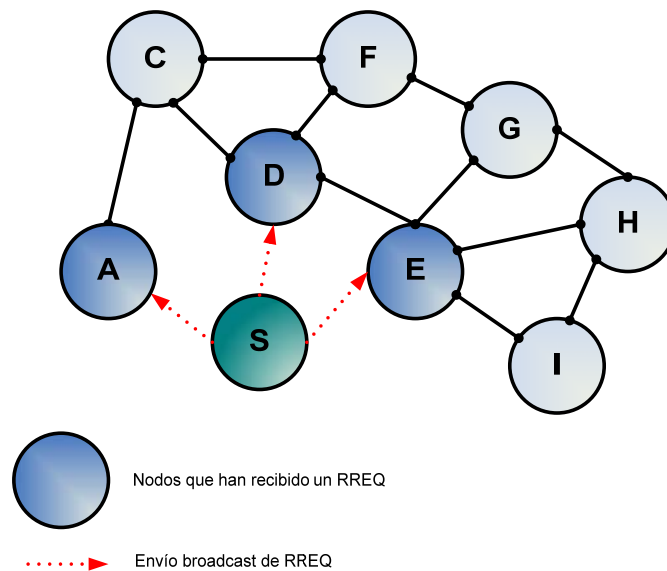


Figura 1.1. Descubrimiento de ruta iniciado por el envío de datos del nodo S al nodo H

En el ejemplo de la Figura 1.1 se quiere iniciar una comunicación entre el nodo S y el nodo H. Para ello, el nodo S inicia un descubrimiento de ruta enviando un mensaje

(RREQ) en modo *broadcast* a sus nodos vecinos, los cuales irán reenviando el mensaje hasta llegar al destino. Durante el proceso de búsqueda todos los nodos van actualizando sus tablas de encaminamiento.

En el formato del paquete RREQ, nos encontramos los siguientes campos:

- Dirección IP del origen
- Número de secuencia del origen
- Dirección IP del destino
- Número de secuencia del destino
- Identificador RREQ
- Contador de saltos (*hop count*)

Uno de los campos más relevantes es el identificador RREQ, que se va modificando cada vez que se genera un reenvío. Este identificador sirve para que los nodos que lo vayan recibiendo (nodos intermedios) sepan si el paquete ya ha sido recibido (tiene el mismo identificador) y deben descartarlo o, por el contrario, sí deben retransmitirlo (porque el identificador de paquete es distinto).

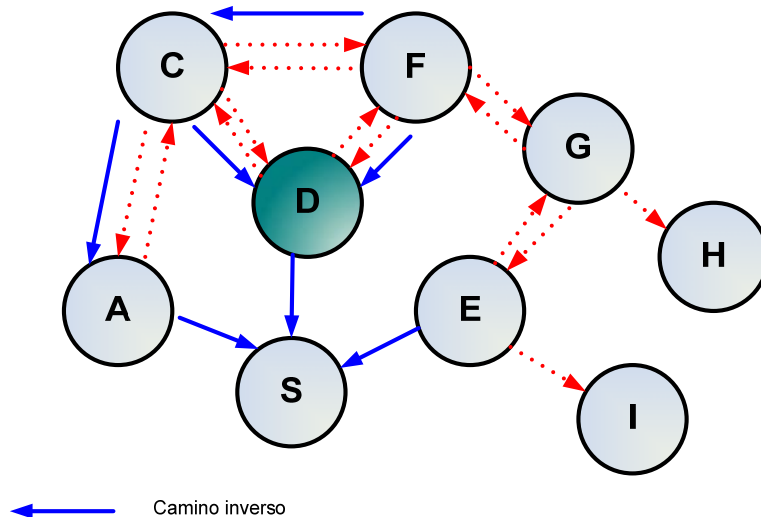


Figura 1.2. Camino inverso en el descubrimiento de ruta

En la Figura 1.2 se ilustra cómo el nodo D recibe dos paquetes de los nodos C y F en modo *broadcast*, pero detecta la duplicidad del mensaje y sólo lo remite una vez.



Cuando el mensaje llega al nodo destino, éste responde al RREQ enviando de forma *unicast* un mensaje RREP (*Route REPLY*). El mensaje RREP contiene la ruta hacia el origen, invirtiendo el camino del RREQ.

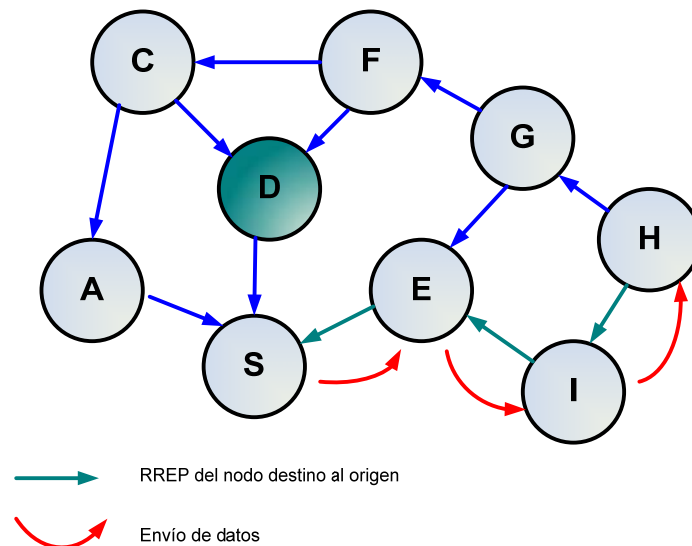


Figura 1.3. Envío del RREP e inicio del envío de datos [Ortuño, 2006]

En la Figura 1.3 se muestra como el RREP sabe el camino hasta el nodo S al invertir la secuencia del RREQ de llegada. Una vez seleccionado el camino, ya se inicia el envío de datos.

### 1.2.3.2 Mantenimiento de rutas

Una vez establecida una ruta, se le asocia un tiempo de vida determinado. La ruta se considerará útil hasta que este tiempo no expire. El proceso de elección del tiempo de vida de la red es crítico para el funcionamiento óptimo del algoritmo AODV y dependerá, casi exclusivamente, de lo dinámica que sea la topología de dicha red, es decir, del grado

de movilidad que tenga. El principal uso del tiempo de vida de la red es evitar la inicialización de un descubrimiento de ruta para cada mensaje de información que se quiere enviar [AODV].

Durante una comunicación entre el nodo fuente y el destino puede ocurrir que alguno de los nodos modifique su posición. Esto puede dar lugar a que se rompa el enlace y que la ruta quede inutilizada. El nodo vecino, al enterarse del enlace roto, debe ser el encargado de informar al resto. Para ello se utiliza el envío del mensaje RERR (*Route ERROR*).

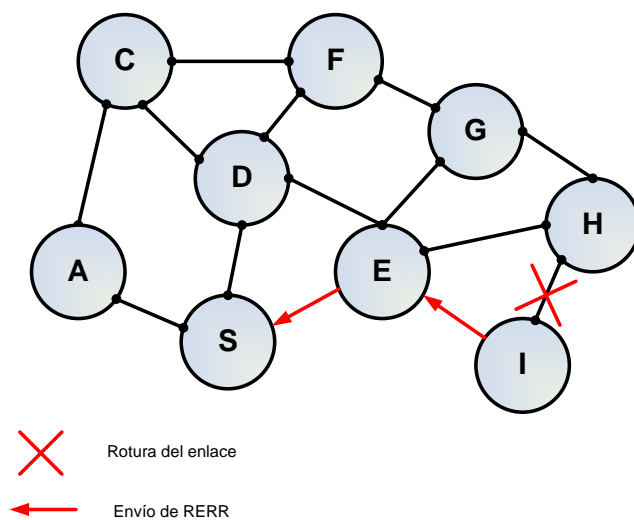


Figura 1.4. Envío de RERR durante el mantenimiento de ruta

El paquete RERR será igual que el mensaje RREP, pero con un número de contador de saltos (*hop count*) infinito. Es decir, el nodo que detecta el enlace roto envía un RERR hacia la fuente con valor de *hop count* infinito, lo que hace que cualquier otra ruta sea mejor y deban reencaminarse los paquetes por otro sitio.

Como se observa en la Figura 1.4, el mensaje de RERR hace el camino inverso, de forma que recorre todos los nodos, desde el nodo I, que es el responsable del enlace, al nodo S. Así, todos los nodos intermedios borran la ruta errónea y actualizan las tablas.

El protocolo de encaminamiento AODV presenta una serie de opciones de optimización, como la posibilidad de reparar a nivel local un enlace roto que forma parte de una ruta activa. Cuando se rompe un enlace, en lugar de enviar un paquete de RERR a la fuente, el nodo que ha detectado la rotura puede intentar repararlo localmente enviando un RREQ con el número de secuencia del destino incrementado en uno hacia ese destino. Los paquetes de datos se quedan almacenados en este nodo esperando recibir un RREP con una nueva ruta disponible hacia el destino. Si este nuevo procedimiento de descubrimiento de ruta no tiene éxito y el paquete RREP no llega, entonces sí que será necesario informar a la fuente acerca de la rotura del enlace enviándole un paquete RERR.

### **1.3 Eficiencia de encaminamiento**

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 el destino 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 (S-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 directivas. 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, por no mencionar su movilidad. Asimismo, dado 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. Por estos motivos, el destino no puede ser siempre 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[ Vinagre, 2007].

Para la definición del concepto de encaminamiento se van a utilizar dos variables, la variable R, que será la recta que una fuente y destino, y la variable L, que mide la distancia recorrida por el paquete. En la Figura 1.5, se ilustran las dos variables que intervendrán en el cálculo de la eficiencia de encaminamiento:

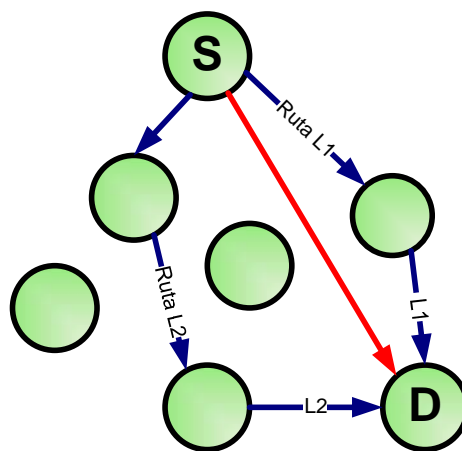


Figura 1.5. Variables involucradas en la eficiencia de encaminamiento

El objetivo que se pretende conseguir con la eficiencia de encaminamiento será, por tanto, minimizar la diferencia existente entre las variables R (en rojo en la Figura 1.5) y L. En el caso de la Figura 1.5, se optaría por la utilización de la ruta L1, puesto que se aproxima mucho más a la línea recta que una origen y destino.

En este estudio, para la representación estadística de la eficiencia de encaminamiento, se utilizará la función densidad de probabilidad de la distribución  $R/L$ , que proporcionará una visión clara sobre la eficiencia del encaminamiento en la red.

## Capítulo 2. Movilidad en redes *ad hoc*

El estudio de las redes ad hoc exige la definición de modelos que describan la topología inicial y la movilidad de los nodos que conforman la red. Esta movilidad es, en principio, mucho más crítica que en otras tecnologías de comunicaciones móviles, ya que las redes móviles e inalámbricas convencionales (entre las cuales se pueden destacar la telefonía móvil celular y las redes de área local inalámbrica o WLAN, acrónimo de *Wireless Local Area Network*), requieren una infraestructura física preestablecida y unos mecanismos centralizados para efectuar parte de sus operaciones y procesos de comunicación, utilizando puntos de acceso predeterminados para permitir que sus usuarios móviles se puedan interconectar a la red principal y obtener así los servicios que requieren [Calderon, 2005], mientras que en las redes ad hoc, todos los nodos pueden actuar como encaminadores, es decir, carecen de infraestructura fija preestablecida a la que conectarse, lo que requerirá una definición exhaustiva de la topología de red para optimizar el proceso de encaminamiento.

Dado el gran número de elementos que intervienen en una red ad hoc, el mecanismo de estudio y análisis en este campo pasa a veces obligatoriamente por la simulación. En este campo, la mayor parte de los estudios emplean masivamente el modelo de movilidad denominado *Random WayPoint* (RWP) [Bettstetter, 2003].

En este capítulo, se revisarán los principales modelos de movilidad implementados en redes ad hoc, para posteriormente, centrar el análisis en el modelo RWP utilizado en este estudio. Para finalizar, se abordarán los problemas que conlleva la utilización de este modelo y cuál ha sido la solución propuesta.

### 2.1 Modelos de movilidad

La manera más habitual de estudiar las redes ad hoc inalámbricas móviles es mediante simulación. Aunque el despliegue en un entorno real es indispensable para la comprensión de las particularidades de las redes ad hoc, las simulaciones tienen

ventajas muy claras: su despliegue es rápido, su diseño sencillo, las pruebas son repetibles y sin apenas coste económico. Además, permiten aislar aquellos parámetros que pueden afectar a las prestaciones finales. También permiten la realización de múltiples escenarios que son difíciles de implementar en un entorno real. Por lo tanto, la elección del modelo de movilidad resultará esencial, ya que, tendrá un impacto significativo en las características de la red.

La clasificación más habitual de los modelos de movilidad es [Camp, 2002]:

- Modelos de movilidad basados en trazas: utilizan patrones de movilidad que se observan en entornos reales. Para la implementación de estos modelos, se requieren largos períodos de observación de sistemas ya implementados. Este tipo de modelos no son aplicables a redes de nueva implementación, como es el caso de las redes ad hoc, ya que todavía no existe un patrón de comportamiento completamente definido.
- Modelos de movilidad sintéticos: en estos modelos se intenta representar de una forma lo más real posible el comportamiento de MNs (*Mobile Nodes*) sin el uso de trazas. Algunos de los modelos más habituales son:
  - RWP: El modelo más comúnmente utilizado debido a su simplicidad. En él el movimiento de un nodo es independiente del resto de nodos que forman la red, eligiendo un destino de forma aleatoria. Este modelo será detallado en el siguiente apartado.
  - *Reference Point Group Mobility Model*: en este modelo los nodos se dividen en grupos, siendo uno de ellos el *node leader*, que gestionará el movimiento de todos los nodos de su grupo. Además, existe un nodo central denominado *group leader* que controlará el movimiento de todos los grupos de la red. Este modelo añade complejidad a la red pero mejora las características de la red en cuanto a latencia, *jitter*, etc.
  - *Freeway Mobility Model*: este modelo tiene una gran dependencia espacial. Simula el movimiento de los nodos a través de diferentes caminos que previamente han sido definidos. Además de la dependencia espacial o geográfica, este modelo incluye dependencias temporales.

- *Manhattan Mobility Model*: es un modelo parecido al anterior que también posibilita la definición de un mapa en el que se detallan las diferentes calles por las que se moverán los nodos. La principal diferencia con el anterior modelo es que, en este caso, se permite la incursión de probabilidades para variar la dirección de movimiento de los nodos.
- *Obstacle Mobility Model* [Jardosh, 2003]: da la posibilidad de añadir obstáculos al modelo, ofreciendo así una aproximación más verídica de un posible entorno real.

Para la realización del presente estudio se ha optado por la utilización del modelo RWP debido a su simplicidad y su uso tan extendido en el estudio de las redes ad hoc. En el siguiente apartado se analizará en detalle este modelo utilizado.

## **2.2 Modelo de movilidad Random Waypoint**

De acuerdo con el modelo de destino aleatorio o RWP, los nodos de una red ad hoc se mueven en sucesivos tramos rectos establecidos por un punto origen y destino. Tras alcanzar un destino, se elige otro escogiéndolo uniformemente dentro del área de simulación. Así, en el caso de un espacio bidimensional, para cada nuevo movimiento, el nodo determina las coordenadas ( $x$  e  $y$ ) del siguiente destino mediante una variable aleatoria uniformemente distribuida entre 0 (origen de coordenadas) y el límite máximo permitido para los desplazamientos en cada dirección ( $x_{\text{máx}}$  e  $y_{\text{máx}}$ ). Una vez que se alcanza un destino y antes de elegir el siguiente, el modelo RWP permite que los nodos estén en la posición de destino un tiempo caracterizado con una variable aleatoria ( $T_{\text{pausa}}$ ). Igualmente, en algunas de las implementaciones, la velocidad constante de cada trayecto se suele decidir también a través de una distribución uniforme en el intervalo  $(0, V_{\text{máx}}]$ , siendo  $V_{\text{máx}}$  (expresada en m/s) la velocidad máxima permitida para los nodos.

El modelo RWP padece una serie de inconvenientes que se desprenden de su propia simplicidad. Entre los más importantes podemos citar [Casilari, 2005]:

- Son escasos los escenarios reales en los que los nodos de comunicación se muevan de la manera aleatoria que define RWP. El modelo ignora que tanto la velocidad como el destino de un nodo móvil no suelen ser procesos sin memoria y que, en cada trayecto, el valor de ambas variables se halla fuertemente determinado por el anterior.
- El modelo no contempla la presencia de obstáculos en el área de desplazamientos ni el hecho de que, en muchos escenarios de redes ad hoc, la movilidad se encuentra fuertemente determinada por la presencia de rutas prefijadas (calles, pasillos, senderos,...).
- El movimiento no considera posibles correlaciones en los movimientos de los nodos, los cuales se desplazan sin tener en cuenta a los demás. Esta circunstancia despreja la evidencia de que en la mayoría de aplicaciones en donde el nodo es un agente humano, el movimiento sigue pautas fuertemente grupales (provocadas por la formación de pelotones, corrillos, unidades de salvamento...)

Para subsanar estas deficiencias se han propuesto (véanse, por ejemplo, [Bettstetter, 2004 y Navidi, 2004a]) una serie de modelos que refinan los patrones de movilidad (incorporando correlaciones individuales o de grupo, definiendo la presencia de vías u obstáculos, etc) a costa de un incremento, a veces notable, de la complejidad y los parámetros requeridos por los procesos estocásticos involucrados. En oposición a estos inconvenientes, el modelo RWP ofrece una enorme simplicidad, esto es, una escasa necesidad de parametrización (limitada básicamente a los valores de  $T_{\text{pausa}}$ ,  $V_{\text{máx}}$  y  $V_{\text{mín}}$ ).

Asimismo, al no estar enfocado a ningún escenario de aplicación concreto, su alto grado de abstracción lo convierte en un modelo generalista, idóneo para efectuar pruebas genéricas, al menos iniciales, ante nuevas propuestas de protocolos o mecanismos de gestión de recursos en redes MANET. Estas ventajas, junto con la facilidad y extensión



de su implementación (el modelo se encuentra presente en las librerías de simuladores tan populares como ns-2, *network simulator*, [ns-2]), han posibilitado que sea el modelo más común en la literatura sobre redes ad hoc.

### **2.3 Estabilización de las posiciones de los nodos en el modelo RWP**

Existen numerosos estudios en la literatura [Bettstetter 2002-2004, Boleng, 2002 y Navidi 2004-2004a] que prueban que el modelo RWP no ofrece una distribución de los nodos uniforme, tienden de concentrarse más en la zona central de la red, donde existe mayor probabilidad de encontrarlos. Normalmente la distribución inicial de los nodos es uniforme, por lo tanto, los primeros segundos de la simulación no son representativos de la situación final.

Debido a esto, existen tres posibles soluciones para abordar el problema de la estabilización de los nodos en el modelo RWP:

La primera solución consiste en la ejecución del modelo durante un periodo de tiempo grande y, posteriormente, guardar las posiciones que tienen los nodos al finalizar la simulación. Estas posiciones serán las utilizadas como posiciones iniciales durante las simulaciones siguientes. Así se asegura que las posiciones iniciales de los nodos serán representativas de la situación final.

Otra posible solución es utilizar un área de simulación conocida y situar los nodos de acuerdo con el modelo RWP, pero favoreciendo la uniformidad, evitando posicionar los nodos al azar.

La última solución posible es la utilización de un tiempo de estabilización en la simulación, que evite que en los instantes iniciales se produzca intercambio de información entre los nodos que intervienen en la red.

Ante esto, existe una solución que no obliga a redefinir el modelo y es la propuesta en [Navidi, 2004-2004a]. Este trabajo propone elegir directamente los valores de velocidad y posición de los nodos de acuerdo con una distribución estacionaria en lugar de emplear una uniforme. Con ello se logra eliminar o reducir en gran medida el efecto del transitorio ya comentado. Esta estrategia es la que se utilizará en las simulaciones que se realizarán en el presente trabajo.

No obstante, dado que la mayoría de los estudios no tienen en consideración la existencia de este transitorio, cabe preguntarse cuál es su influencia en la estimación de la movilidad de la red. Para la evaluación de este aspecto, se planteó la realización de dos tipos de simulaciones. En primer lugar se partió de una distribución espacial de los nodos generada de acuerdo con una distribución uniforme y se compararon sus resultados con los obtenidos al aplicar una distribución no uniforme. En los resultados obtenidos, el desplazamiento de los nodos con RWP tiende a elegir como paso la zona central del área de simulación, razón por la que en condiciones estacionarias los nodos se encuentran más concentrados que con la distribución uniforme. Por tanto, conforme la simulación avanza, el número de enlaces activos aumenta. Este análisis se realiza de forma más detallada en el Capítulo 4.

## Capítulo 3. Objetivos

El objetivo principal del presente estudio es evaluar mediante simulaciones la eficiencia de encaminamiento en redes ad hoc inalámbricas en entornos móviles. Para ello, como se comentó en el Capítulo 1, el estudio se centrará en el análisis de la distribución de la variable aleatoria R/L (cociente entre la línea recta formada entre el nodo origen y el destino y la distancia del enlace que los une). Como ya se ha comentado, como protocolo de encaminamiento se utilizará el protocolo AODV.

Para la consecución del objetivo principal, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

1. Estudio de las redes ad hoc inalámbricas móviles, así como de los distintos protocolos de encaminamiento en este tipo de redes. Con ello se persigue tener una primera visión de algunas de las limitaciones que tienen las redes ad hoc móviles y la forma de enfocar las posibles soluciones. Para el presente estudio, como se ya ha sido comentado, se optó por la utilización del protocolo AODV, por ser ampliamente utilizado y estar implementado en el simulador de redes utilizado (*ns-2: Network Simulator version 2*).
2. Revisión bibliográfica de los diferentes modelos de movilidad para redes ad hoc inalámbricas. Este estudio previo es de vital importancia y ha sido realizado en paralelo con el trabajo relacionado con el objetivo anterior, ya que el modelo de movilidad repercute en las prestaciones de la red (véase el Capítulo 2). Como se ha indicado en el capítulo anterior, en este trabajo vamos a utilizar el modelo RWP debido a su simplicidad y a su uso tan extendido en este tipo de redes.
3. Análisis de la variabilidad inicial en las posiciones de los nodos, que repercute en la alta variabilidad de las prestaciones de la red, a no ser que los resultados se obtengan a muy largo plazo. Tras una revisión bibliográfica se encontró una implementación de libre acceso de la Universidad de Colorado [*mobgen-ss*],

implementación que garantiza que el patrón de movilidad es estacionario en el tiempo. Además, asegura que las posiciones iniciales de los nodos no se regirán por una distribución uniforme.

4. Diseño de los experimentos. Una vez que se ha elegido el protocolo de encaminamiento a utilizar, así como el modelo de movilidad, y se ha solucionado el problema de la alta variabilidad en las posiciones iniciales de los nodos, se abordarán las simulaciones, no sin antes adecuar el escenario al objetivo que se pretende conseguir. Posteriormente, se procederá a la realización de las simulaciones. Este aspecto no es baladí, se debe tener claro el entorno de trabajo que se está utilizando, una red con gran cantidad de nodos en permanente movimiento intercambiándose tráfico, tanto de datos como de señalización, es decir, un entorno muy propenso a las colisiones.

Para la consecución de los objetivos anteriores, se ha partido de varios requisitos de partida. En primer lugar, se han utilizado diferentes programas pertenecientes a diversos estudios [Navidi, 2004-2004a], que han mejorado la comprensión del problema y han ayudado en gran medida al procesado y la consecución de los objetivos. Estos programas utilizados han sido conveniente modificados para que se adecuen al entorno de trabajo utilizado.

Además, este proyecto está basado en el estudio teórico realizado en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Rey Juan Carlos [Vinagre, 2007] que aborda mucho más ampliamente el objetivo perseguido por este estudio y ofrece un marco teórico del comportamiento de encaminamiento de las redes ad hoc inalámbricas.

## **Capítulo 4. Etapas del Proyecto Fin de Master. Planificación y Metodología**

En este capítulo se presentan las distintas etapas para la realización del presente estudio, así como su planificación. También se detallará la metodología de trabajo que se ha seguido para la obtención de resultados y conclusiones que sean relevantes para el objetivo propuesto.

### ***4.1 Etapas del proyecto y planificación***

Este proyecto se ha dividido en distintas tareas, que se detallarán a continuación. Para cada una de ellas, se dará una breve descripción y los objetivos perseguidos con su realización. Al final de este apartado se recoge, en forma de tabla, la dedicación asociada a cada una de ellas.

#### **4.1.1 Documentación y revisión del estado del arte**

La primera etapa de este proyecto consistió en una revisión de los conceptos relevantes en el ámbito del mismo. En concreto, esta revisión se ha centrado en los siguientes aspectos:

- Estudio de las redes ad hoc inalámbricas móviles, centrándonos en los distintos protocolos de encaminamiento empleados en las mismas.
- Breve análisis del protocolo de encaminamiento seleccionado: AODV.
- Comparativa entre los distintos modelos de movilidad para redes ad hoc inalámbricas.
- Análisis de las herramientas de simulación existentes para este tipo de redes.

*Objetivos:*

- Familiarizarse con los conceptos más importantes de las redes ad hoc inalámbricas, identificando la problemática impuesta por sus características.
- Comprender los mecanismos de encaminamiento del protocolo seleccionado para este estudio.
- Descubrir posibles parámetros relevantes para entornos con movilidad, como por ejemplo los tiempos asociados a cada transmisión, el tiempo de vida de los paquetes o TTL (*Time To Life*),...
- Tener conocimiento de las soluciones implementadas con anterioridad a este problema.
- Seleccionar el simulador que mejor se adapte a nuestras necesidades.

#### **4.1.2. Despliegue del entorno de trabajo**

La realización de esta tarea consistió en la toma de contacto con el programa de simulación seleccionado, el ns-2 (*Network Simulator version 2*), adquiriendo los conocimientos necesarios para su correcta utilización.

*Objetivo:* identificar los distintos parámetros a modificar en los scripts que utiliza esta herramienta para poder simular redes ad hoc móviles.

#### **4.1.3. Análisis previo y especificación formal de la solución**

Esta tarea puede dividirse en:

- Centrar el objetivo del estudio.
- Elección del modelo de movilidad que van a seguir los nodos de las redes a simular: *Random Waypoint (RWP)*.
- Generación de rutinas en Matlab para analizar los resultados de las pruebas previas, realizadas para buscar el escenario de trabajo que mejor se adaptara a nuestras necesidades.
- Verificación del cumplimiento de los requisitos de partida a través de las rutinas anteriores.

*Objetivos:*

- Tener conocimiento de todas las posibilidades del entorno de trabajo.
- Concretar los pasos a seguir para la consecución de los objetivos del proyecto.
- Realizar una serie de programas para analizar los resultados.
- Tener a plena disposición todos los elementos necesarios para la evaluación de los experimentos que componen el estudio.

#### **4.1.4. Estudio e implantación de las herramientas a utilizar**

En este caso, la realización de esta tarea consiste en la instalación de una herramienta sobre el ns-2 para conseguir simular redes cuyos nodos sigan un patrón de movimiento regido por el modelo de movilidad RWP. En particular, se instala la herramienta *mobgen* para dotar a los nodos de movilidad (en el Apartado 4.2.2.2, se explicará en detalle esta implementación).

*Objetivos:*

- Contar con todos los medios para poder simular los distintos escenarios seleccionados.
- Generación de escenarios.
- Adecuación de los ficheros del ns-2 para conseguir que utilicen estos nuevos escenarios (implementados con otro tipo de herramientas).
- Visualización de los resultados.

#### **4.1.5. Validación y pruebas de la solución implementada**

Esta quinta tarea consistió en la realización de las simulaciones que se habían ido preparando con la realización de todas las tareas anteriores. Por ello, esta tarea puede subdividirse en:

- Realización de las simulaciones.
- Análisis de los resultados obtenidos.
- Extracción de conclusiones.

*Objetivos:* el objetivo fundamental de esta tarea es comprobar que se han alcanzado los objetivos del proyecto.

#### **4.1.6. Elaboración de la documentación y de la memoria del proyecto**

Esta última tarea puede descomponerse en:

- Elaboración de informes periódicos para cada una de las etapas del proyecto y de las distintas pruebas que se iban realizando.
- Redacción de la memoria final.

*Objetivos:* Documentar de forma clara cómo se han ido realizando las distintas etapas del proyecto y cuáles han sido los resultados y las conclusiones.

En la Tabla 4.1 se muestra un resumen del tiempo empleado en cada una de las tareas que componen el proyecto.



| <b>Actividades</b>   | <b>Duración</b> | <b>Dedicación</b> | <b>Total</b> |
|--|-----------------|-------------------|--------------|
| <i>A. Documentación y revisión del estado del arte</i>   |                 |                   |              |
| A.1 Estudio de las redes ad hoc móviles  | 1 semana        | 2 h/día           | 10h          |
| A.2 Análisis del protocolo AODV  | 1 semana        | 2 h/día           | 10h          |
| A.3 Comparativa distintos modelos de movilidad   | 2 días          | 2 h/día           | 4h           |
| A.4 Análisis de distintas herramientas de simulación   | 1 día           | 2 h/día           | 2h           |
| <b>Actividad A</b>   |                 |                   | <b>26h</b>   |
| <i>B. Despliegue del entorno de trabajo</i>  |                 |                   |              |
| Toma de contacto con el simulador ns-2   | 2 semanas       | 1-2 h/día         | 14h          |
| <b>Actividad B</b>   |                 |                   | <b>14h</b>   |
| <i>C. Análisis previo y especificación formal de la solución</i>                                   |                 |                   |              |
| C.1. Centrar el objetivo del estudio   | 1 semana        | 1-2 h/día         | 6h           |
| C.2. Elección del modelo de movilidad RWP  | 1 día           | 2 h/día           | 2h           |
| C.3. Generación de rutinas Matlab para analizar las distintas pruebas iniciales                    | 2semanas        | 3 h/día           | 30h          |
| C.4. Verificación del cumplimiento de los requisitos de partida a través de las rutinas anteriores | 1 semana        | 2 h/día           | 10h          |
| <b>Actividad C</b>   |                 |                   | <b>48h</b>   |
| <i>D. Estudio e implantación de las herramientas a utilizar</i>                                    |                 |                   |              |
| D.1. Contar con todos los medios para poder simular distintos escenarios                           | 3 días          | 1 h/día           | 3h           |
| D.2. Generación de escenarios  | 1 semana        | 1-2 h/día         | 8h           |
| D.3. Adecuación de los ficheros de ns-2  | 1 semana        | 1-2 h/día         | 8h           |
| D.4. Visualización de los resultados   | 1 semana        | 1-2 h/día         | 8h           |
| <b>Actividad D</b>   |                 |                   | <b>27h</b>   |
| <i>E. Validación y pruebas de la solución implementada</i>   |                 |                   |              |
| E.1. Realización de las simulaciones   | 3 días          | 2 h/día           | 6h           |
| E.2. Análisis de los resultados obtenidos  | 1 semana        | 2 h/día           | 10h          |
| E.3 Extracción de conclusiones   | 1 semana        | 2 h/día           | 10h          |
| <b>Actividad E</b>   |                 |                   | <b>26h</b>   |
| <i>F. Elaboración de la documentación y de la memoria del proyecto</i>                             |                 |                   |              |
| F.1. Documentación de cada etapa del proyecto  | 1 semana        | 2 h/día           | 10h          |
| F.2. Redacción de la memoria final   | 2 semanas       | 4,5 h/día         | 45h          |
| <b>Actividad F</b>   |                 |                   | <b>55h</b>   |
| <b>TOTAL</b>   |                 |                   | <b>196h</b>  |

Tabla 4.1. Resumen del tiempo empleado en cada una de las tareas que componen el proyecto

## 4.2. Metodología

El diseño de experimentos juega un papel fundamental a la hora de analizar los resultados que caractericen las propiedades del encaminamiento en redes ad hoc inalámbricas. Por ello, este apartado detallará los pasos seguidos para crear los escenarios de simulación necesarios. En primer lugar, se estudiará el uso del simulador de red seleccionado, el ns-2, particularizando su uso a entornos móviles. A continuación, se resuelve uno de los problemas más característicos en las simulaciones de redes ad hoc inalámbricas: la falta de estabilización en las distribuciones espaciales de los nodos con el tiempo. En el siguiente paso, se realizan distintas pruebas para adecuar el entorno de trabajo a los escenarios requeridos.

### 4.2.1. Simulador ns-2

Como ya se ha comentado con anterioridad, para la experimentación y la simulación de red se empleará ns-2, un simulador de red orientado a objetos y basado en eventos. Este simulador es, con mucha diferencia, el más empleado por la comunidad de investigadores sobre este tipo de redes. Simula gran variedad de redes IP (*Internet Protocol*), de área local y de área extensa; implementa protocolos de red como TCP (*Transmisión Control Protocol*) y UDP (*User Datagram Protocol*); dispone de generadores de tráfico como FTP (*File Transfer Protocol*), Telnet, HTTP (*Hipertext Transfer Protocol*), CBR (*Constant Bit Rate*) y VBR (*Variable Bit Rate*); protocolos de área local; diferentes mecanismos de gestión de colas, algoritmos de encaminamiento y multidifusión (multicast).

El código fuente de ns-2 está disponible bajo diversas licencias, lo que permite que en el simulador haya aportaciones de multitud de centros de investigación de todo el mundo: prácticamente cualquier protocolo de área local o extensa que tenga una mínima relevancia tendrá disponible una o varias implementaciones para el simulador. La Figura 4.1 ofrece una visión simplificada de ns-2 desde el punto de vista del usuario, que percibe el simulador como un intérprete de OTcl que cuenta con:

- Un planificador de eventos.
- Librerías de objetos con componentes de red: nodos, aplicaciones y protocolos.
- Librerías de configuración de red que permiten crear enlaces entre los componentes de red. [ns-2]

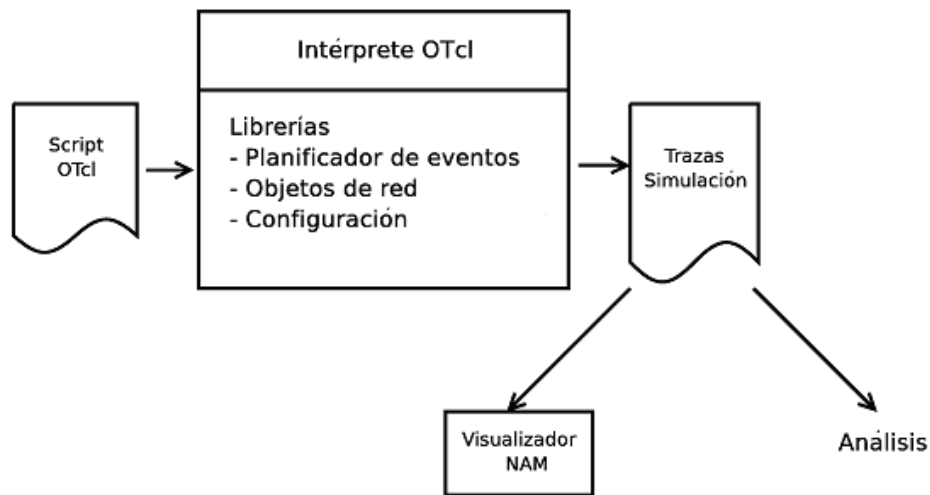


Figura 4.1. Esquema del simulador ns-2 [ns-2]

Para la realización de una simulación de red con ns-2 se hace un script en OTcl que inicia el planificador de eventos, configura la topología de la red usando las librerías de componentes de red y configuración de red, e indica a las fuentes de tráfico cuándo iniciar y detener la transmisión de paquetes a través del planificador de eventos. Un objeto de red se puede crear escribiéndolo desde cero o como la composición e interconexión de otros, donde un objeto apuntará a la dirección del objeto que sea su vecino estableciendo la trayectoria seguida por los datos en la red.

Por motivos de eficiencia, ns-2 está escrito en C++ además de en OTcl. Para reducir el tiempo de ejecución de las simulaciones, el planificador y los componentes básicos de red están escritos en C++. Los objetos principales de C++ se manipulan desde OTcl, sus métodos y variables se hacen disponibles al intérprete OTcl mediante un mecanismo que duplica el objeto C++ en un objeto OTcl, cada jerarquía de objetos en C++ tiene una jerarquía análoga en OTcl [ns-2].

Un usuario que no necesite añadir nueva funcionalidad ni protocolos al simulador, ejecuta simulaciones usando los objetos OTcl. El script OTcl puede configurarse para que vuelque trazas con información detallada sobre la ejecución sobre uno o varios ficheros de texto. El simulador cuenta con la herramienta NAM (*Network Animator*), que permite representar gráficamente algunos aspectos de la simulación, como el movimiento de los nodos, la velocidad de transmisión de los datos y el número de paquetes descartados en cada enlace.

La decisión de emplear la herramienta ns-2 se debe a que la herramienta utilizada por el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Rey Juan Carlos, departamento donde se ha realizado el presente estudio.

Para la realización de este proyecto, se ha tomado como punto de partida el archivo Tcl utilizado en [Vinagre, 2007], que ofrecía una funcionalidad básica, por lo que ha sido necesario una posterior modificación del mismo, ya que no se adecuaba a nuestros objetivos.

Se debe tener en cuenta que, en la utilización del ns-2, además del fichero Tcl (que será la base de la simulación) intervienen otros archivos para dotar al sistema de una funcionalidad completa. Este aspecto será detallado en el Apartado 4.2.2.1.

#### **4.2.2. Adecuación del entorno de trabajo**

Como se ha comentado con anterioridad, las pruebas realizadas en este proyecto tienen como finalidad caracterizar la influencia que la movilidad de los nodos tiene en la eficiencia de encaminamiento. Por ello, en este apartado se detallará como han sido realizadas las distintas pruebas que permitieron obtener los escenarios de simulación requeridos.

### 4.2.2.1 Modificación del script Tcl

El primer paso a realizar son las modificaciones del fichero base empleado, [Vinagre, 2007]. Las variables más relevantes que han sido modificadas se muestran a continuación:

- *Tamaño de red*: en las pruebas iniciales fue necesario modificar este parámetro ya que en el código tomado como referencia, en el que los nodos no se movían, este parámetro estaba fijado a un valor de  $10000m \times 10000m$ . En escenarios móviles, el tamaño de la red repercute en los recursos computacionales necesarios para realizar las simulaciones. Las dimensiones de la red se corresponden con la variable 'x' e 'y' que, como se muestra en la Figura 4.2, fueron reducidas hasta un valor de  $3000m \times 3000m$ .

```
# Define options
# =====
set opt(chan)      Channel/WirelessChannel    ;# channel type
set opt(prop)      Propagation/FreeSpace      ;# radio-propagation model
set opt(netif)     Phy/WirelessPhy           ;# network interface type
set opt(mac)       Mac/802_11                ;# MAC type
set opt(ifq)       CMUPriQueue              ;# interface queue type
set opt(ll)        LL                        ;# link layer type
set opt(ant)       Antenna/OmniAntenna       ;# antenna model
set opt(x)         3000
set opt(y)         3000
set opt(ifqlen)    50                        ;# max packet in ifq
set val(nn)        100                       ;# numero de nodos
set opt(adhocRouting) AODV                   ;# routing protocol
set opt(tr)        n100a3000x3000t30v20p0.tr ;# archivo de trazas
set opt(namfile)   n100a2000x2000v20p0.nam  ;# archivo de nam
set opt(stop)      30                        ;# duracion de la simulacion en segundos
#####
set val(sc)        "mobgen-ss/n100a3000x3000t30v20p0" ; # escenario de trafico
set val(seed)      0
set val(cp)        ""                        ;# patron de conexiones
```

Figura 4.2. Script Tcl utilizado en las simulaciones.

- *Número de nodos*: al igual que en el caso anterior, fue necesario reducir este parámetro, ya que estaba fijado a 547 y este número es muy elevado para redes móviles, afectando a la capacidad de simulación de la herramienta ns-2. Esta variable aparece definida como 'nn' en la Figura 4.2 y se ha fijado a un valor igual a 100.

- *Protocolo de encaminamiento*: como se ha mencionado anteriormente, la herramienta ns-2 soporta la implementación de múltiples protocolos de red. Por ello, para la utilización del protocolo AODV únicamente será necesario indicárselo en la variable ‘*adhocrouting*’.
- *Nombre del fichero de resultados (traza)*: en la realización de este estudio se han creado multitud de trazas. Para evitar la pérdida de la información será necesario asignar un nombre diferente a la variable ‘*tr*’ cada vez que se ejecute el fichero Tcl.
- *Tiempo de simulación*: en la Figura 4.2 se puede observar que, en el fichero Tcl existe un parámetro, ‘*stop*’, que indica la duración de la simulación en segundos. Dicho parámetro se ha reducido mucho con respecto al original, ya que está directamente relacionado con el tiempo asociado a cada transmisión y, en este caso, tenemos un número menor de transmisiones que en el caso de la red fija del fichero base.
- *Traza de movilidad*: si se van a utilizar ficheros de escenarios con movilidad, como es el caso del presente proyecto, hay que incluir en la variable ‘*sc*’ la ruta y el nombre del fichero de movilidad que se utilizará en la simulación.

Por último, destacar que un parámetro tan importante como es la potencia de transmisión de los nodos, se ha dejado al valor que ya tenía, correspondiente a 0.1W.

Una vez realizadas estas modificaciones en el fichero Tcl, el siguiente paso es la creación de un fichero que definirá las parejas de nodos que se intercambiarán información, es decir, definirá el conjunto de nodos origen y nodos destino. Esto se realiza con una rutina Matlab en la que, de todo el rango de nodos, se seleccionan al azar tantos orígenes y destinos como se le solicite a la rutina.

Para completar las modificaciones realizadas sobre el fichero base de ns-2 se procederá a la generación del escenario mediante la herramienta *mobgen-ss*. Este aspecto será detallado en el siguiente apartado.

Se debe tener presente que, para cada una de las pruebas que componen este estudio, ha sido necesario modificar los ficheros mencionados anteriormente.

#### 4.2.2.2 Escenarios de movilidad

Como ya se ha comentado, para la generación de los diferentes escenarios utilizados en la simulación, se ha optado por utilizar la herramienta *mobgen-ss*. Esta herramienta asegura la estabilidad de la topología, ya que en diferentes estudios, como los realizados en [Bettstetter 2002,2003 y 2004, y Navidi 2004], se ha comprobado que, a lo largo del tiempo, la distribución espacial de los nodos generados por el modelo RWP no es estable. Al inicio de la simulación, los nodos tienen una determinada distribución espacial que, con el paso del tiempo, se estabiliza alcanzando una distribución estacionaria. Por tanto, los resultados obtenidos cuando se analiza la eficiencia de encaminamiento no serán iguales a lo largo del tiempo (por esta diferencia en la forma de distribuirse los nodos), siendo necesario determinar a partir de qué instante se puede considerar que los nodos ya siguen una distribución espacial estacionaria. Estas afirmaciones se verán con más detalle al final de este apartado.

Por la razón mencionada en el párrafo anterior, se desechó la utilización de la herramienta que ofrece el simulador ns-2 para implementar el modelo RWP, la herramienta *setdest*, que inicialmente posiciona los nodos de acuerdo a una distribución espacial uniforme. La herramienta seleccionada para evitar este problema es *mobgen-ss*, que utiliza *setdest* para el posicionamiento de los nodos, pero partiendo de una distribución estacionaria desde el instante de simulación inicial. La utilización de esta herramienta sigue el patrón que se muestra en la Figura 4.3.

```
NOD0-03:~/proyecto3/simulacion/mobgen-ss lorena$ ./mobgen-ss
Usage:  mobgen-ss <number of nodes>
        <max-x> <max-y> <end time>
        <speed mean> <speed delta>
        <pause time> <pause time delta>
        <'N' or 'G' or 'Q'>
        'N' implies NS2 mobility file
        'G' implies gnuplot path file
        'Q' implies QualNet mobility file
NOD0-03:~/proyecto3/simulacion/mobgen-ss lorena$
```

Figura 4.3 Parámetros a configurar en la herramienta mobgen-ss

En la Figura 4.3 se muestran los diferentes parámetros requeridos por la herramienta *mobgen-ss*, como son el número de nodos, el tamaño de la red, el tiempo de simulación, la velocidad de los nodos y el tiempo de pausa de cada uno de ellos. El tiempo de pausa indicará el período de tiempo que los nodos estarán en la posición espacial final determinada por el modelo de movilidad. Tanto el tiempo de pausa como la velocidad de los nodos tienen asociados unos parámetros que indican el rango de variación de cada una de las variables.

Además, como se observa en la Figura 4.3, la herramienta *mobgen-ss*, es capaz de proporcionar ficheros de escenarios válidos para dos herramientas gráficas, como son *Gnuplot* y *Qualnet*. Un ejemplo de la utilización de la herramienta *mobgen-ss*, se muestra en la Figura 4.4.

```
NODO-03:~/proyecto3/simulacion/mobgen-ss lorena$ ./mobgen-ss 100 3000 3000 170 1  
0 0 0 0 N > n100a3000x3000t170v10p0
```

Figura 4.4 Captura de la herramienta *mobgen-ss*

donde se tiene un número de nodos igual a 100, un tamaño de red de 3000m x 3000m, un tiempo de simulación de 170s, una velocidad media de los nodos de 1m/s con un umbral de variación nulo (por tanto, velocidad constante) y unos tiempos de pausa y variación de la pausa también nulos (es decir, los nodos están en constante movimiento). El resultado se almacena en la variable `n100a3000x3000t170v10p0`, que se le pasará al archivo Tcl para su posterior simulación.

Como se comentó anteriormente, se optó por la utilización del modelo *mobgen-ss*, relegando la utilización de la herramienta *setdest* que proporciona el ns-2. Para justificar su utilización, se realizaron una serie de pruebas que muestran la evolución en el tiempo de las dos implementaciones disponibles.



En primer lugar, se procedió a comprobar cómo estaban distribuidas realmente las posiciones de los nodos con el paso del tiempo. El resultado obtenido para la red seleccionada de 100 nodos, desplegada en un área de 3000m x 3000m se muestra en la Figura 4.5, donde los casos (a) y (b) corresponden a la herramienta *setdest*, la primera de ellas en el instante  $t = 0$ s y la segunda en el instante  $t = 30$ s. Los casos (c) y (d) han sido obtenidos con *mobgen-ss*, siendo (c) el resultado obtenido en  $t = 0$ s y (d) el obtenido para  $t = 30$ s. Se observa que en los casos (c) y (d) los nodos tienden a concentrarse en el centro de la superficie de la red, mientras que en el caso (a) los nodos están dispuestos sobre la superficie siguiendo una distribución uniforme.

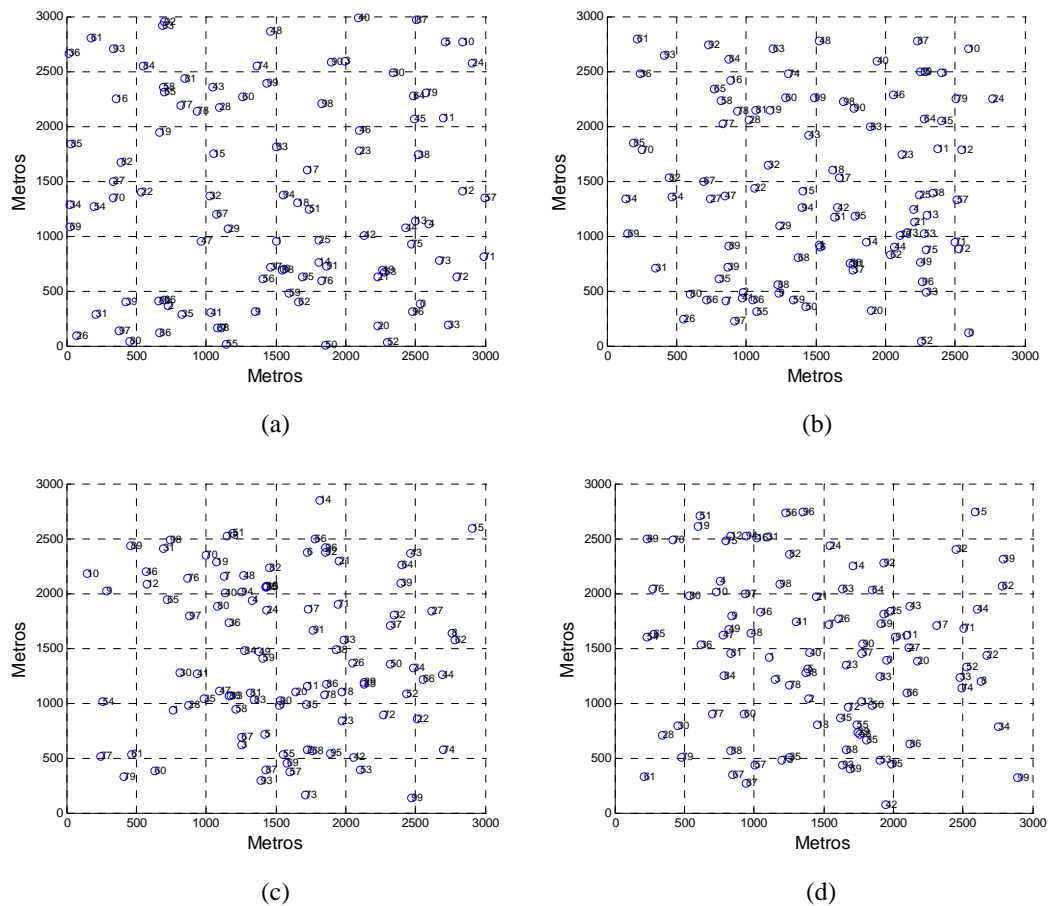


Figura 4.5. Posiciones de los nodos siguiendo el posicionamiento de *setdest* para: (a)  $t = 0$  y (b)  $t = 30$  s; y siguiendo el posicionamiento de *mobgen-ss* para (c)  $t = 0$  y (d)  $t = 30$  s.

Este resultado indica que las posiciones de los nodos generadas con la herramienta *setdest* no corresponden a una distribución estacionaria durante el tiempo de simulación.

Para ver este efecto de forma más clara, se procedió a analizar las distribuciones de las posiciones de los nodos (componente  $x$  y componente  $y$ ).

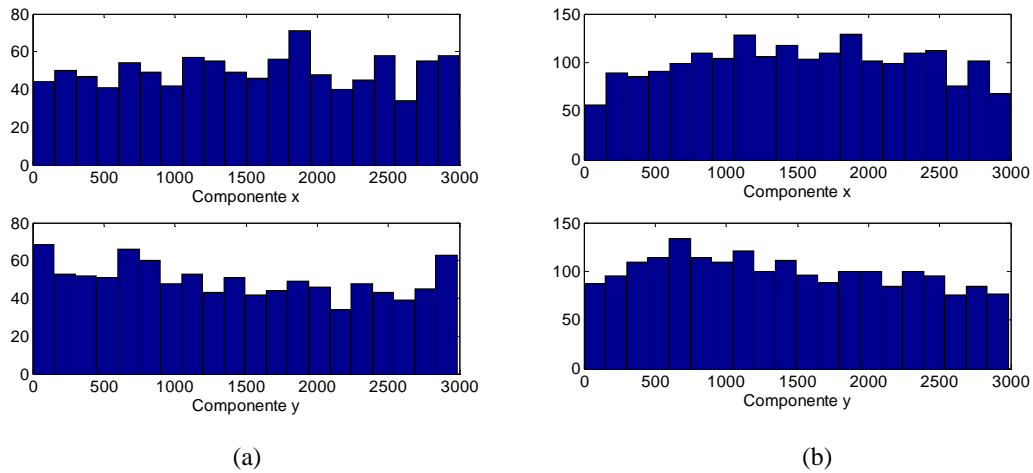


Figura 4.6. Histogramas de las componentes  $x$  (parte superior) e  $y$  (parte inferior) para dos instantes de tiempo: (a)  $t = 0$ , y (b)  $t = 30s$ , obtenidos con la herramienta *setdest*

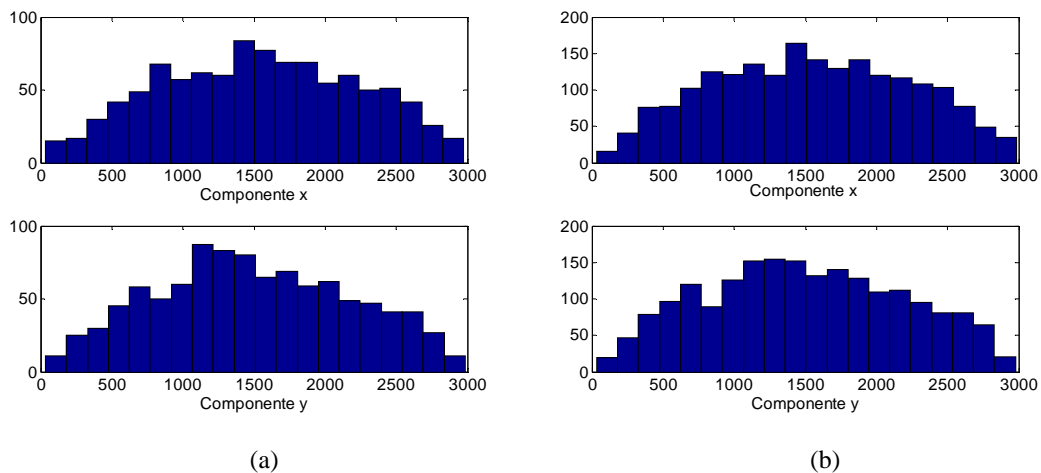


Figura 4.7. Histogramas de las componentes  $x$  (parte superior) e  $y$  (parte inferior) para dos instantes de tiempo: (a)  $t = 0$ , y (b)  $t = 30s$ , obtenidos con la herramienta *mobgen-ss*

Las Figuras 4.6 y 4.7 proporcionan una visión más clara sobre la distribución espacial de cada una de las dos implementaciones a lo largo del tiempo. Se aprecia cómo la implementación *setdest* (Figura 4.6), la proporcionada por la herramienta *ns-2*, carece de estabilidad. En el instante de tiempo  $t = 0$  (Figura 4.6 (a)), los nodos siguen una

distribución prácticamente uniforme tanto en la componente  $x$  como en la componente  $y$ . Sin embargo, transcurridos 30s de simulación (Figura 4.6 (b)), esta distribución ha cambiado, observándose ya una tendencia a la concentración de los nodos en torno a la zona central del área de simulación. Sin embargo, si nos fijamos en la Figura 4.7, representativa de *mobgen-ss*, en el instante  $t = 0$  (Figura 4.7 (a)), la mayoría de los nodos ya están en las posiciones centrales de la red, no cambiando prácticamente esta disposición a lo largo del tiempo, como se observa en la Figura 4.6 (b), en la que ya han transcurrido 30s de simulación.

Por tanto, las posiciones de los nodos obtenidas a partir de *setdest* no son representativas de la distribución espacial de los nodos en régimen permanente, mientras que la nueva implementación, *mobgen-ss*, muestra una clara estabilidad temporal (la distribución espacial de los nodos no varía a lo largo de todo el tiempo de simulación).

Para seguir analizando las variaciones de las posiciones de los nodos con respecto al tiempo, se calculó la media de la distancia de cada nodo a su vecino más próximo. Este resultado se muestra en la Figura 4.8, donde podemos observar que, al aplicar la herramienta *mobgen-ss*, este valor permanece más o menos estable, mientras que para el modelo *setdest* varía mucho entre el instante inicial y final de la simulación.

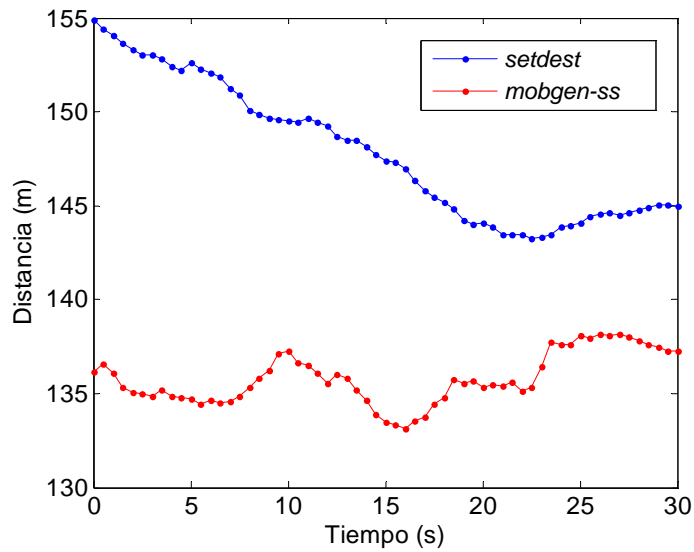


Figura 4.8. Evolución temporal de la distancia media de cada nodo a su vecino más próximo con la herramienta *setdest* (azul) y con la herramienta *mobgen-ss* (rojo)

Relacionado con la Figura 4.8, se optó por calcular como se distribuía el número medio de vecinos por nodo a lo largo de la simulación, obteniéndose la Figura 4.9.

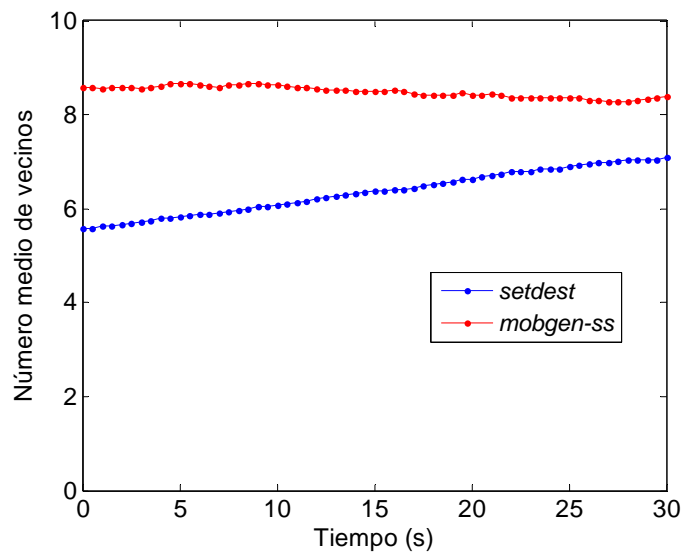


Figura 4.9. Evolución temporal del número medio de vecinos por nodo con la herramienta *setdest* (azul) y con la herramienta *mobgen-ss* (rojo)

Como era lógico pensar, si las distancias medias al nodo más próximo son mayores al inicio de la simulación, el número medio de vecinos por nodo también será menor al principio de la simulación. Este aspecto se observa claramente en la Figura 4.9: en la implementación *setdest*, el número medio de vecinos por nodo aumenta a lo largo del tiempo de simulación, hecho que no ocurre con la implementación *mobgen-ss*, donde el número de vecinos de cada nodo permanece prácticamente constante.

Tras este análisis, se puede concluir que la herramienta *mobgen-ss* genera distribuciones espaciales de los nodos que se mantienen estables en el tiempo. En cambio, si se desea utilizar la implementación *setdest*, será necesario aplicar alguna de las posibles soluciones propuestas en capítulos anteriores, que minimizan el problema del estado inicial transitorio.

### **4.2.3. Pruebas realizadas**

En este apartado se definirán las pruebas iniciales que han sido realizadas para verificar un correcto funcionamiento de todos los parámetros que intervendrán en el sistema. Estas pruebas tienen como objetivo adecuar el entorno de trabajo, buscando un correcto comportamiento de los parámetros que intervienen en el sistema. Para ello, se han realizado distintos experimentos en los que se han ido variando los parámetros que se exponen a continuación:

#### *Número de Nodos*

Para verificar el número de nodos soportable por nuestro entorno de trabajo, se realizaron diversas pruebas modificando el número de nodos para asegurar que la carga computacional que exigían las simulaciones era soportada por las máquinas que se utilizaron. A priori, como se desconocía por completo el tamaño adecuado del área de la red, se eligieron valores altos de este parámetro. Una vez fijados, se realizaron pruebas para comprobar la capacidad computacional de la máquina con la que se estaba

trabajando. Se empezó por una red de 500 nodos para ir disminuyendo ese número progresivamente.

| Nº de nodos | Área de trabajo (m) | Velocidad (m/s) | Transmisiones | Soportable por el entorno |
|-------------|---------------------|-----------------|---------------|---------------------------|
| 500         | 30000 x 30000       | 20              | 2000          | NO                        |
| 500         | 20000 x 20000       | 20              | 1000          | NO                        |
| 500         | 10000 x 10000       | 20              | 100           | NO                        |
| 100         | 5000 x 5000         | 20              | 100           | NO                        |
| 100         | 4000 x 4000         | 20              | 100           | NO                        |
| 100         | 3000 x 3000         | 20              | 100           | NO                        |
| 100         | 3000 x 3000         | 20              | 50            | NO                        |
| 100         | 3000 x 3000         | 20              | 20            | SÍ                        |

Tabla 4.2: Búsqueda del número de nodos.

En vista de los resultados, se optó por una red de 100 nodos, ya que las redes con mayor número de nodos no eran soportables por el entorno de trabajo. Como último apunte de la Tabla 4.2, se debe indicar que se utilizó una velocidad de 20 m/s por ser la velocidad máxima que se definió al principio de este proyecto y, por lo tanto, las simulaciones que más carga computacional tendrían que soportar.

#### *Área de la red*

En segundo lugar, se procedió a fijar los límites de la superficie por la que se van a mover los nodos pertenecientes a nuestra red. Volviendo a los resultados mostrados en la Tabla 4.2, se puede observar que para el número de nodos seleccionado, un área que nos permitiría realizar simulaciones sería un cuadrado de lado igual a 3000m. Por ello, se consideró como válido este tamaño de red.

Una vez conocidos tanto el número de nodos como el área de la red, y recordando que la potencia de transmisión se había fijado a 0.1W, se calculó el radio de cobertura de los nodos. Para ello, se simuló una red de dos nodos, se fijaron sus posiciones y se instó a uno de ellos al intercambio de información con el otro. Se fueron acercando hasta que la

transmisión tuvo éxito. El radio de cobertura de cada nodo con una potencia de 0.1 W es 431 m.

*Tiempo asociado por transmisión*

En el archivo Tcl que hará la función de planificador de eventos, además de las variables comentadas anteriormente, se debe asignar el tiempo asociado a cada transmisión, es decir, el tiempo en el que cada nodo, de forma única en toda la red, está transmitiendo información. En la Tabla 4.3 pueden verse los distintos tiempos que se han simulado.

| Tiempo asociado por canal (s) | Número de parejas (Transmisiones enviadas) | Transmisiones exitosas | Nº Colisiones |
|-------------------------------|--|------------------------|---------------|
| 5                             | 20   | 20                     | 0             |
| 3                             | 20   | 18                     | 1             |
| 1                             | 20   | 17                     | 2             |
| 5                             | 50   | 48                     | 0             |
| 1                             | 50   | 44                     | 4             |

Tabla 4.3. Búsqueda del tiempo asociado por transmisión.

Como puede observarse en la Tabla 4.3, el tiempo asociado a cada transmisión tiene una ligera incidencia en las transmisiones exitosas obtenidas en la red. Este hecho se debe a que aumenta el número de colisiones que se producen, ya que, a menor tiempo, más posibilidades existen de que el nodo origen no haya encontrado todavía al destino (recuérdese que el protocolo AODV utilizado es bajo demanda y añade una latencia importante en el primer paquete de información que se intercambian dos nodos).

Además, a partir de los datos de la Tabla 4.3, se puede concluir que, a pesar de aumentar el número de transmisiones solicitadas en más del doble (pasamos de transmitir 20 paquetes a transmitir 50), los paquetes perdidos no aumentan excesivamente, es decir, el tiempo asociado a cada transmisión influirá en el número de transmisiones exitosas de la red, pero su grado de influencia no dependerá de las transmisiones que se efectúen en la misma.

## Velocidad

Las pruebas asociadas a la velocidad tienen como objetivo verificar que el movimiento de los nodos realmente se realiza a la velocidad que se ha fijado en la herramienta *mobgen-ss*. Para realizar esta comprobación, se eligieron varios nodos de forma aleatoria, analizando a continuación los reportes ofrecidos por el fichero de trazas de resultado. Lo primero que hay que indicar en cuanto a los ficheros de trazas se refiere, es que devuelven dos formatos de información:

- El primero de ellos se corresponde con eventos producidos por la movilidad de los nodos, como son los instantes en los que un nodo llegó a su destino, el tiempo de pausa que ha permanecido sin moverse en el mismo, cuándo volvió a iniciar su movimiento...
- El segundo formato devuelve los resultados obtenidos en instantes de tiempo en los que el evento ha sido impuesto por el envío de mensajes (tanto de datos como de control).

Por ello, la información analizada en este caso ha sido la correspondiente a la parte de movilidad. De ella se obtuvieron las posiciones  $(x_i, y_i)$  m en el instante inicial del movimiento,  $t_i$ , y las posiciones finales  $(x_f, y_f)$  m a las que tienen que llegar los con una velocidad de  $v$  m/s en el instante de tiempo que denominaremos instante de tiempo final,  $t_f$ .

A partir de la velocidad  $v$  que cuantifica el movimiento de los nodos, se calculan los incrementos de velocidad, sus componentes en  $x$  y en  $y$ ,  $\Delta v_x$  e  $\Delta v_y$ , respectivamente, en la forma:

$$\Delta v_x = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} \quad (1)$$



$$\Delta v_y = \frac{y_f - y_i}{t_f - t_i} \quad (2)$$

Una vez conocidos estos incrementos de velocidad, se comprueba si las posiciones finales,  $(x_f', y_f')$  obtenidas a partir de las expresiones:

$$x_f' = x_i + \Delta v_x * (t_f - t_i) \quad (3)$$

$$y_f' = y_i + \Delta v_y * (t_f - t_i) \quad (4)$$

coinciden con las posiciones  $(x_f, y_f)$  obtenidas directamente de las trazas. Si es así, se puede afirmar que los nodos están siguiendo la velocidad impuesta por la herramienta *mobgen-ss*, comprobando el correcto funcionamiento de dicha herramienta.

### *Tiempos de Pausa*

Se debe recordar que el tiempo de pausa indica el tiempo que el nodo va a estar parado antes de proceder al siguiente movimiento. Aunque en este estudio no se muestran resultados finales con un tiempo de pausa distinto de cero, sí se realizaron una serie de pruebas iniciales para verificar su comportamiento. Las pruebas realizadas en este caso consisten en la generación de escenarios utilizando la herramienta *mobgen-ss* y asignando distintos tiempos de pausa asociado al movimiento de los nodos. Una vez realizadas las simulaciones, se procedió al análisis correspondiente al movimiento en los ficheros de trazas. Nuevamente se eligieron nodos al azar, se buscaron los instantes en los que comenzaban a estar en reposo y el siguiente instante en el que los nodos comenzaban a moverse nuevamente, obteniendo así su tiempo de pausa. Nuevamente, se verificó el correcto funcionamiento de la herramienta *mobgen-ss*.

Para terminar, en la Tabla 4.4 se muestra un breve resumen de algunas pruebas previas en las que se han ido combinando variaciones de distintos parámetros.

| Área Escenario (m) | Nº Transmisiones / Nº Recepciones | Velocidad (m/s) | H <sub>máx</sub> | Número medio de vecinos | Tiempo de simulación |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------|------------------|-------------------------|----------------------|
| 3000x3000          | 100 / 74                          | 5               | 12               | 8,3                     | 120                  |
| 2750x2750          | 100 / 91                          | 10              | 14               | 8,2                     | 120                  |
| 3500x3500          | 100/85                            | 5               | 10               | 6,3                     | 120                  |
| 3000/3000          | 100/78                            | 10              | 12               | 7,8                     | 120                  |
| 3500/3500          | 50/44                             | 5               | 15               | 6,1                     | 70                   |
| 3250/3250          | 20/16                             | 15              | 12               | 6,2                     | 40                   |
| 3000x3000          | 20/17                             | 10              | 11               | 8,6                     | 270                  |
| 3250x3250          | 20/16                             | 20              | 10               | 6,3                     | 40                   |
| 3250x3250          | 100/87                            | 10              | 11               | 6,4                     | 120                  |
| 3250x3250          | 100/86                            | 5               | 12               | 6,3                     | 120                  |

Tabla 4.4. Comprobación del tiempo de pausa.

Como los parámetros que intervienen en la simulación no son aislables, en la elección de cada uno de los valores han influido todos los demás. Por lo tanto, la generación de pruebas previas es una etapa costosa que se debe realizar con dedicación, puesto que los valores fijados influirán, como es lógico, en los resultados obtenidos y por ende en las conclusiones derivadas de los mismos.

## Capítulo 5. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante la simulación de redes ad hoc móviles que utilizan el protocolo de encaminamiento AODV.

En primer lugar, se debe reseñar que cada una de las pruebas realizadas ha tenido que dividirse en tareas más sencillas con el fin de reducir la capacidad computacional necesaria y no tener fallos de memoria. Esta división radica fundamentalmente en reducir el número de parejas (nodo origen y nodo destino) presentes en cada simulación, es decir, el número de transmisiones de la red. Para disponer de un número de transmisiones estadísticamente significativo, a partir del cual poder extraer conclusiones, se ha repetido sucesivamente cada una de las simulaciones hasta completar un elevado número de transmisiones entre nodo origen y nodo destino de la red. En nuestra red, formada por 100 nodos, hemos realizado 3500 transmisiones diferentes. Obsérvese que, para este escenario, son 9900 el número de transmisiones diferentes fuente-destino (obtenidas como  $N_{\text{nodos}} * (N_{\text{nodos}} - 1)$ ).

La Tabla 5.1 muestra los parámetros utilizados en las simulaciones de este trabajo. Véase que, tanto el tiempo de pausa como la velocidad de los nodos, permanecen constantes a lo largo de una misma simulación. En concreto, hemos considerado para todas las simulaciones un tiempo de pausa nulo, lo que equivale a decir que los nodos están en constante movimiento. En cuanto a los escenarios de movilidad, hemos considerado cuatro escenarios: movilidad nula (0m/s), movilidad lenta (5m/s), movilidad media (10m/s), movilidad rápida (15m/s) y movilidad muy rápida (20m/s).

En relación con la capacidad computacional y los requisitos de memoria de las máquinas utilizadas en la simulación, fue necesario reducir el número de posibles transmisiones a medida que aumentaba la velocidad de los nodos. Para que todas las simulaciones tuvieran el mismo número de transmisiones y poder así comparar el efecto de la movilidad de los nodos, se optó por realizar 10 transmisiones en cada simulación (véase la Tabla 5.1), valor correspondiente al máximo número de transmisiones realizables con el escenario de movilidad muy rápida (20m/s).

| Parámetros   | Valores                   |
|--|---------------------------|
| Red cuadrada. Dimensiones                              | 3000(m)x3000(m)           |
| Número de nodos  | 100                       |
| Tipo de antena   | Omnidireccional           |
| Protocolo de la capa MAC                               | 802.11                    |
| Número de paquetes por transmisión                     | 1                         |
| Tamaño del paquete                                     | 128 bytes                 |
| Parámetro TTL  | 30                        |
| Número de transmisiones en cada ejecución (simulación) | 10                        |
| Potencia de transmisión                                | 0.1(W)                    |
| Radio de cobertura (alcance)                           | 431(m)                    |
| Tiempo entre transmisiones consecutivas                | 1(s)                      |
| Distribución inicial de los nodos                      | Distribución estacionaria |
| Tiempo de pausa  | 0(s)                      |
| Velocidad constante                                    | 0, 5, 10 , 15, 20 (m/s)   |

Tabla 5.1. Parámetros de los escenarios de simulación

Para evaluar cualitativamente el efecto de la movilidad en la eficiencia de encaminamiento del protocolo AODV, en los siguientes apartados analizamos las distribuciones de distintos parámetros: distribución de la distancia Euclídea entre los nodos fuente y destino (en el Apartado 5.1); número medio de vecinos de cada nodo (Apartado 5.2); distancia a primeros y últimos vecinos (Apartado 5.3); número de saltos necesarios para alcanzar el destino (Apartado 5.4), y eficiencia de encaminamiento (Apartado 5.5).

### **5.1 Distancia entre fuente y destino**

Como primera variable a estudiar para evaluar la influencia de la movilidad, se optó por analizar la distancia Euclídea entre el nodo fuente y el nodo destino (variable R). Para ello, y puesto que los nodos de la red están en continuo movimiento (tiempo de pausa nulo), se determinó que:

- la posición espacial del nodo fuente es la que el nodo correspondiente tiene en el momento de iniciar la transmisión
- la posición espacial del nodo destino es la correspondiente al instante de recepción del paquete enviado por la fuente.

La Tabla 5.2. muestra el valor medio y la desviación típica de estas distancias.

|                       | v=0 m/s | v=5 m/s | v=10 m/s | v=15 m/s | v=20 m/s |
|-----------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Valor medio (m)       | 1303.7  | 1301.4  | 1297.9   | 1304.8   | 1312.1   |
| Desviación típica (m) | 547.8   | 548.3   | 557.9    | 554.2    | 552.2    |

Tabla 5.2. Valor medio y desviación típica de la distancia Euclídea entre fuente y destino en distintos escenarios de movilidad.

De los resultados de la Tabla 5.2 se deduce que los estadísticos de esta variable no están afectados por la movilidad, lo que parece tener sentido porque la disposición inicial de los nodos es tal que garantiza que la distribución espacial de los mismos sea estacionaria aún cuando se dote a los nodos de movilidad.

La Tabla 5.3 muestra los valores analíticos asociados a la media y a la desviación típica de las distribuciones *disk line picking* [*disklinepicking*] cuando el radio del disco corresponde a 1500 metros y *square line picking* [*squarelinepicking*] cuando el lado del cuadrado es de 3000 metros.

|                       | <i>Disk line picking</i> | <i>Square line picking</i> |
|-----------------------|--------------------------|----------------------------|
| Valor medio (m)       | 1358.1                   | 1564.2                     |
| Desviación típica (m) | 636.8                    | 743.8                      |

Tabla 5.3. Valor medio y desviación típica de las distribuciones *disk line picking* y *square line picking*.

Como cabía esperar por la disposición inicial de los nodos, la comparación de las Tablas 5.2 y 5.3 muestra que los valores experimentales guardan mayor relación con los estadísticos de la distribución *disk line picking*. A modo de ejemplo, en la Figura 5.1 se superponen la función densidad de probabilidad analítica *disk line picking* con el histograma normalizado (resultados experimentales) obtenido con un modelo de movilidad alto (20 m/s).

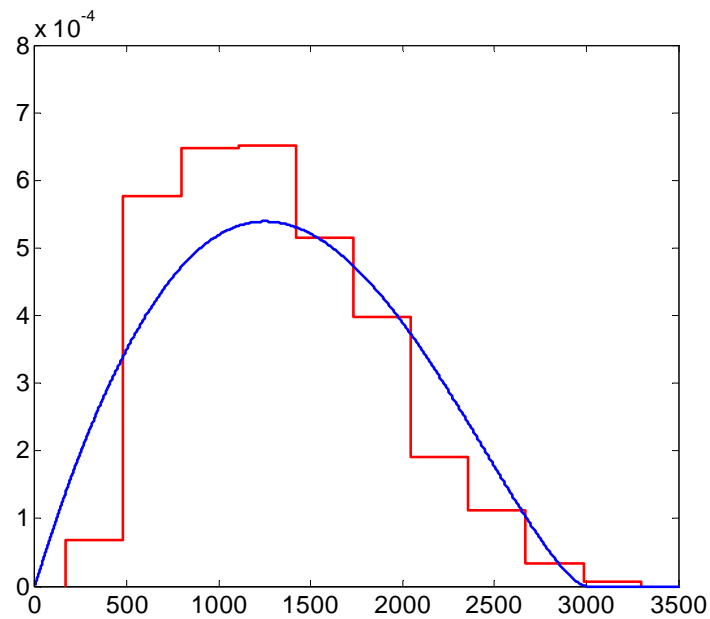
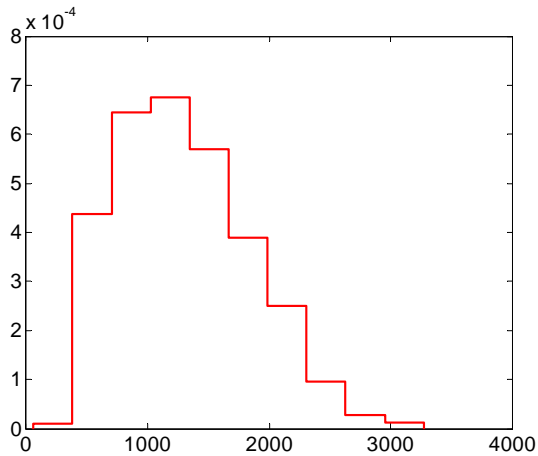


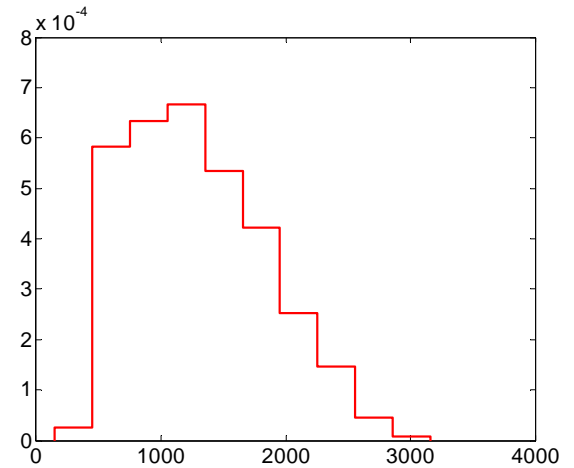
Figura 5.1. Función densidad de probabilidad del modelo teórico *disk line picking* (azul) frente al histograma normalizado de R en un escenario de alta movilidad con  $v=20\text{m/s}$  (rojo).

En la Figura 5.2 se representan los histogramas normalizados asociados a los valores experimentales de la variable R para los restantes escenarios: desde movilidad nula ( $v=0\text{ m/s}$ ) hasta movilidad media/alta ( $v=15\text{ m/s}$ ).

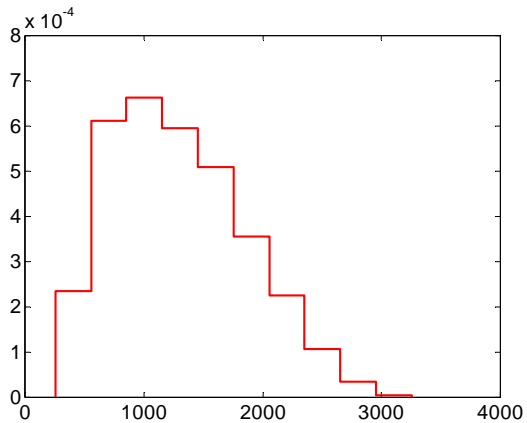
A partir de los estadísticos obtenidos y de los histogramas representados en las figuras anteriores se comprueba que, en un escenario de movilidad como el simulado, la distancia entre nodo origen y nodo destino no sufre variaciones significativas con la movilidad de los nodos. Gráficamente se observa que la moda de la distribución siempre se sitúa entre 750-1200 metros para un área de trabajo correspondiente a una superficie cuadrada de 3000 metros de lado.



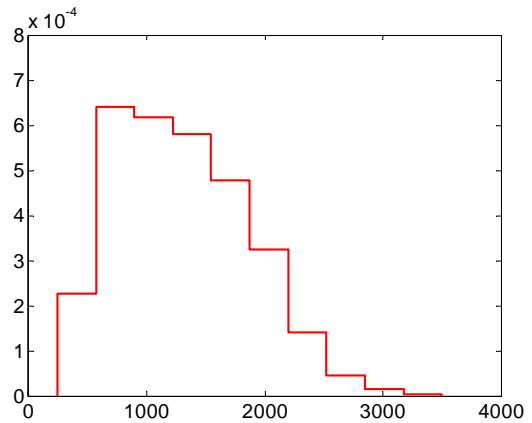
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.2. Histograma normalizado de la variable aleatoria  $R$  para escenarios con distinto grado de movilidad: (a) movilidad nula,  $v=0$  m/s; (b)  $v=5$  m/s; (c)  $v=10$  m/s; (d)  $v=15$  m/s

Del análisis de los resultados observamos también que en ningún caso se obtiene un valor de  $R$  próximo a la longitud asociada a la diagonal del espacio cuadrado en el que se mueven los nodos (4242.6 m). El máximo valor corresponde a 3499.1 metros, que también supera el máximo valor permitido para una distribución espacial de los nodos sobre un disco de radio 1500 metros. De ahí que, aunque la distribución experimental se ajusta mejor a los estadísticos del modelo *disk line picking*, el ajuste no sea muy preciso.

También resulta interesante observar que hay pocos valores experimentales con valor bajo de  $R$ . Este resultado puede deberse a que la densidad de la red no es alta (100

nodos en un área de 3000m x 3000m), por lo que resulta poco probable que la distancia entre dos nodos, elegidos al azar, sea pequeña, máxime cuando la posición espacial del nodo destino se determina una vez que el paquete enviado por la fuente ha llegado al destino. De hecho, el mínimo valor de R (59.7 metros) se obtiene para velocidad nula (nodos estáticos).



## 5.2 Número de nodos vecinos

En este apartado estudiamos el número de nodos a los que cualquier nodo puede enviar información directamente (sin necesitar nodos intermedios) a medida que avanza el tiempo de simulación; esto es, estudiamos el número de nodos dentro del rango de cobertura (nodos visibles). Al igual que sucede con la distribución asociada a la distancia entre fuente y destino, es esperable que la distribución asociada al número medio de vecinos por nodo sea estacionaria en el tiempo, ya que también lo es la distribución de la posición de los nodos.

Para verificar esta hipótesis hemos muestreado la disposición espacial de los nodos cada  $\Delta t = 1$  segundo, hasta completar un total de 980 configuraciones espaciales, a partir de las cuales hemos obtenido los siguientes parámetros:

- número medio de vecinos por nodo
- distancia media de cada nodo a su vecino más próximo (dentro del correspondiente radio de cobertura)
- distancia media de cada nodo al último nodo dentro de su rango de cobertura

Como ejemplo, la Figura 5.3 muestra la evolución del número medio de nodos vecinos con el tiempo de simulación para uno de los escenarios considerados ( $v=15$  m/s). El resto de escenarios, tanto con mayor como con menor grado de movilidad (exceptuando el caso de movilidad nula), presentan una evolución temporal similar, con un número medio de 8 vecinos por nodo. Cuando los nodos están estáticos, el número medio de vecinos es ligeramente superior (8.8).

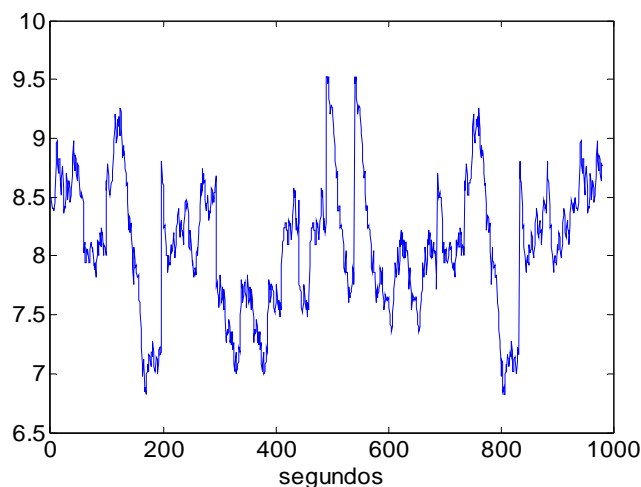
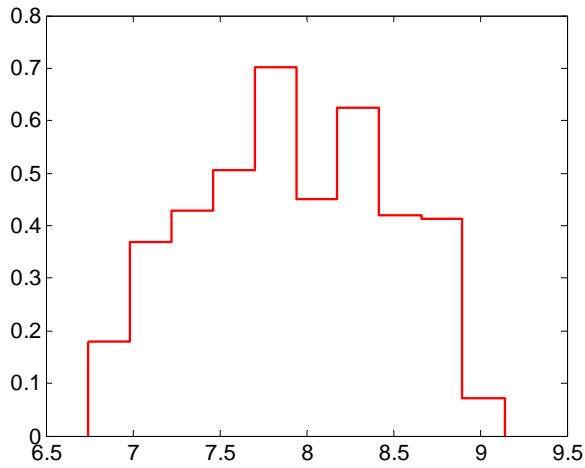
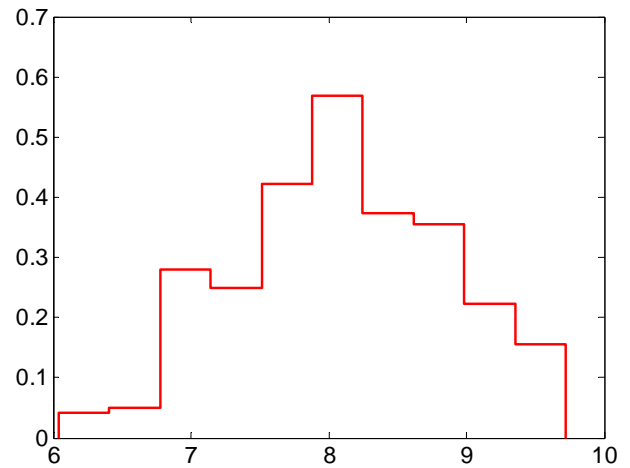


Figura 5.3. Evolución temporal del número medio de nodos vecinos para un escenario con movilidad media/alta ( $v= 15$  m/s).

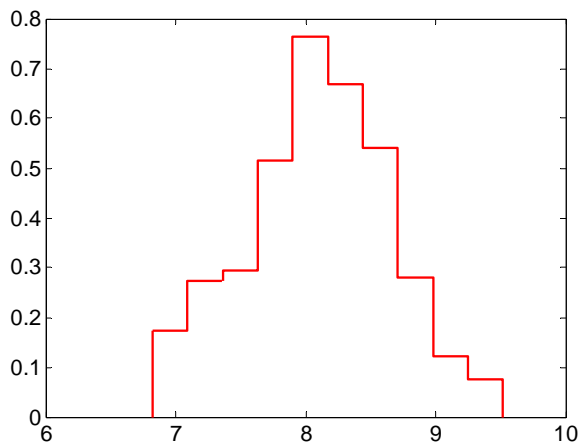
Los histogramas normalizados que se muestran en la Figura 5.4 permiten verificar la hipótesis de estacionariedad de la distribución espacial de los nodos. Obsérvese la escasa variación existente entre las distribuciones asociadas a los cuatro grados de movilidad.



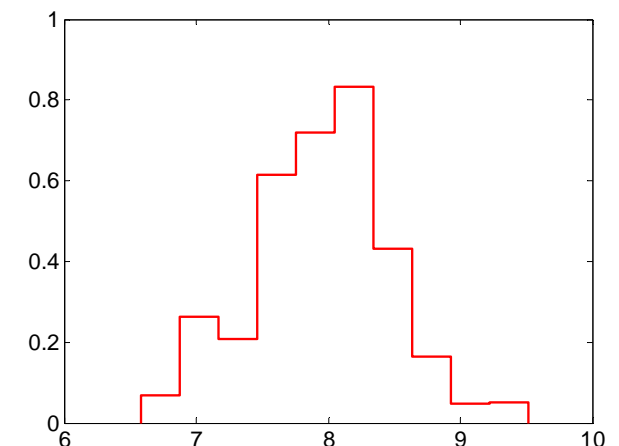
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.4. Histograma normalizado del número medio de nodos vecinos para escenarios con distinto grado de movilidad: (a)  $v=5$  m/s; (b)  $v=10$  m/s; (c)  $v=15$  m/s; (d)  $v=20$  m/s.

### 5.3 Distancia a primeros y últimos vecinos

Para completar el análisis del apartado anterior y tener una visión global de la evolución de la topología de la red con el tiempo, estudiamos ahora la distancia entre cada nodo y su primer vecino ( $d_{1NN}$ ), así como la distancia entre ese mismo nodo y su último vecino dentro del rango de cobertura ( $d_{kNN}$ ). Puesto que el radio de cobertura es de 431 metros, todos los valores asociados a las variables  $d_{1NN}$  y  $d_{kNN}$  estarán siempre por debajo.

De modo similar al Apartado 5.1, en el que también estudiamos valores de distancia, comenzamos representando en la Figura 5.5 la evolución temporal de estas distancias en los cuatro escenarios con movilidad. Obsérvese que la evolución temporal no muestra ninguna tendencia, lo que corrobora que la disposición espacial de los nodos sea estacionaria. Otra observación interesante es que, a medida que aumenta la velocidad, los vecinos de cada nodo se mueven más rápidamente y los valores medios de las distancias obtenidos con el mismo período de muestreo anterior (1 segundo), también presentan mayor variabilidad a más corto plazo, lo que se traduce en que las rutas tienen menor tiempo de validez.

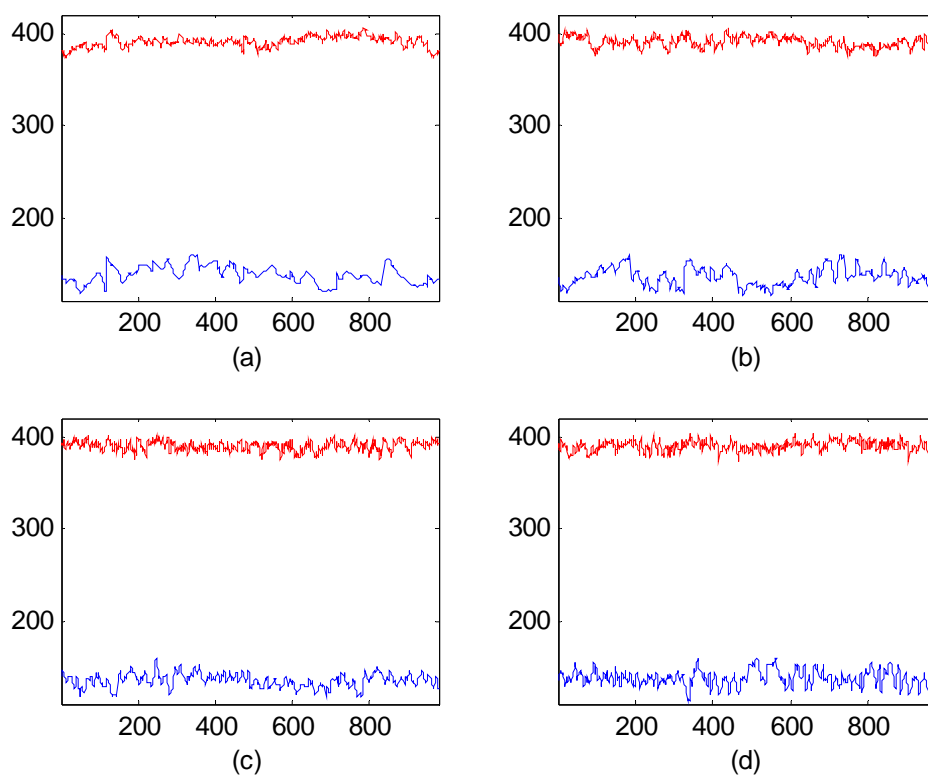


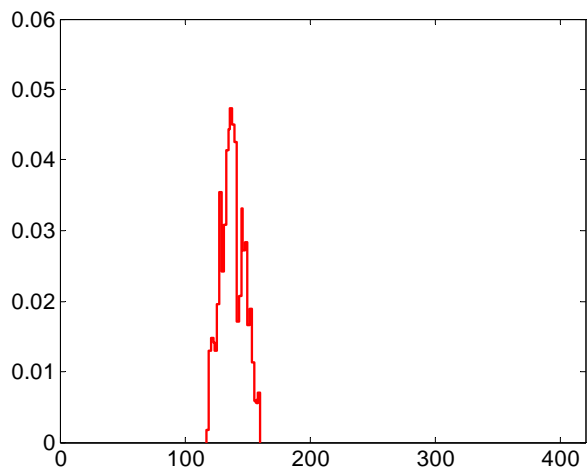
Figura 5.5. Evolución temporal de  $d_{1NN}$  (azul) y  $d_{kNN}$  (rojo) para escenarios con distinto grado de movilidad: (a)  $v=5\text{m/s}$ , (b)  $v=10\text{m/s}$ , (c)  $v=15\text{m/s}$ , (d)  $v=20\text{m/s}$ .

Para caracterizar las distribuciones de cada una de estas distancias, en la Tabla 5.4 se presentan los estadísticos correspondientes a la media y a la desviación típica.

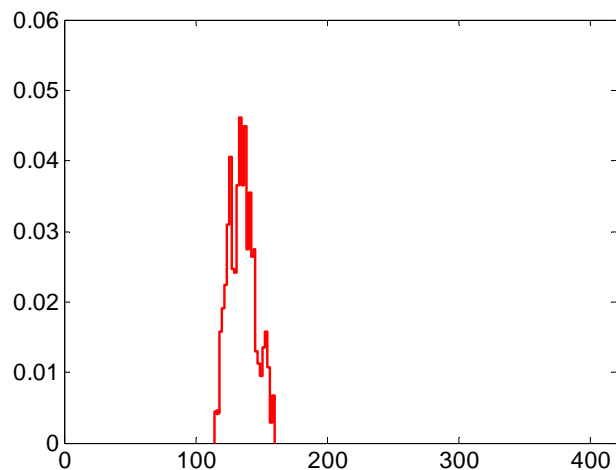
|           | v=5 m/s          | v=10 m/s         | v=15 m/s         | v=20 m/s         |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $d_{1NN}$ | 138.01<br>(9.34) | 135.55<br>(9.84) | 135.56<br>(7.29) | 137.99<br>(8.53) |
| $d_{kNN}$ | 390.56<br>(5.96) | 390.56<br>(5.79) | 389.59<br>(5.17) | 389.65<br>(5.27) |

Tabla 5.4. Valor medio y desviación típica (en metros) de la distancia Euclídea entre cada nodo y su primer y último vecino,  $d_{1NN}$  y  $d_{kNN}$  respectivamente, para distintos escenarios de movilidad.

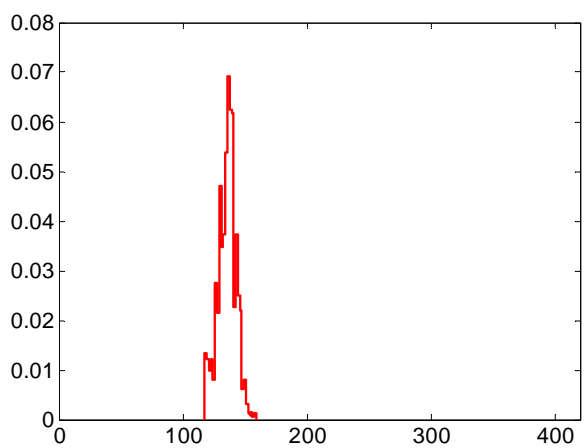
Los resultados de la Tabla 5.4 indican que el valor medio de la distancia al primer y último vecino no se ve afectado por la movilidad de los nodos cuando la disposición espacial es estacionaria. Este hecho se puede comprobar también a partir de los histogramas normalizados que se muestran en las Figuras 5.6 y 5.7 para las variables  $d_{1NN}$  y  $d_{kNN}$ , respectivamente.



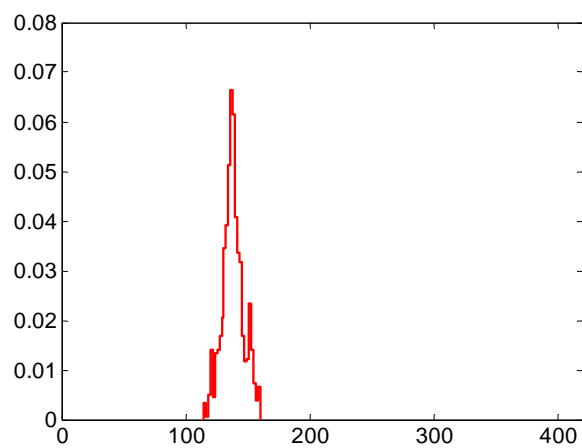
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.6. Histograma normalizado de la variable aleatoria  $d_{1NN}$  para escenarios con distinto grado de movilidad: (a)  $v=5$  m/s; (b)  $v=10$  m/s; (c)  $v=15$  m/s; (d)  $v=20$  m/s

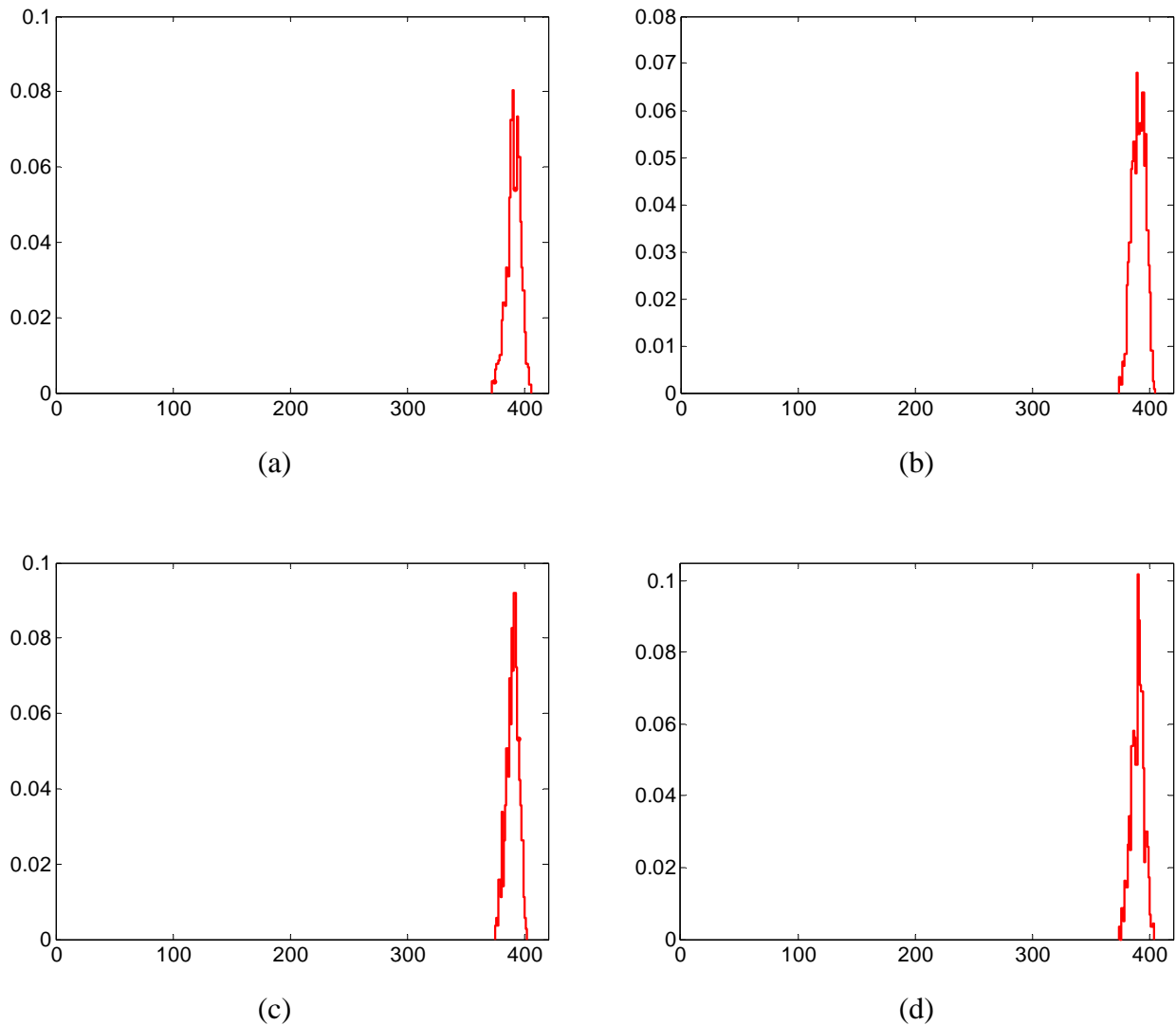


Figura 5.7. Histograma normalizado de la variable aleatoria  $d_{kNN}$  para escenarios con distinto grado de movilidad: (a)  $v=5$  m/s; (b)  $v=10$  m/s; (c)  $v=15$  m/s; (d)  $v=20$  m/s

Las distribuciones de las variables  $d_{INN}$  y  $d_{kNN}$ , junto con el número de vecinos por nodo, dan idea de lo densa que resulta la red. Como es lógico, la densidad de nodos influirá en la eficiencia de encaminamiento: a mayor número de vecinos con los que poder comunicarse, mayor será el grado de conectividad de la red y la comunicación de ese nodo con el resto (no sólo con sus vecinos), tenderá a ser más exitosa. Los resultados obtenidos apuntan a que la configuración de la red es tal que posibilitará que la información transcurra entre cualquier par de nodos.

Merece la pena apuntar aquí que, tanto el número medio de nodos vecinos como las distancias medias a primeros y últimos vecinos, únicamente dependen del modelo de

movilidad utilizado y no del protocolo de encaminamiento. En el siguiente apartado estudiamos la distribución del número de saltos entre los nodos fuente y destino.

### 5.4 Número de saltos

Consideremos una red con topología regular en la que la distancia de un nodo a su vecino más próximo es constante ( $d_{INN} = a$ ) y el radio de cobertura de cada nodo sólo alcanza a primeros vecinos. En este escenario, la longitud  $L$  del camino que un paquete recorre desde cualquier nodo fuente a cualquier nodo destino es proporcional al número de saltos realizados, que en adelante denotamos como  $H$ , esto es,  $L = aH$ .

Para este tipo de escenarios (regulares o cuasi-regulares y con alcance a primeros vecinos), de [Vinagre, 2007], [Kurmanava, 2009] y [Gil, 2009] se deduce que, con independencia del protocolo de encaminamiento utilizado, a medida que aumenta el número de saltos disminuye la eficiencia de encaminamiento. Recuérdese que en el Capítulo 1 se propuso como medida de la eficiencia de encaminamiento de una ruta la relación entre el camino directo entre fuente y destino (distancia Euclídea  $R$ ) y la longitud de la ruta que establece el protocolo (parámetro  $L$ ), i.e., el valor de  $R/L$ . Puesto que en una red regular con alcance a primeros vecinos se verifica que  $L=aH$ , es lógico pensar que, para una misma distancia  $R$ , la eficiencia de encaminamiento disminuya a medida que aumenta el número de saltos, ya que la ruta establecida se aleja cada vez más de la línea recta que separa los dos extremos de la comunicación. La Figura 5.8 ilustra este concepto.

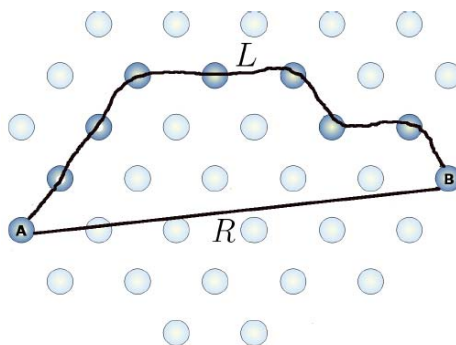


Figura 5.8. Ejemplo de una ruta (de longitud  $L$ ) poco eficiente para comunicar los nodos A y B, separados una distancia  $R$ .

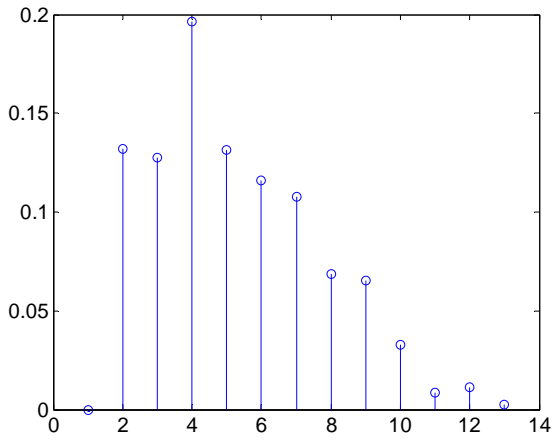
Teniendo en cuenta lo anterior, y como paso previo a estudiar la eficiencia de encaminamiento en un escenario con movilidad, estudiamos primero experimentalmente la distribución del número de saltos cuando el protocolo de encaminamiento utilizado es AODV y el resto de parámetros de la simulación es el que se indica en la Tabla 5.1.

La Figura 5.9 representa la distribución de probabilidad de la variable H para la red con topología estática ( $v=0\text{m/s}$ ) y en los cuatro escenarios con movilidad. En estas gráficas no hemos representado el valor de  $H=1$  porque no es relevante para analizar la eficiencia de encaminamiento, ya que en este caso el valor de  $R/L$  siempre sería la unidad.

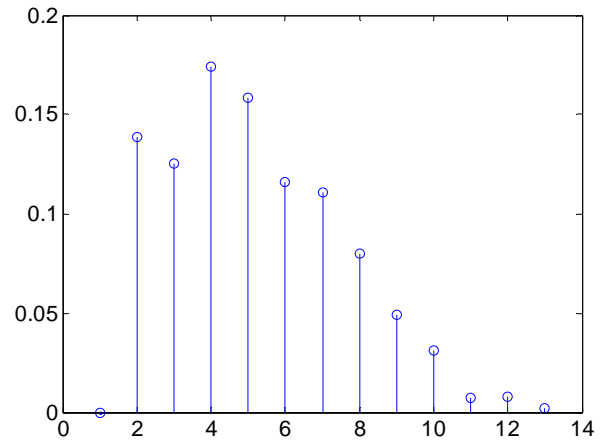
Comparando las gráficas de la Figura 5.9, podemos afirmar que la moda del número de saltos tiende a aumentar cuando aumenta la velocidad de los nodos. Este comportamiento se justifica porque, como hemos comprobado en los apartados anteriores, aunque la distribución de los nodos sea estacionaria, la variabilidad temporal de la topología de la red aumenta con la velocidad de los nodos, lo que se traduce en un menor período de validez de las rutas establecidas y por ende en un aumento del número de saltos. Probablemente, un incremento del número de transmisiones haría que este efecto fuera más patente en las distribuciones de probabilidad.

Para completar este apartado hemos obtenido la tasa de llegada de paquetes (*throughput*) para cada uno de los escenarios de simulación y considerando un total de 4000 transmisiones (aproximadamente). Los resultados, que se muestran en la Tabla 5.5, indican que el *throughput* disminuye a medida que aumenta el grado de movilidad de los nodos, aún cuando el número medio de nodos dentro del radio de cobertura sea el mismo (aproximadamente). De hecho, la tasa de paquetes que no llega al destino será mayor que la que se muestra en la Tabla 5.5 a medida que aumente el tiempo de simulación, ya que habrá más las colisiones de paquetes y las rutas establecidas también tendrán menor periodo de validez.

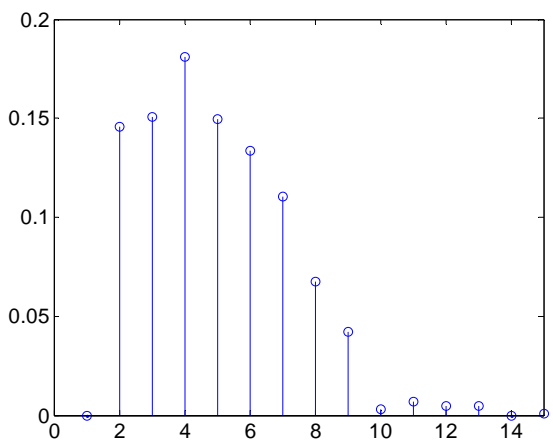




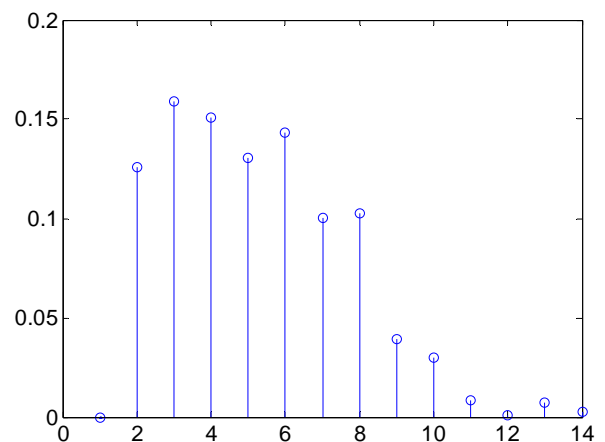
(a)



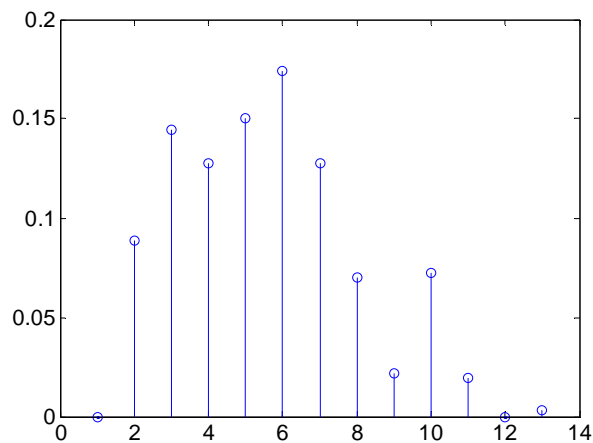
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.9. Distribución de probabilidad de la variable aleatoria H correspondiente a la aplicación del protocolo AODV en distintos escenarios:

(a)  $v=0$  m/s; (b)  $v=5$  m/s; (c)  $v=10$  m/s; (d)  $v=15$  m/s; (e)  $v=20$  m/s

| Velocidad (m/s) | Throughput |
|-----------------|------------|
| 0               | 92%        |
| 5               | 87%        |
| 10              | 84%        |
| 15              | 81%        |
| 20              | 79%        |

Tabla 5.5. Evolución del *throughput* con la velocidad de los nodos para un tiempo de simulación de 10 segundos.

### 5.5 Eficiencia de encaminamiento.

Para estudiar la influencia de la movilidad de los nodos en la eficiencia de encaminamiento hemos seguido el procedimiento propuesto en [Vinagre, 2007], donde se analizan las distribuciones del cociente  $R/L$  en función del número de saltos  $H$ . Puesto que la distancia media a primeros vecinos es más o menos la misma para todos los escenarios bajo estudio, parece plausible estudiar la distribución de la variable  $R/L$  en función del número de saltos. Recuérdese que altos valores de la variable bajo estudio indican alta eficiencia de encaminamiento, es decir, el protocolo ha dirigido los paquetes por una ruta óptima ( $R/L=1$ ) o (cuasi)-óptima ( $R/L \approx 1$ ).

A modo de ejemplo, en la Figura 5.9 se muestra el histograma normalizado de  $R/L$  considerando simultáneamente todos los valores de  $R/L$  en los dos escenarios con mayor diferencia en el grado de movilidad,  $v=0\text{m/s}$  (topología estática) y  $v=20\text{m/s}$ .

Obsérvese que las distribuciones son bastante similares y, por tanto, no se puede extraer ninguna conclusión sobre la influencia de la movilidad en la eficiencia de encaminamiento. Por esta razón, en lo que resta de este capítulo analizaremos las distribuciones condicionadas al número de saltos  $H$ .

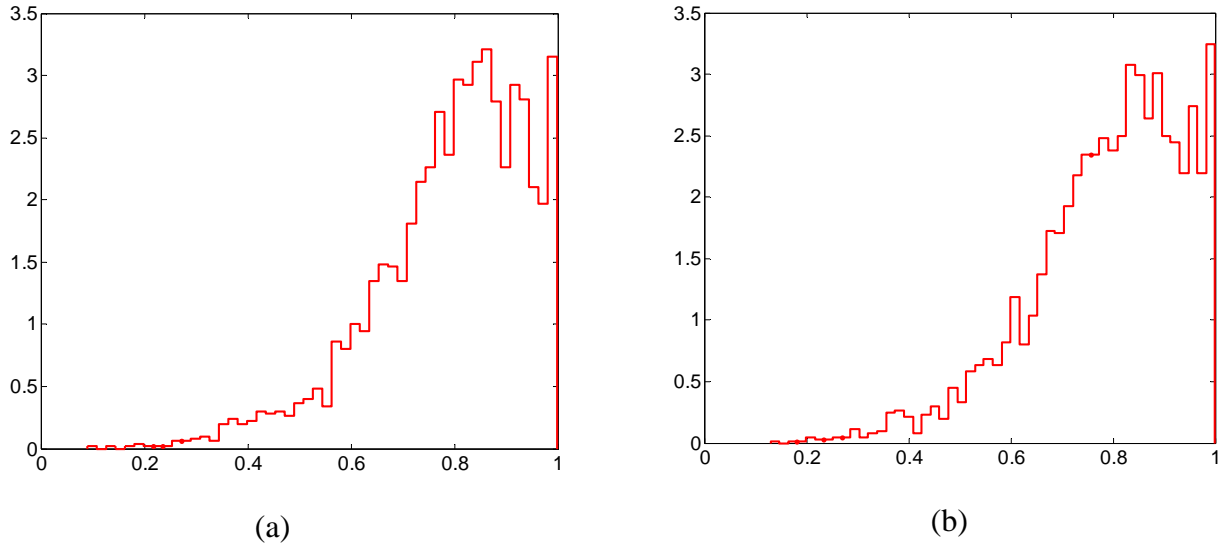


Figura 5.9. Histogramas normalizados para  $R/L$  con: (a) topología de red estática, y (b) velocidad de los nodos de 20 m/s.

La Tabla 5.6 muestra el valor medio y la desviación típica de la variable  $R/L$  para seis valores de  $H$ , desde  $H = 2$  hasta  $H = 7$ , correspondientes a los saltos con mayor representatividad estadística (véase la Figura 5.9). Los resultados indican que la eficiencia de encaminamiento es bastante alta (valores en torno a 0.8) y muy similar para todos los escenarios, con independencia del grado de movilidad de los nodos.

|     | v = 0 m/s   | v = 5 m/s   | v = 10 m/s  | v = 15 m/s  | v = 20 m/s  |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| H=2 | 0.80 (0.14) | 0.80 (0.14) | 0.80 (0.14) | 0.79 (0.16) | 0.80 (0.15) |
| H=3 | 0.79 (0.15) | 0.80 (0.13) | 0.79 (0.14) | 0.80 (0.14) | 0.78 (0.15) |
| H=4 | 0.80 (0.14) | 0.78 (0.14) | 0.79 (0.15) | 0.79 (0.15) | 0.80 (0.15) |
| H=5 | 0.78 (0.14) | 0.78 (0.15) | 0.77 (0.14) | 0.78 (0.14) | 0.79 (0.14) |
| H=6 | 0.79 (0.14) | 0.79 (0.15) | 0.78 (0.15) | 0.78 (0.15) | 0.78 (0.15) |
| H=7 | 0.79 (0.15) | 0.79 (0.15) | 0.76 (0.15) | 0.79 (0.14) | 0.78 (0.15) |

Tabla 5.6. Valor medio y desviación típica (entre paréntesis) de la variable aleatoria

$R/L$  en función del número de saltos y para distinto grado de movilidad.

Para tener mejor conocimiento de la caracterización de la variable aleatoria  $R/L$ , optamos por representar los correspondientes histogramas normalizados. Como hemos comentado, el caso de  $H=1$  no proporciona información sobre la eficiencia de encaminamiento: si el destino se alcanza en un único salto, los valores de  $R$  y  $L$  coinciden y, por tanto, el encaminamiento es óptimo. Esta es la razón por la que, para nuestro análisis, descartamos los resultados con  $H=1$ . Para el caso de  $H > 7$ , los resultados son similares a los que se muestran en las siguientes gráficas.

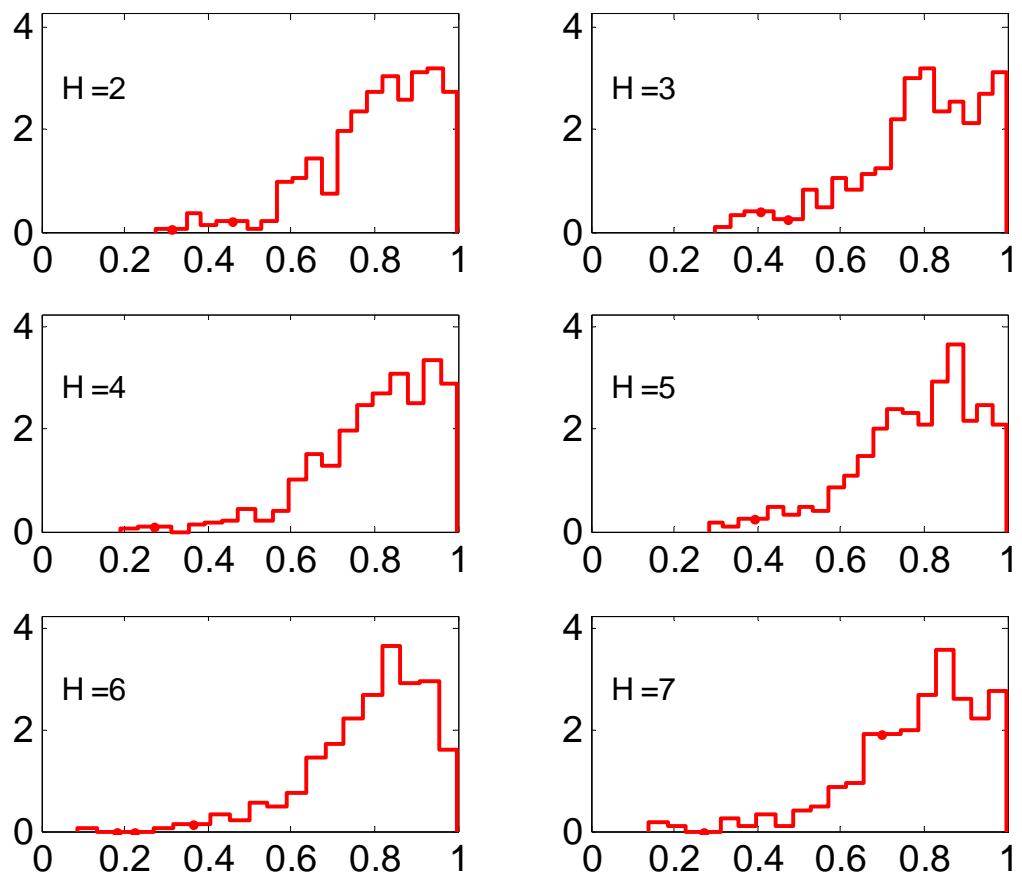


Figura 5.10. Histogramas normalizados para  $R/L$  fijado el número de saltos H y con topología de red estática ( $v=0$  m/s)

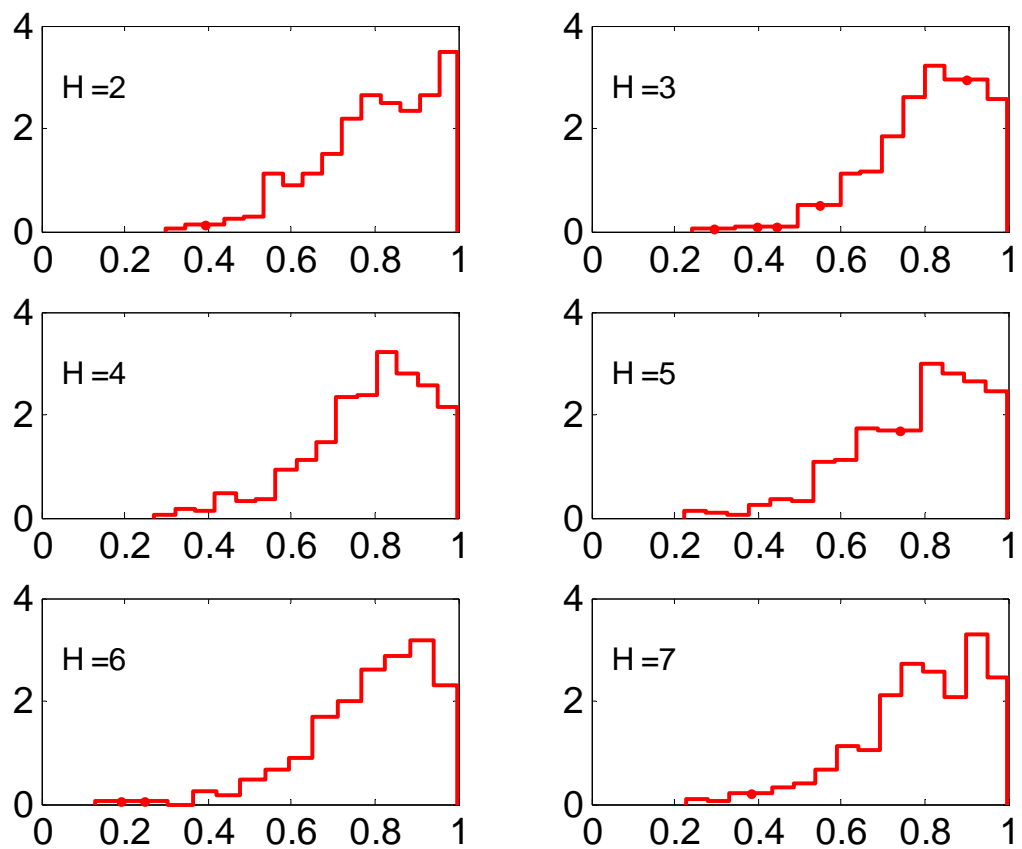


Figura 5.11. Histogramas normalizados para  $R/L$  fijado el número de saltos  $H$  cuando la velocidad de los nodos es de 5 m/s.

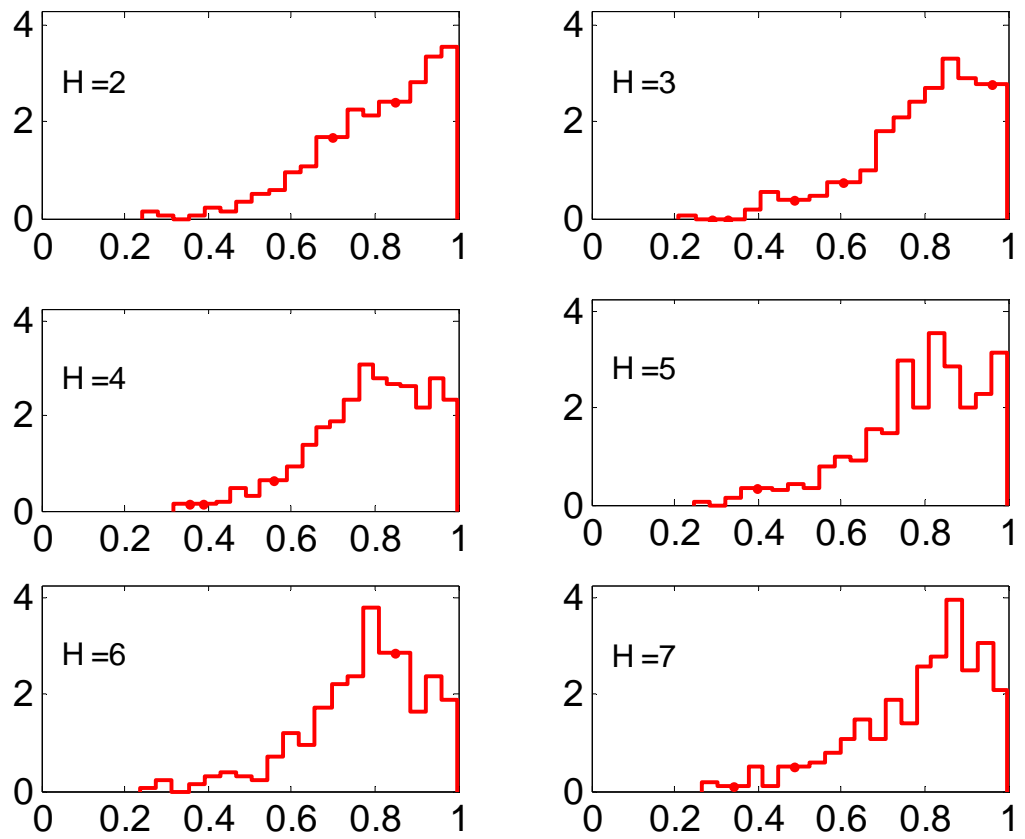


Figura 5.12. Histogramas normalizados para  $R/L$  fijado el número de saltos  $H$  cuando la velocidad de los nodos es de 10 m/s.

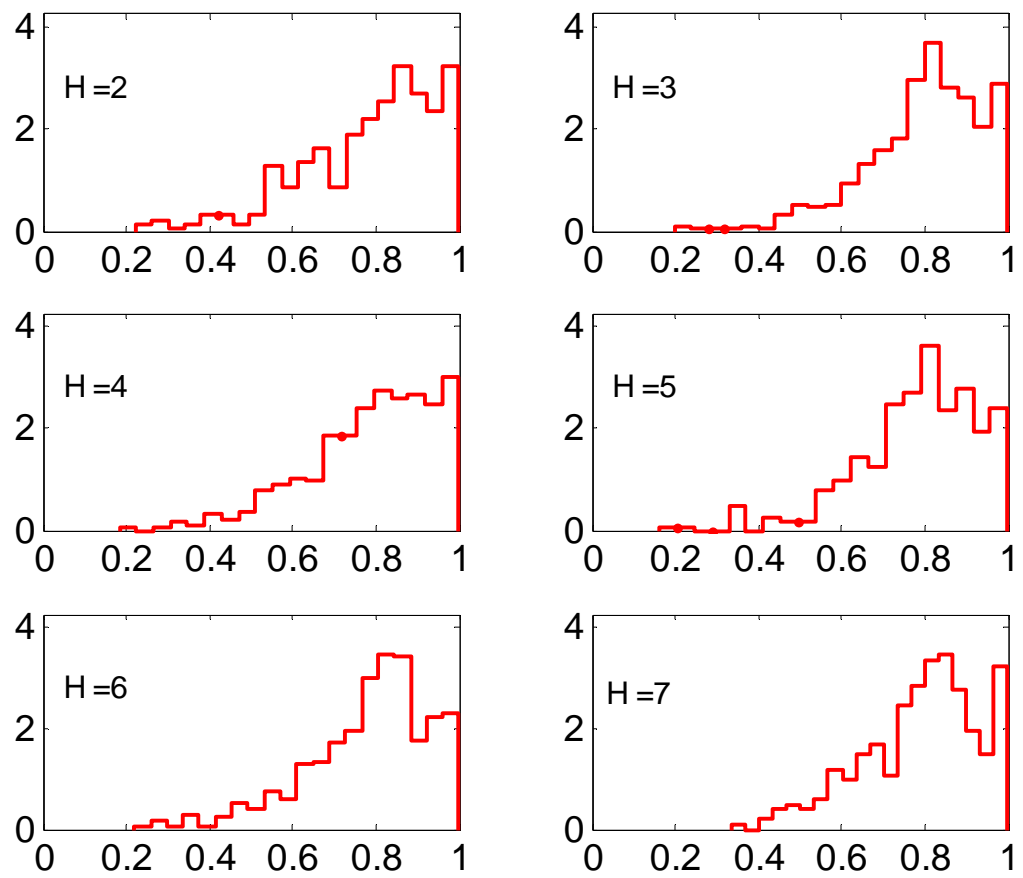


Figura 5.13. Histogramas normalizados para  $R/L$  fijado el número de saltos  $H$  cuando la velocidad de los nodos es de 15 m/s.



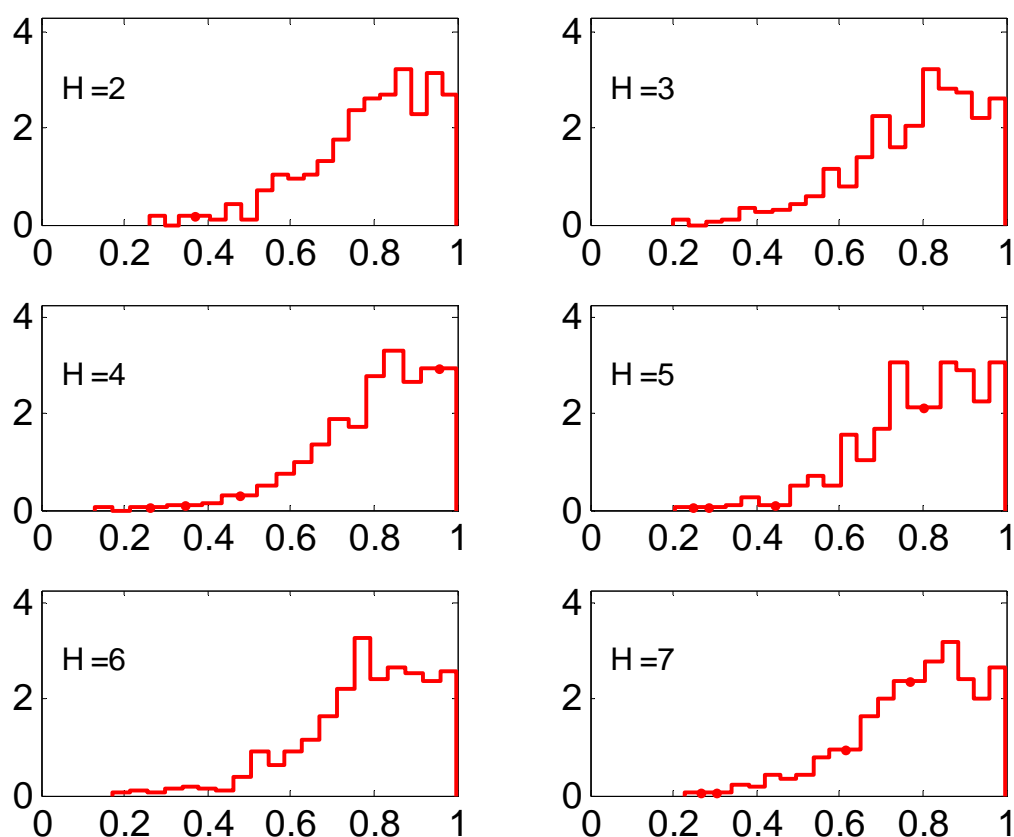


Figura 5.14. Histogramas normalizados para  $R/L$  fijado el número de saltos  $H$  cuando la velocidad de los nodos es de 20 m/s.

De la representación de los histogramas podemos observar que, si la velocidad de los nodos es fija, la moda del histograma tiende a desplazarse hacia la izquierda a medida que aumenta el número de saltos  $H$ , lo que permite concluir que la eficiencia de encaminamiento disminuye al aumentar el número de saltos. Sin embargo, las conclusiones sobre la evolución de la eficiencia de encaminamiento cuando la velocidad de los nodos aumenta no parecen tan concluyentes. De hecho, a la vista de los resultados, cabría pensar que la movilidad apenas tiene efecto en la eficiencia de encaminamiento, lo que intuitivamente no parece muy lógico.

Para intentar extraer una conclusión fiable sobre la influencia de la movilidad de los nodos en la eficiencia de encaminamiento, optamos por trabajar únicamente con un patrón de movilidad y simular escenarios con el mayor volumen de tráfico posible. Para ello, elegimos el patrón de movilidad que tenía menos requisitos de memoria, esto es, el

correspondiente a  $v = 5\text{m/s}$ , y utilizamos otra máquina con más memoria. Esta elección permitió aumentar casi en un orden de magnitud el número de transmisiones en cada simulación, pasando de diez a ochenta transmisiones. Comprobamos que, efectivamente, el número de transmisiones por simulación influye en el *throughput*, que ahora pasa a ser del 88.2% (frente al 87% con diez transmisiones por simulación).

Si ahora estudiamos la distribución de la variable  $R/L$ , obtenemos los histogramas que se muestran en la Figura 5.15.

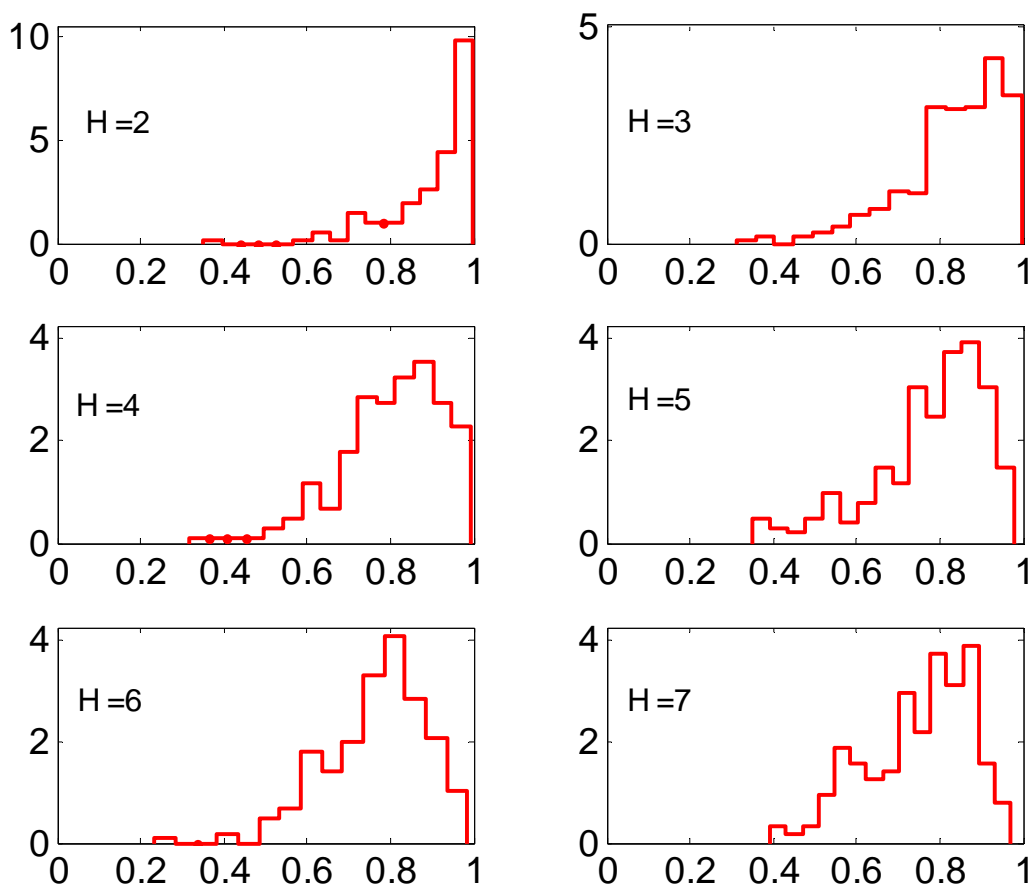


Figura 5.15. Histogramas normalizados para  $R/L$  fijado el número de saltos  $H$ , con 80 transmisiones por simulación y los nodos se mueven a 5 m/s.

Se aprecian diferencias claras con respecto a los resultados de la Figura 5.11, correspondientes a la misma velocidad pero con menor tiempo de simulación. En concreto, si comparamos las distribuciones correspondientes al mismo número de saltos, en concreto las correspondientes a  $H = 5$ ,  $H = 6$  y  $H = 7$ , comprobamos que ahora

la moda de la distribución se desplaza hacia la izquierda y no hay valores de  $R/L$  próximos a la unidad, lo que indica una reducción de la eficiencia de encaminamiento. Creemos que la razón para esta pérdida de eficiencia está en el aumento del número de colisiones cuando todos los parámetros del experimento se mantienen y se considera un tiempo de simulación mayor.

Este resultado nos permite afirmar que, en redes ad hoc móviles, la eficiencia de encaminamiento dependerá del tiempo durante el cual se estén enviando paquetes (para una tasa de transmisión fija). Por tanto, a la hora de analizar los resultados y extraer conclusiones válidas, es indispensable considerar todos los parámetros que intervienen en la simulación y que se han indicado a lo largo del documento. Como se intuye, es posible que para cualquier otra configuración los resultados y las conclusiones derivadas sean ligeramente diferentes.

## Capítulo 6. Conclusiones y líneas de trabajo futuras

En primer lugar, conviene indicar que las conclusiones derivadas de este trabajo son propias de la configuración de red y de los parámetros de simulación considerados. Como hemos mostrado en el Apartado 5.5, las conclusiones pueden ser diferentes cuando los parámetros de simulación cambian, por lo que no es conveniente extrapolar directamente (y sin realizar ningún análisis previo) los resultados de este trabajo a todas las redes ad hoc inalámbricas móviles que utilizan el protocolo de encaminamiento AODV. Así pues, teniendo en cuenta los experimentos realizados en este trabajo, y considerando que el patrón de movilidad de los nodos es tal que la disposición espacial de los mismos está en régimen estacionario, podemos concluir que:

- la variabilidad temporal de la topología de la red aumenta con la velocidad de los nodos, lo que se traduce en un menor período de validez de las rutas establecidas por el protocolo y, por tanto, en una reducción del *throughput*.
- el grado de movilidad de los nodos (su velocidad) apenas afecta a la distancia media de cada nodo a su primer y último vecino dentro del radio de cobertura, así como al número medio de vecinos. Este resultado tiene su justificación en la estacionariedad de la distribución espacial de los nodos.
- para un número de transmisiones reducido, la velocidad de los nodos apenas influye en la eficiencia de encaminamiento, siendo ésta bastante alta (con valores medios de la distribución  $R/L$  en torno a 0.8, donde la unidad corresponde a direccionamiento óptimo).
- los estudios sobre la eficiencia de encaminamiento deben realizarse a través de simulaciones con un número alto de transmisiones, asociado a mayor tiempo de simulación. Como hemos comprobado, los resultados de la eficiencia de encaminamiento son sustancialmente diferentes cuando, para una misma tasa de transmisión (número de bits por unidad de tiempo), aumenta el número de transmisiones en la red.

En cuanto a las líneas de trabajo futuras, consideramos interesantes las siguientes:

- modificar la potencia de transmisión de cada nodo para variar el número medio de nodos vecinos y estudiar la influencia de este parámetro en la eficiencia de encaminamiento.
- utilizar máquinas que permitan simular escenarios con velocidad media/alta y gran número de transmisiones, para tener así una visión global de la eficiencia de encaminamiento en redes ad hoc móviles.
- estudiar la latencia de la red en entornos móviles. A pesar de que, a la vista de los resultados de este trabajo, la eficiencia de encaminamiento no se ve degrada excesivamente por la movilidad de los nodos cuando el número de transmisiones es reducido, es plausible suponer que la latencia derivada del proceso de descubrimiento de ruta pueda ser mucho más elevada en redes móviles que en redes estáticas.
- por último, para completar este estudio, proponemos utilizar patrones de movilidad de los nodos más realistas. Por ejemplo, sería interesante utilizar patrones de movilidad que permitan una velocidad diferente para cada nodo, así como la inclusión de obstáculos dentro del área de desplazamiento de los nodos. Esto permitiría aproximarnos a un entorno de aplicación más realista.

En conclusión, podemos afirmar que la caracterización de la eficiencia de encaminamiento en redes ad hoc móviles resulta sumamente compleja, ya que está afectada por multitud de parámetros interrelacionados entre sí. Es por ello, que en este estudio se han señalado los diferentes aspectos que pueden afectar a la eficiencia de encaminamiento en redes ad hoc móviles y cuál es su grado de influencia; en ningún caso los resultados obtenidos en este proyecto son extrapolables a otros escenarios, sólo son valores de referencia que deberán ser secundados mediante un análisis previo de la red objeto de estudio.

## Anexo I Instalación del NS-2

Para la instalación del simulador ns-2 (*Network Simulator version 2*) se deben seguir los siguientes pasos:

- Descargar versión actual véase referencia[ ns.2].
- Desempaquetar el paquete del simulador

```
tar -xvzf ns-allinone.tar
```

- Asignar la dependencia de paquetes que va a utilizar el sistema operativo con el que se está trabajando, *ubuntu*:

```
sudo apt-get install build-essential autoconf automake libxmu-dev
```

- Y finalmente proceder a su instalación

```
./install
```

Un ejemplo del uso del programa ns-2 puede observarse en la siguiente figura:

```
lorena@lorena-desktop:~/proyecto$  
lorena@lorena-desktop:~/proyecto$ nohup ns-allinone-2.33/bin/ns escenario.tcl -s  
c n100a3000x3000t120v10p0.tr > salida-ns.txt  
nohup: se ignora la entrada y se redirige stderr hacia stdout  
lorena@lorena-desktop:~/proyecto$ █
```

Figura A.1: Utilización del ns-2

## Anexo II Instalación mobgen-ss

Para la instalación de esta herramienta del modelo de movilidad *random waypoint* sólo es necesario la decompresión del paquete:

```
tar -xvzf mobgen-ss.tar
```

Con esto se consigue descomprimir el paquete y la creación de la carpeta correspondiente, por tanto el segundo paso consistirá en la instalación del programa, para ello se ejecuta:

```
chmod 0777 make  
./make
```

Primeramente se dan permisos al script y posteriormente se ejecuta. La instalación de esta implementación resulta relativamente extraña, ya que en la carpeta creada no se dispone de ningún script con ese nombre (*make*), no obstante por este método se consigue un resultado satisfactorio.

## Referencias

[AODV] Charles E. Perkins y Elisabeth M. Royer, *AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector)*, 1997.

[Bettstetter, 2003] C. Bettstetter, G. Resta, P. Santi, "The Node Distribution of the Random Waypoint Mobility Model for Wireless *Ad hoc* Networks", *IEEE Trans. On Mobile Computing*, vol.2, no.3, 2003, pp. 257-269.

[Bettstetter, 2004] C. Bettstetter, H. Hartenstein, X. Pérez-Costa, "Stochastic Properties of the Random Waypoint Mobility Model", *Institute of Communication Networks, Wireless Networks* pp 555-557, 2004.

[Bettstetter, 2004] C. Bettstetter, H. Hartenstein, X. Pérez-Costa, "The Spatial Node Distribution of the Random Waypoint Mobility Model", *Wireless Networks*, vol.10, no.5, 2004, pp. 555 - 567.

[Boleng, 2002] J. Boleng, W. Navidi, T. Camp, "Metrics to Enable Adaptive Protocols for Mobile *Ad hoc* Networks", *Proc. of ICWN '02*, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 293-298, Jun 24-27, 2002.

[Calderon, 2005] Oscar J. Calderón, C. Víctor M. Quintero "Un nuevo aspecto de la movilidad: Redes ad hoc – Conceptos", Universidad del Cauca, 2004.

[Camp, 2002] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, "A survey of mobility models for *Ad hoc* network research", *Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, vol.2, no.5, pp.483-502, 2002.

[Casilari, 2005,] E. Casilari, y A. Triviño "Análisis de la estabilidad de modelos de movilidad en simulaciones de redes ad hoc", *Proc. JITEL '05*, pp. 33-40, 2005.



[Clausen, 2002] M. Claussen et al. “Earth system models of intermediate complexity: closing the gap in the spectrum of climate system models”, *Climate Dynamics*, vol.18, no.7, pp. 579-586, 2002.

[Cochram, 1992] W.G. Cochram, G.M. Cox, “Experimental designs”, John Wiley & Sons Limited, pp. 612, 1992.

[*disklinepicking*] Disponible en <http://mathworld.wolfram.com/DiskLinePicking.html>  
Fecha de consulta 12-05-2009.

[Domingo, 2005] M.C. Domingo Aladrén, “Diferenciación de servicios y mejora de la supervivencia en redes *ad hoc* conectadas a redes fijas”, Universidad Politécnica de Catalunya, 2005.

[DSDV] Carles E. Perkins y Pravin Bhagwat, DSDV (*Destination Sequenced Distance Vector*), 1994.

[DSR] David B. Johnson, David A. Maltz y Josh Broch, DSR (*Dynamic Source Routing*), 1999.

[Gil, 2009] M. Elena Gil Jiménez. Proyecto Fin de Carrera “Estudio de la eficiencia de enrutamiento del protocolo AODV en redes ad-hoc inalámbricas de gran escala”, Universidad Rey Juan Carlos, 2009.

[*iNSpect*] Paquetes necesarios para la instalación de la herramienta de visualización. Disponibles en: <http://toilers.mines.edu/Public/INSpectInstallation>. Fecha de consulta 03-06-2009.

[Jardosh, 2003] A. Jardosh, E.M. Belding-Royer, K.C. Almeroth, and S. Suri, “Towards realistic mobility models for mobile *Ad hoc* networks”, *Proc. of the 9th Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking*, San Diego, CA, USA, pp. 217-229, 2003.

[Jiménez, 2006] José Manuel Jiménez Ramírez. Proyecto Fin de Carrera “Optimización de los parámetros del protocolo de encaminamiento AODV”, Universidad de Málaga, 2006.

[Kurmanava, 2009] Maryna Kurmanava. Proyecto Fin de Carrera “Estudio de la eficiencia de enrutamiento del protocolo DSR en redes ad-hoc inalámbricas de gran escala”, Universidad Rey Juan Carlos, 2009.

[Lujan, 2002] Luis Raúl Lujan Vega ,Leticia Lizarraga Velarde , Felipe Alfonso Ordóñez García y Lehi Garza Medina “Simulación y Evaluación de las Prestaciones de una Red *Ad Hoc* Inalámbrica en un Campus Universitario con Trafico de Datos en Tiempo Real y No Real con el Modelo Swan”, 2002.

[*mobgen-ss*] Implementación mobgen. Disponible en:<<http://toilers.mines.edu/Public/>>  
Fecha de consulta: 03-06-2009.

[Navidi, 2004] W. Navidi, T. Camp, “Stationary Distributions for the Random Waypoint Mobility Model”, IEEE Trans. Mobile Computing, vol.3, no.1, 2004, pp. 99-108.

[Navidi, 2004a] W. Navidi, T. Camp, and N. Bauer, “Improving the Accuracy of Random Waypoint Simulations Through Steady-State Initialization”, *Proc. Of the 15<sup>th</sup> International Conf on Modeling and Simulation*, pp. 319-326, March 2004.

[*nist*] National Institute of Standard and Technology. *Advanced network technologies division*.

[*ns-2*] *Network Simulator 2*. Disponible en <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>>. Fecha de consulta: 03-06-2009

[Ortuño, 2006] M. A. Ortuño. Tesis doctoral “Protocolo de encaminamiento en origen con identificadores no únicos para redes Ad-Hoc de dispositivos con recursos limitados”, Universidad Rey Juan Carlos, 2006.

[*squarelinepicking*] Disponible en <http://mathworld.wolfram.com/SquareLinePicking.html>. Fecha de consulta: 12-05-2009.

[Téllez, 2002] Carlos Felipe Téllez Castaño “Detección de intrusos y seguridad en redes móviles *ad hoc*”, Universidad Nacional de Colombia, seminario de investigación, 2002.

[TORA] M. Scott Corson y Vincent Park, TORA (*Temporally Ordered Routing Algorithm*), 2003.

[Vinagre, 2007] Juan José Vinagre Díaz. Tesis doctoral “Teoría del encaminamiento en redes *ad hoc* inalámbricas”, Universidad Carlos III de Madrid, 2007

[WRP] S. Murthy y J.J. García-Luna-Aceves ,WRP (*Wireless Routing Protocol*), 1996.

[Yoon, 2003] Jungkeun Yoon, Mingyan Liu, Brian Noble “Random Waypoint Considered Harmful”, University of Michigan, 2003.

[ZRP] Zygmunt J. Haas y Marc Pearlman, ZRP (*Zone Routing Protocol*), 2002.