

Novática, revista fundada en 1975 y decana de la prensa informática española, es el órgano oficial de expresión y formación continua de ATI (Asociación de Técnicos de Informática). **Novática** edita también UPGRADE, revista digital de CEPIS (Council of European Professional Informatics Societies), en lengua inglesa, y es miembro fundador de UPENET (UPGRADE European Network)

<http://www.ati.es/novatica/>
<http://www.upgrade-cepis.org/>

ATI es miembro fundador de CEPIS (Council of European Professional Informatics Societies) y es representante de España en IFIP (International Federation for Information Processing); tiene un acuerdo de colaboración con ACM (Association for Computing Machinery), así como acuerdos de vinculación o colaboración con AdaSpain, AI2 y ASTIC.

Consejo Editorial
 Antoni Carbonell Nogueras, Juan Manuel Cueva Lovelle, Juan Antonio Esteban Iriarte, Francisco López Crespo, Celestino Martín Alonso, Josep Molas i Bertrán, Olga Pallás Codina, Fernando Píera Gómez (Presidente del Consejo), Ramón Puigjaner Trepal, Miquel Sàrries Griñó, Asunción Yturbe Herranz

Coordinación Editorial
 Rafael Fernández Calvo <rfcalvo@ati.es>

Composición y autoedición
 Jorge Llácer (SI) de Ramales

Traducciones
 Grupo de Lengua e Informática de ATI <http://www.ati.es/gt/lengua-informatica/>

Administración
 Tomás Brunete, María José Fernández, Enric Camarero, Felicidad López

Secciones Técnicas: Coordinadores

Administración Pública electrónica
 Gumersindo García Arribas, Francisco López Crespo (MAP)
 <gumersindo.garcia@map.es>, <floc@ati.es>

Arquitecturas
 Enrique F. Torres Moreno (Universidad de Zaragoza) <enrique.torres@unizar.es>
 Jordi Tubella Morgadas (DAC-UPC) <jordi@ac.upc.es>

Análisis de Datos
 Marina Tourino Troitiño, Manuel Palao García-Suelto (ASIA)
 <marinatourino@marinatourino.com>, <manuel@palao.com>

Bases de datos
 Coral Calero Muñoz, Mario G. Piattini Velthuis
 (Escuela Superior de Informática, UCLM)
 <Coral.Calero@uclm.es>, <mpiattini@inf-cr.uclm.es>

Derecho e Tecnologías
 Isabel Hernando Collados (Fac. Derecho de Donostia, UPV) <hernando@legaltek.net>
 Elena Davara Fernández de Marcos (Davara & Davara) <edavara@davara.com>

Escadanza Universitaria de la Informática
 Joaquín Ezepeleta Mateo (CPS-UZAR) <ezepeleta@posta.unizar.es>
 Cristóbal Pareja Flores (DSIC-UPM) <cpajef@sip.ucom.es>

Gestión del Conocimiento
 Joan Baiget Solé (Cap Gemini Ernst & Young) <joan.baiget@ati.es>

Informática y Filosofía
 Josep Corco Juvany (UPV) <jcorco@unica.edu>
 Esperanza Marcos Martínez (ESCEU-URJC) <cuca@escet.urjc.es>

Informática Gráfica
 Miquel Chover Salés (Universitat Jaume I de Castellón) <chover@isi.uji.es>
 Roberto Vivo Herrando (Eurographics, sección española) <rvivo@dsic.upv.es>

Ingeniería del Software
 Javier Dolado Cosín (DSI-UPV) <dolado@si.uv.es>
 Luis Fernández Sanz (FRIS-EI-UEM) <luisfern@dpriis.esi.uem.es>

Inteligencia Artificial
 Federico Barber Sanchis, Vicente Botti Navarro (DSIC-UPV)
 <fvbotti@barberj@dsic.upv.es>

Interacción Persona-Computador
 Julio Abascal González (FI-UPV) <julio@si.edu.es>
 Jesús Lorés Vidal (Univ. de Lleida) <jesus@eup.udl.es>

Internet
 Alonso Álvarez García (TID) <alonso@ati.es>
 Llorenç Pagès Casas (Indra) <pages@ati.es>

Lengua e Informática
 M. del Carmen Ugarte García (IBM) <cugarte@ati.es>

Lenguajes Informáticos
 Andrés Marín López (Univ. Carlos III) <amarin@it.uc3m.es>
 I. Anel Velázquez Irujo (ESCEU-URJC) <a.velazquez@escet.urjc.es>

Librerías e Informática
 Alfonso Escolano (FIR-Univ. de La Laguna) <aescolan@ull.es>

Lingüística computacional
 Xavier Gómez Guinovart (Univ. de Vigo) <xgg@uvigo.es>
 Manuel Palomar (Univ. de Alicante) <mpalomar@dlsi.ua.es>

Mundo estudiantil
 Adolfo Vázquez Rodríguez (Rama de Estudiantes del IEEE-UCM)
 <a.vazquez@ieee.org>

Profesión Informática
 Rafael Fernández Calvo (ATI) <rfcalvo@ati.es>
 Miquel Sàrries Griñó (Ayto. de Barcelona) <msarries@ati.es>

Redes y servicios telemáticos
 Luis Guisasa Coloma (DCOM-UPV) <lguisasa@ddcom.upv.es>
 Josep Solé Parela (DAC-UPC) <parela@ac.upc.es>

Seguridad
 Javier Arellano Bertolin (Univ. de Deusto) <jarellito@eside.deusto.es>
 Javier López Muñoz (ETSI Informática-UMA) <jlm@icc.uma.es>

Sistemas de Tiempo Real
 Alejandro Alonso Muñoz, Juan Antonio de la Puente Alfaro (DIT-UPM)
 <calonso@iisiete.dit.upm.es>

Software Libre
 Jesús M. González Barahona, Pedro de las Heras Quirós
 (GSYC-URJC) <jm@pheras@gsyc.escet.urjc.es>

Tecnología de Objetos
 Jesús García Molina (DIS-UM) <jmolina@correo.um.es>
 Gustavo Rossi (LIFA-UNLP, Argentina) <gustavo@sol.info.unlp.edu.ar>

Tecnologías para la Edición
 Juan Manuel Dodero Beardo (UC3M) <dodero@inf.uc3m.es>
 Juliá Minguilón I Alfonso (UOC) <jminguilona@uoc.edu>

Tecnologías y Empresa
 Pablo Hernández Madroño (Bluemat) <pablohm@bluemat.biz>

TIC para la Sanidad
 Valentín Masero Vargas (DI-UNEX) <vmasero@unex.es>

TIC y Turismo
 Andrés Aguayo Maldonado, Antonio Guevara Plaza (Univ. de Málaga)
 <aguayo.guevara@lcc.uma.es>

Las opiniones expresadas por los autores son responsabilidad exclusiva de los mismos. **Novática** permite la reproducción de todos los artículos, a menos que lo impida la modalidad de © o *copyright* elegida por el autor, debiéndose en todo caso citar su procedencia y enviar a **Novática** un ejemplar de la publicación.

Coordinación Editorial, Redacción Central y Redacción ATI Madrid
 Padilla 66, 3º dcha., 28006 Madrid
 Tfn. 91 4029391; fax 91 3083685 <novatica@ati.es>

Composición, Edición y Redacción ATI Valencia
 Av. del Reino de Valencia 23, 46005 Valencia
 Tfn. fax 96 3303992 <secreval@ati.es>

Administración y Redacción ATI Cataluña
 Ciudad de Granada 131, 08018 Barcelona
 Tfn. 93 4125235; fax 93 4127713 <secregan@ati.es>

Redacción ATI Andalucía
 Isaac Newton, s/n, Ed. Sadiel,
 Isla Cartuja 41092 Sevilla, Tfn./fax 95 4460779 <secreand@ati.es>

Redacción ATI Aragón
 Lagasca 9, 3-B, 50006 Zaragoza,
 Tfn./fax 97 6235181 <secreara@ati.es>

Redacción ATI Asturias-Canarias <sp-astucan@ati.es>
Redacción ATI Castilla-La Mancha <cp-camancha@ati.es>

Redacción ATI Galicia
 Recinto Ferial s/n, 36540 Silleda (Pontevedra)
 Tfn. 896581413; fax 896580162 <secregal@ati.es>

Suscripción y Ventas
 <http://www.ati.es/novatica/interes.html>, o en ATI Cataluña o ATI Madrid

Publicidad
 Padilla 66, 3º dcha., 28006 Madrid
 Tfn. 91 4029391; fax 91 3083685 <novatica.publicidad@ati.es>

Impresión
 Derrá S.A., Juan de Austria 66, 08005 Barcelona.
 Depósito legal: B 15.154-19/75 -- ISSN: 0211-2124; CODEN NOVAEC

Portada: Antonio Crespo Foix / © ATI 2005
Diseño: Fernando Agresta / © ATI 2005

en resumen

- PAN para todos (con posdata.cat)** > 02
Rafael Fernández Calvo
- noticias de IFIP**
- Informe sobre la reunión del Comité Técnico 12 (TC: Inteligencia Artificial)** > 03
Ramón López de Mantaras

monografía

Omnipresencia computacional

- (En colaboración con UPGRADE)
 Editores invitados: José Antonio Gutiérrez de Mesa, Daniel Rodríguez García, Miltiadis D. Lytras
- Presentación. Panorama de la Computación Ubicua** > 04
José Antonio Gutiérrez de Mesa, Daniel Rodríguez García, Miltiadis D. Lytras

- El problema de la masa crítica de las redes ad hoc móviles** > 08
Jörg Roth

- La influencia del tipo de dispositivo y del contexto en el acceso inalámbrico al infotretentimiento: un caso real** > 13
Tacha Serif, George Ghinea
- La problemática de la impresión en entornos Server-Based Computing** > 18
Luis Bengochea Martínez

- El debate entre software de código fuente abierto y software propietario y su impacto sobre la innovación tecnológica** > 22
Ricardo José Rejas Muslera, Juan José Cuadrado Gallego, Javier Dolado Cosín, Daniel Rodríguez García

- Localización en Computación Ubicua utilizando redes de sensores acústicos** > 25
Carlos Manuel De Marziani, Jesus Ureña Ureña, Álvaro Hernández Alonso, Manuel Mazo Quintas, Ana Jimenez Martin, Juan Jesús García Dominguez, José Manuel Villadangos Garrizo, Fernando Javier Álvarez Franco

- Solución inalámbrica para la implementación de un sistema de telemedicina** > 31
José Manuel Rodríguez Ascariz, Luciano Boquete Vázquez, Ignacio Bravo Muñoz, Pedro Martín Sánchez, José Luis Martín Sánchez

- SIGLAS: un caso práctico de aplicación de la Computación Ubicua en la gestión de almacenes** > 34
José Julio González Pozo, Manuel Ortega Cantero

- Protocolos médicos para la toma de decisiones en un contexto de Computación Ubicua** > 38
Eladio Domínguez Murillo, Beatriz Pérez Valle, Áurea Rodríguez Villanueva, María Antonia Zapata Abad

secciones técnicas

- Bases de datos**
- Clasificación de enfoques para la integración en la Web** > 42
César Javier Acuña, Esperanza Marcos Martínez, Juan M. Vara Mesa, Marcos López Sanz

- Ingeniería del Software**
- El reto de utilizar software de código abierto como estrategia de reutilización** > 47
Christian Neumann, Christoph Breidert

- Lingüística computacional**
- Creación de un recurso textual para el aprendizaje del inglés** > 51
Irene Castellón Masalles, Ana Fernández Montraveta, Glòria Vázquez García

- Redes y servicios telemáticos**
- Prestaciones de TCP/IP con planificación MEDF** > 55
Rüdiger Martin, Michael Menth, Vu Phan-Gia

- Tecnologías para la educación**
- Una iniciativa de modernización educativa: el Proyecto Ponte dos Brozos** > 61
Simón Neira Dueñas, Felipe Gómez-Pallete Rivas

- Referencias autorizadas** > 68

sociedad de la información

- Programar es crear**
- El robot defectuoso (CUPCAM 2005, problema D, enunciado)** > 73
Manuel Abellanas Oar

- La casa más grande (CUPCAM 2005, problema B, solución)** > 74
Manuel Abellanas Oar, Ángel Herranz Nieva

asuntos interiores

- Coordinación editorial / Programación de Novática** > 76
- Normas de publicación para autores / Socios Institucionales** > 77

Monografía del próximo número: "Web Semántica"

Jörg Roth

Depto. de Ciencias de la Computación, Universidad de Hagen (Alemania)

<Joerg.Roth@Fernuni-hagen.de>

El problema de la masa crítica de las redes ad hoc móviles

Traducción: Manuel Fernando De Sotto Esteban (informático), José Ventura Roda (Socio de ATI), José Zurita Márquez (Socio de ATI, miembro del Grupo de Lengua e Informática de ATI)

1. Introducción

Las redes ad hoc móviles son estructuras autoorganizadas en las que los nodos móviles están temporalmente conectados sin la ayuda de ninguna infraestructura fija o administración centralizada (**Nota del Traductor:** las redes ad hoc son un tipo de red inalámbrica donde cada estación puede comunicarse con cualquier otra directamente; contrasta con el modo infraestructura, donde las comunicaciones se cursan a través de un punto de acceso). Las redes ad hoc móviles prometen un alto potencial para escenarios de computación móvil y ubicua. Al no ser necesaria ninguna infraestructura fija, normalmente se utilizan en ambientes donde una red preinstalada de cable es demasiado costosa o a veces imposible. Las áreas típicas para redes ad hoc son lugares públicos tales como aeropuertos, áreas abiertas de trabajo, zonas de desastre o campos de batalla militares. Además, las redes ad hoc pueden servir como redes de acceso a redes comerciales (por ejemplo, telefonía celular). A medida que los dispositivos móviles y las redes inalámbricas se hacen cada vez más potentes, muchos investigadores esperan que las redes ad hoc jueguen un importante papel en el futuro para los usuarios móviles. Hay muchas simulaciones esperanzadoras que afirman esta visión. Sin embargo, examinándolas más detalladamente estas simulaciones están a menudo basadas en presunciones ideales; habitualmente se presume una distancia de comunicación de radio amplio (por ejemplo 250 m.) y una distribución homogénea de nodos. En la realidad, normalmente existen rangos de comunicación restringidos de 10 a 30 m. Dado que los usuarios normalmente caminan por lugares concretos (por ejemplo, calles o aceras) y se reúnen en puntos de interés, tenemos una distribución muy poco homogénea sobre el área observada.

En este artículo queremos investigar los requisitos previos para conformar una red ad hoc razonable para un cierto ambiente real. Para esto, nos abstraeremos de protocolos específicos de enrutamiento, direccionamiento de paquetes, hardware de red, etc., y mediremos la calidad de una red con la ayuda de un conjunto de métricas. Aplicamos nuestras métricas a un escenario realista, Minneapolis Skyways, con tiendas a varios niveles y pasarelas peatonales elevadas. Simular este escenario conduce a una descorazonadora observación: necesitamos

Resumen: las redes ad hoc móviles están incrementando su popularidad en los últimos años y prometen un gran potencial para el futuro. Las redes ad hoc permiten a los usuarios comunicarse sin una infraestructura de red fija, por lo que son interesantes para muchos escenarios de comunicación móvil. Las redes ad hoc multi-salto extienden la distancia de la comunicación de los nodos individuales con la ayuda de protocolos de enrutamiento ad hoc. Muchos investigadores se han interesado en las capas inferiores de la comunicación y en los múltiples protocolos desarrollados en el pasado. En este artículo, queremos abstraernos de la capa física, la capa de enlace de datos y normas del enrutamiento y queremos medir la calidad de las redes ad hoc independientemente de las características de la red y el hardware. Para ello introducimos un modelo formal de red y un juego de métricas. A continuación, con ayuda de una herramienta de simulación, medimos la calidad de la red ad hoc en escenarios específicos. Específicamente queremos descubrir los requisitos previos para una suficiente conectividad, estabilidad y cobertura. Llamamos al número de nodos que forman una red razonable la masa crítica. Como resultado de nuestras simulaciones, conseguimos una alta masa crítica para escenarios de uso real.

Palabras clave: comunicación inalámbrica, computación móvil, computación ubicua, métricas de evaluación, redes ad hoc.

Autor

Jörg Roth estudió Ciencias de la Computación en la Universidad Técnica de Kaiserslautern (Alemania). Después de finalizar sus estudios trabajó como ingeniero de software en aplicaciones industriales durante cuatro años. En el 2000 trabajó como investigador en la Universidad de Hagen y recibió su doctorado. En 2004 recibió su habilitación docente en Ciencias de la Computación. Es fundador del grupo técnico "Location Based Applications and Services" de la asociación informática alemana GI (*Gesellschaft für Informatik*) y miembro con voto del grupo de trabajo 2.7 de IFIP (*International Federation for Information Processing*). En los últimos años, fue miembro de numerosos comités y revisor de muchas revistas y libros. Además de numerosas colaboraciones en artículos científicos y en capítulos de libros, es autor del libro "Mobile Computing". Sus actuales intereses investigadores incluyen computación móvil, servicios basados en localización y redes inalámbricas.

más de 2.000 nodos en un área aproximada de 500 m. por 500 m. para establecer una red razonable. Comparado con los aproximadamente 50 nodos bajo presunciones ideales, que es un número muy alto, la misma idea de las redes ad hoc puede ser cuestionable.

2. Trabajo relacionado

En este artículo, seguimos la definición de la IETF (*Internet Engineering Task Force*) de redes ad hoc móviles (en los sucesivos llamadas MANETs, *Mobile Ad hoc NETWORKS*) [10]: MANETs son redes inalámbricas multisalto que se organizan a sí mismas. Especialmente, la topología puede cambiar rápidamente. Para permitir la comunicación entre nodos que no están directamente conectados a través de una tecnología inalámbrica (por ejemplo Wireless LAN IEEE 802 o Bluetooth), las redes usan protocolos de enrutamiento ad hoc tales como LMR (*Land Mobile Radio*) [5], Link Reversal [6], DSR (*Dynamic Source Routing*) [13], OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*) [11], DSDV (*Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing*) [17], o TORA (*Temporally-Ordered Routing*

Algorithm) [16] para buscar rutas hacia un receptor.

En los últimos años se han publicado varias propuestas que tratan del análisis de la calidad de los MANETs. Gupta y Kumar [8] asumen n nodos localizados de forma aleatoria, cada uno capaz de transmitir con W bit/s sobre un canal inalámbrico. Su análisis muestra que el rendimiento obtenido por cada nodo es $\Theta(W / \sqrt{n \cdot \log(n)})$ bit/s, es decir el rendimiento decrece espectacularmente con un mayor número de nodos. Jingang et al. [12] examinan el rendimiento de una red WLAN 802.11 (*Wide-Area Local Area Network*). Hallaron que la capacidad de cadenas largas de nodos dentro de una red ad hoc es $\frac{1}{4}$ de la capacidad de canal que se puede obtener con una conexión por radio. Glossgauser y Tse [7] muestran que dentro de una red ad hoc el rendimiento por sesión puede incrementarse cuando los nodos son móviles en vez de fijos. Sin embargo ellos hicieron partieron de varios supuestos ideales y usaron restricciones de retardo

muy poco definidas. Santi et al. [18] investigaron que el alcance de comunicación inalámbrica aseguraba una red fuertemente conectada. Ellos asumen una región n-dimensional con una distribución homogénea de nodos. Su análisis se centra en una red fuertemente conectada, es decir, cada nodo está conectado a otro nodo. Éste es un requerimiento muy exigente, normalmente no conseguido en redes ad hoc reales.

A diferencia de las anteriores aproximaciones, nosotros no partimos de una distribución homogénea de usuarios en el área observada. Dado que no tenemos un modelo simple para describir el movimiento de los nodos móviles (por ejemplo, el modelo del waypoint aleatorio), es muy difícil de obtener una aproximación cerrada analítica o probabilística. Por ello, en este artículo especificaremos las métricas y restringiremos el análisis en las simulaciones.

Comparado con otras aproximaciones, introducimos una serie de nuevas métricas que miden la calidad de una MANET; especialmente la combinación de *alcance*, *vulnerabilidad* y *cobertura* es nueva y refleja las demandas de los usuarios finales de establecer una red con un alto grado de conectividad.

3. Medición de las propiedades de las MANETS

A continuación introduciremos un modelo de red en el que no trataremos con los aspectos físicos. Tomaremos dos nodos que están dentro de la distancia de comunicación, están enlazados juntos con un rendimiento máximo y sin ningún error. A partir de cierta distancia la comunicación se rompe inmediatamente, es decir, la calidad de la comunicación no decrece uniformemente cuando la distancia entre los dos nodos crece. Observaremos una MANET concreta en un intervalo de tiempo $[t_1, t_2]$ en un área A . Significaremos como $N = \{N_1, \dots, N_n\}$ el juego de todos los nodos de la red que hayan estado activos al menos una vez en el área A . Cada nodo $N_i \in N$ tiene una posición identificada como $p_i(t)$. Definamos $O(t) \subseteq N$ como el juego de nodos de la red que están activos (es decir online) en un determinado momento $t \in [t_1, t_2]$. Los nodos activos pueden enviar, recibir y redirigir paquetes. Introducimos O por dos razones: primero, los nodos pueden participar en una MANET, pero estar temporalmente apagados; segundo, los nodos pueden tan sólo pasar a través de la MANET, es decir, solo participan durante un corto periodo de tiempo y luego desaparecen. N no cambia con el tiempo, así pues usaremos O para modelar el comportamiento de dichos nodos. Para cada nodo $N_i \in O(t)$ introduciremos los conjuntos $c_i(t)$ y $r_i(t)$

■ $c_i(t)$ significa el conjunto de nodos *directamente* conectados. Sólo los nodos activos pueden estar conectados, es decir, $c_i(t) \subseteq O(t)$.

Sólo consideramos conexiones bidireccionales, así pues $N_i \in c_j(t) \Leftrightarrow N_j \in c_i(t)$.

■ $r_i(t)$ significa el conjunto de nodos alcanzables mediante *saltos multiples*. $N_j \in r_i(t)$ si cualquiera: $N_j = N_i$ o $N_j \in c_i(t)$ o N_j y N_k pueden comunicarse con la ayuda de nodos intermedios conectados directamente.

Este modelo implica una importante simplificación de las MANETS reales: después de un cambio de topología, ambos $c_i(t)$ y $r_i(t)$ *inmediatamente* contienen el juego correcto de nodos comunicando. En realidad, los cambios deben propagarse por la red con una velocidad finita y los nodos inactivos o inalcanzables podrían ser falsamente vistos como alcanzables.

Basado en este modelo de red, introducimos un número de métricas. Nuestras métricas no deberían confundirse con métricas usadas para encontrar rutas óptimas desde el emisor al receptor en protocolos de enrutamiento (por ejemplo contadores de saltos).

Nuestras métricas miden características particulares de toda la red. Nosotros nos preguntamos lo siguiente:

- Cuando un nodo entra en el área de una MANET, ¿cuánto de alta es la probabilidad de ser instantáneamente conectado?
- Una vez que un nodo se conecta a la MANET, ¿a cuántos nodos puede acceder, o a la inversa, cuántos nodos pueden acceder al nuevo nodo?
- Una vez que un nodo es accedido por otro, ¿cuánto de estable es la comunicación?

Si conociéramos la superficie o el volumen cubierto por la MANET, la primera pregunta podría responderse usando p_i y el alcance de la comunicación. Examinar el juego r_i conduce a responder a la segunda pregunta.

La tercera cuestión es más difícil de responder: el movimiento de determinados nodos puede desactivar una comunicación en curso si otros nodos son menos importantes para los enlaces de comunicación existentes. Mediremos este efecto introduciendo los llamados nodos *importantes* más tarde.

3.1. Segmentación

La primera métrica se llama *Segmentación* que es usada como base para posteriores métricas. La segmentación S significa el número de segmentos en la MANET.

Los nodos dentro de un segmento sólo pueden comunicarse con nodos dentro del mismo segmento. La **ecuación (1)** muestra como S está relacionado con r_i .

$$S = \sum_{N_i \in O} \frac{1}{|r_i|} \quad (1)$$

Para conseguir una medida que sea independiente del número existente de nodos, introduciremos la *Segmentación normalizada SN*:

$$SN = \begin{cases} \frac{S-1}{|O|-1}, & \text{if } |O| > 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

SN tiene valores entre 0 y 1 donde $SN = 0$ significa que *no hay segmentación* y $SN = 1$ significa que hay *segmentación máxima* (todos los nodos están separados).

3.2. Cobertura

Para medir la superficie o volumen que una MANET cubre, primero introduciremos el *Área de Cobertura*. El área de cobertura CA es el área dentro de A donde un nodo inactivo puede activarse sin incrementar el número de segmentos. Nótese que la activación de un nodo en el área de cobertura no significa necesariamente que se conecte a todos los nodos de la MANET. Definimos la *Cobertura C* para conseguir un valor que sea independiente del tamaño del área A :

$$C = \frac{vol(CA)}{vol(A)} \quad (3)$$

Aquí, *vol* significa el tamaño del volumen o superficie.

3.3. Capacidad de alcance

Ahora definiremos cómo están dentro de una red los nodos asequibles.

Definiremos $R(N_i)$ para $N_i \in O$ (llamado *Capacidad de alcance* de N_i) como el ratio de los nodos activos a los que N_i puede acceder:

$$R(N_i) = \begin{cases} \frac{|r_i|-1}{|O|-1}, & \text{if } |O| > 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

Usamos $|O|-1$ como denominador, ya que no podemos contar al propio nodo N_i como alcanzable. Para medir la capacidad de alcance de todos los nodos definimos la *Capacidad media de alcance AR*:

$$AR = \frac{\sum_{N_i \in O} R(N_i)}{|O|} \quad (5)$$

AR está sólo definido si $O \neq \{\}$, es decir tenemos al menos un nodo activo en la MANET.

3.4. Importancia y vulnerabilidad

Dentro de una MANET, algunos nodos son más importantes para la comunicación que otros. Algunos nodos en el 'centro' de la MANET pueden desactivar una comunicación en curso cuando son movidos o apagados, ya que ellos pueden separar unos nodos de otros. Por otro lado, algunos nodos 'periféricos' pueden apagarse sin afectar al resto de la red. Formalicemos este hecho. Definimos $I(N_i)$ como la *Importancia* de $N_i \in O$. La importancia devuelve cuantos nuevos segmentos se causan cuando se apaga N_i :

$$I(N_i) = \begin{cases} S'(N_i) - S, & \text{if } S'(N_i) > S \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$S'(N_i)$ significa el número de segmentos si eliminamos N_i de O . Para medir la red entera, definimos la *Vulnerabilidad* V , que devuelve como la red reacciona, como media, al desactivar nodos:

$$V = \begin{cases} \frac{\sum_{N_i \in O} I(N_i)}{|O| - 2}, & \text{if } |O| > 2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

Podemos fácilmente probar que el máximo valor del numerador es $|O| - 2$, así pues el valor de V se halla en el intervalo $[0, 1]$. Nuestra lista de métricas ya está completa.

4. Evaluaciones

Las métricas proporcionan una herramienta para medir la calidad de una MANET concreta, es decir, una red donde los nodos residen en posiciones específicas en un mo-

mento concreto. Queremos ahora abstraernos de una MANET concreta y examinar los requisitos previos generales para hacer buenas MANETs, que ofrezcan suficiente conectividad para usuarios y aplicaciones. En principio, podríamos usar nodos concretos en ambientes reales.

El test *Ad hoc Protocol Evaluation (APE)* [14], por ejemplo, sigue esta aproximación. Para evaluar MANETs con APE, los usuarios con nodos móviles tienen que moverse en ambientes reales. Los experimentos iniciales fueron llevados a cabo con sólo 37 nodos. Ya que los experimentos reales son muy costosos y largos usamos un simulador en nuestra aproximación a evaluar un número razonable de nodos (por ejemplo algunos centenares).

Existe un amplio número de simuladores de red (por ejemplo NS-2 [20]). Broch y col. extendieron NS-2 para contemplar las características de la movilidad [2]. Adhocsim [1] está especialmente diseñada para simular redes ad hoc. Estas herramientas, no obstante, se centran en el nivel MAC (*Medium Access Control*) o de red. Pueden simular retrasos de paquetes o errores, esto es demasiado granular para las metas que intentamos. Para medir nuestras métricas hemos desarrollado una nueva herramienta de simulación.

La herramienta permite a un usuario especificar fácilmente el número de nodos, el alcance de la comunicación y el área a observar. Cuando se lleva a cabo la simulación, los nodos se mueven de forma aleatoria por el área. La herramienta presenta los valores actuales y las medias de las métricas. En

principio, la herramienta es capaz de simular redes tridimensionales. Sin embargo, incluso en edificios, donde a priori podría formarse una red tridimensional, los techos son a menudo impenetrables; por ello las MANETs acaban separándose en MANETs independientes y bidimensionales. Las siguientes simulaciones son por ello sólo bidimensionales.

A menudo, localizaciones pequeñas como aeronaves, autobuses o apartamentos son considerados como lugares adecuados para MANETs. En estos escenarios, sin embargo, es más oportuno instalar un pequeño número de puntos de acceso conectados mediante una red fija que usar una MANET.

Por ello las siguientes simulaciones examinan áreas más amplias. Realizamos dos tipos de simulaciones: el primer tipo simula nodos moviéndose en un área plana sin estructurar. En la segunda, un ejemplo más real, simulamos un centro comercial.

4.1. Áreas simples

En el primer escenario ponemos un número de nodos móviles en un área cuadrada. Los nodos escogen una dirección y velocidad aleatoria y se mueven hacia delante en línea recta hasta que alcanzan el borde. Entonces eligen una nueva dirección y se mueven de nuevo. Todos los nodos están activos durante todo el tiempo observado. Aunque este escenario es muy artificial, es un primer paso hacia el ejemplo más real que veremos en una sección posterior. Usamos este escenario simple para conseguir los primeros resultados. Este escenario lleva especialmente a la definición de la *masa crítica*: el número de nodos que forman una MANET razonable.

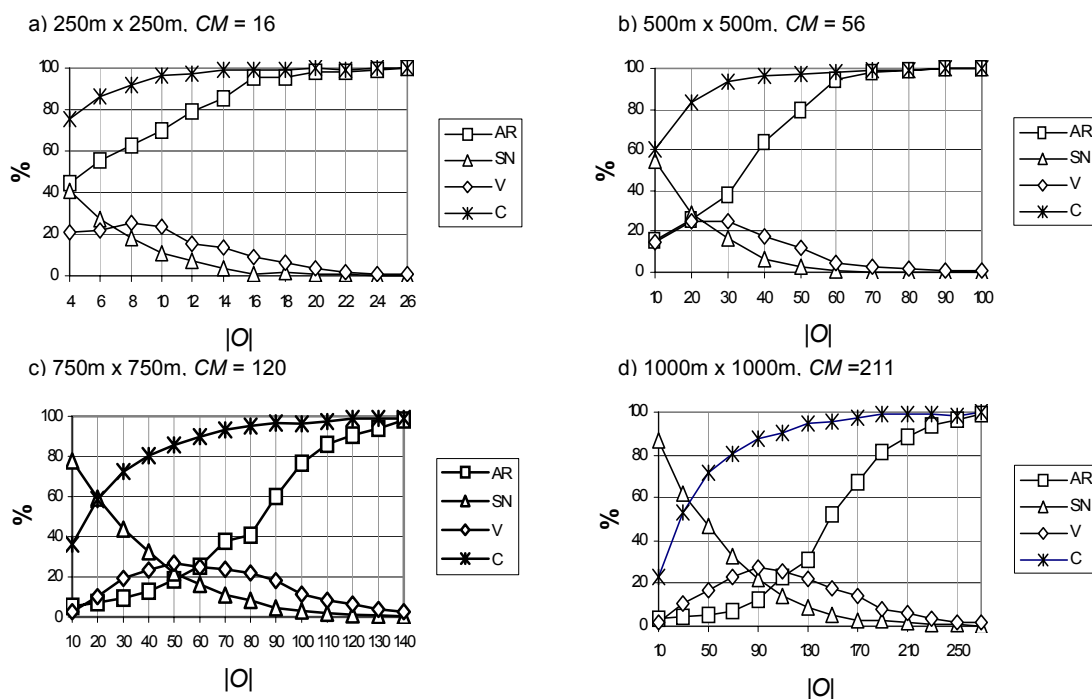


Figura 1. Evaluación de MANETs en áreas simples.

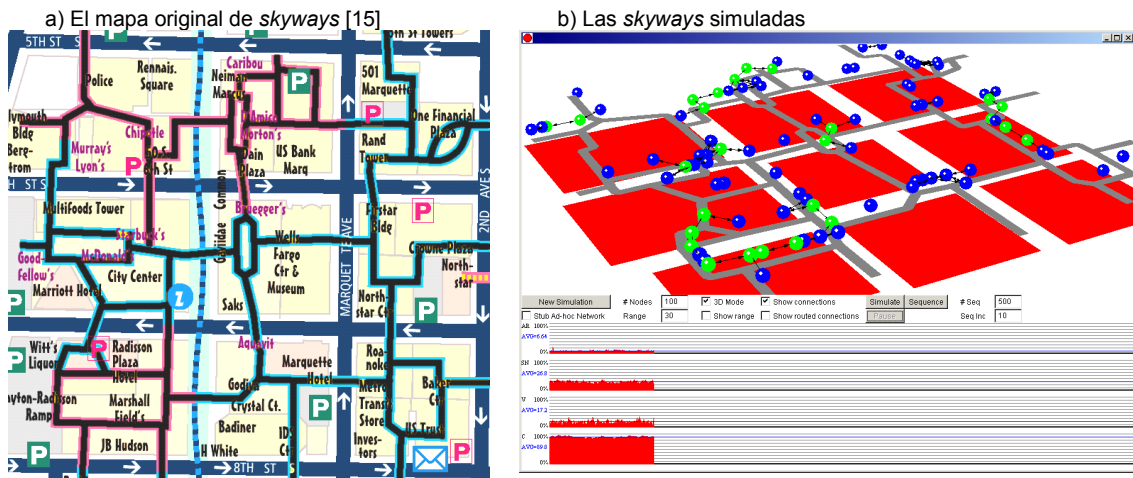


Figura 2. Las Skyways de Minneapolis.

Elegimos 100 m. como el alcance de la transmisión. El rango de Wireless LAN IEEE 802b, por ejemplo, es de entre 30 m. y 300 m., aunque esta última distancia la última sólo se da bajo condiciones ideales [9]. Los adaptadores LAN inalámbricos de baja potencia para dispositivos tipo PDA (*Personal Digital Assistant*) a menudo sólo alcanzan 90 m. incluso en ambientes abiertos [22]. Llevamos a cabo las simulaciones en varias áreas: 250 m. x 250 m., por ejemplo, el espacio habitual de una pequeña empresa; 500 m. x 500 m., por ejemplo un campus universitario; 750 m. x 750 m., por ejemplo una zona peatonal; 1000 m. x 1000 m., por ejemplo el centro de una ciudad. Simulamos las MANETs para diferentes números de nodos. La figura 1 presenta los resultados, que no son nada sorprendente: C y AR se incrementan uniformemente y convergen hacia el 100% según aumenta $|O|$. SN decrece uniformemente y converge hacia el 0% casi con la misma velocidad que C .

Varranca en el 0%, alcanzando un máximo de un 30% aproximadamente y entonces converge al 0% para un alto número de nodos. V tiene valores de casi el 0% para un bajo número de nodos, ya que tenemos una alta segmentación, por ello no hay enrutamiento multisalto en la red. Valores de más del 30% son raros en las redes reales, ya que sólo constelaciones muy específicas dan lugar a nodos con importancia I alta. Después de que las métricas alcanzan un valor determinado, podemos incrementar el número de nodos sin un cambio significativo. Basándonos en esta observación, podemos definir lo que significa una 'buena' MANET:

- Los valores de C y AR tienen que ser mayores que el 90%,
- Los valores de SN y V tienen que ser menores que el 10%.

Definiremos ahora la *Masa Crítica* CM de un escenario específico: CM es el número mínimo de nodos que son necesarios para alcanzar

valores de C y AR mayores que el 90% y de SN y V menores del 10%. Nótese que, en este punto, asumimos que cada nodo está continuamente activo. En realidad, los nodos a menudo están apagados, lo que incrementa significativamente la masa crítica. Discutiremos este asunto en una sección posterior.

4.2. Las Skyways de Minneapolis

El escenario de área simple ofrece una impresión primaria de las capacidades de las MANETs. Por ello llevamos a cabo una simulación más real: el centro comercial del centro de Minneapolis. Las torres del centro de Minneapolis están conectadas mediante las llamadas *Skyways* (pasarelas peatonales elevadas) en la primera planta. Las *skyways* y las plantas donde están las tiendas forman una red de rutas peatonales.

Este escenario tiene muchas ventajas:

- Tenemos un mapa exacto de todas las *skyways* (Figura 2a) y podemos cargar fácilmente este mapa en el simulador.
- Los usuarios y sus correspondientes nodos ad hoc siguen caminos simples, por lo que es fácil simular un comportamiento real de usuarios que van de una tienda a otra.

Entre todas las *skyways* tenemos una longitud total de varios kilómetros, elegimos una parte de las nueve torres. Estas nueve torres cubren un área de 440 m. x 408 m. Para esta área sólo los caminos que están abiertos al público se usan para calcular C . Otras áreas, por ejemplo, oficinas, hoteles y museos no se toman en cuenta. Además restringimos el área a las primeras plantas de cada torre.

Todos los nodos son interiores, asumimos un alcance de la comunicación de 30 m. (que es el alcance de una LAN IEEE 802b inalámbrica dentro de edificios). En nuestra primera simulación asumimos que todos los nodos están continuamente activos. La figura 3 muestra los resultados. En este escenario $CM = 510$.

4.3. El papel del tiempo online

Hasta ahora, todos los nodos de nuestras simulaciones están activos continuamente. En la realidad, el consumo eléctrico es una limitación de los nodos móviles, por ello el sistema operativo o el usuario a menudo apagan el nodo móvil para ahorrar batería. Este problema llega incluso a empeorar si la batería se agota debido a las conexiones de red inalámbricas usadas para transferir paquetes ajenos.

Las baterías de los actuales PDAs tienen capacidades de 2 Wh (dispositivos PalmOS) a 10 Wh (dispositivos Windows CE). Los adaptadores inalámbricos LAN (*Local Area Network*) consumen cerca de 2 Wh cuando transmiten paquetes.

Además el hardware inalámbrico LAN, la unidad central de proceso (CPU) y la memoria consumen electricidad para realizar el protocolo de enrutamiento ad hoc. Algunos adaptadores inalámbricos LAN tienen baterías separadas para ahorrar la energía de la batería de la PDA, sin embargo es típico que sólo tengan carga para dos horas de actividad de red [2]. Los portátiles tienen capacidades de batería de cerca de 50 Wh, pero tienen que suministrar a componentes que exigen más energía.

Normalmente los portátiles pueden estar activos de 2 a 3 horas. Suponiendo un tiempo de actividad *online* de dos horas en un tiempo de observación de 10 horas, tenemos valores de CM cinco veces mayores. En nuestro ejemplo de *Skyways* tenemos un valor de CM de 2550. Durante las últimas décadas, la tecnología de baterías para móviles sólo conseguido mejoras moderadas en términos de mayor capacidad y menor tamaño [3].

Existen aproximaciones dirigidas específicamente al problema de las baterías en MANETs (por ejemplo [21]). Sin embargo, si la tecnología de las baterías no mejora significativamente en el futuro, constituirá

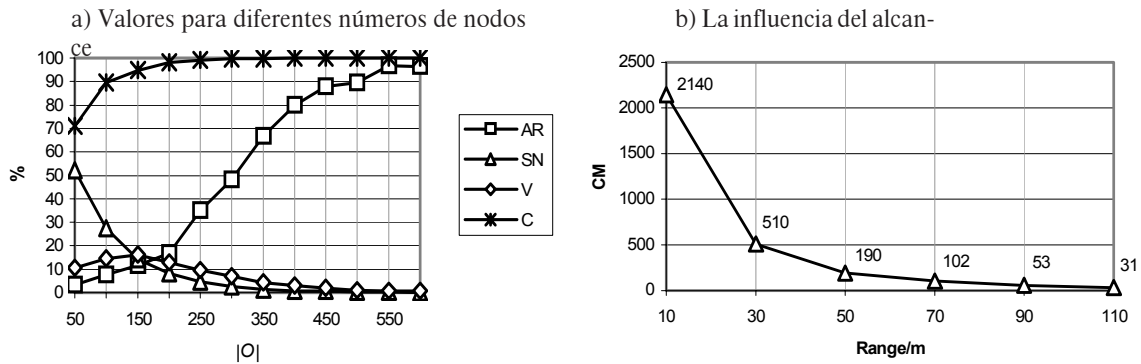


Figura 3. Resultados de la simulación de las skyways.

una importante barrera para que las MANETs sean utilizadas por comunidades más amplias.

4.4. El papel del alcance de la comunicación

Para examinar la influencia del alcance de la comunicación, realizamos una serie de simulaciones con diferentes alcances en el escenario *Skyways* y medimos *CM*. La figura 3b muestra los resultados.

Comenzamos la simulación con un alcance de 10 m., que es el alcance de los transmisores Bluetooth [19]. Una de las observaciones es que el alcance de la comunicación tiene una alta influencia en la masa crítica. Usando, por ejemplo, Bluetooth en vez de LANs inalámbricas, tenemos valores de *CM* cuatro veces mayores.

Como resultado importante, el alcance de la comunicación juega un papel importante en las redes ad hoc. Si se presuponen alcances de la comunicación irreales, podemos fácilmente formar una MANET razonable.

Sin embargo, cómo podemos ver en nuestra simulación, la masa crítica se incrementa espectacularmente cuando el alcance de la comunicación baja de cierto valor. Se podría argumentar que el alcance de la comunicación para los transmisores de radio se incrementará en el futuro.

Sin embargo al tener mayores alcances de comunicación más nodos utilizarán los mismos recursos de radio (por ejemplo frecuencia), por lo que aumentará el número de colisiones no deseadas. Como resultado, el alcance de la comunicación no puede superar cierto valor, que dependerá del número potencial de nodos de comunicación.

5. Conclusión y trabajos futuros

En este artículo hemos introducido una serie de métricas para medir la calidad de las MANETs. Estas métricas pueden usarse como herramienta para responder a preguntas tales como "¿Cuántos nodos son necesarios en un área específica para obtener una MANET razonable?" o "¿Qué al-

cance de la comunicación se requiere si tenemos un determinado número de nodos?". Estas métricas, junto a la herramienta de simulación, podrían ayudar a quienes planeen crear una MANET a la hora de investigar el efecto de parámetros relevantes.

Hemos realizado una serie de simulaciones en escenarios diferentes. Una observación es que se requiere un alto número de nodos para conseguir una conectividad útil entre usuarios. Este número incluso se eleva si tomamos en cuenta que los nodos móviles pueden no estar activos todo el tiempo o que tenemos alcances de comunicación pequeños (por ejemplo con Bluetooth). Como resultado general, la idea misma de las redes ad hoc es cuestionable en muchos escenarios.

El trabajo tiene actualmente un carácter analítico. Pudimos comprobar qué escenarios concretos conducen a MANETs razonables y cuáles no. Éste es un punto de partida para explorar alternativas y variaciones a las MANETs.

Referencias

[1] **Ad hoc Mobile Network Simulator**, <<http://www.cs.ucsb.edu/~nearchos/adhoc.html>>.
 [2] **J. Broch, D.A. Maltz, D.B. Johnson, Y.-C. Hu, J. Jetcheva**. A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols, *Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '98)*, October 1998
 [3] **I. Buchmann**. *Batteries in a Portable World*, Cadex Electronics, September 1997
 [4] **I. Chatzigiannakis, S. Nikolettseas, N. Paspallis, P. Spirakis, C. Zaroliagis**. *An Experimental Study of Basic Communication Protocols in Ad hoc Mobile Networks*, LNCS 2141, Springer-Verlag, pp. 159-171, 2001.
 [5] **M.S. Corson, A. Ephremides**. A Distributed Routing Algorithm for Mobile Radio Networks, *Proceedings of the IEEE Military Communications Conference (MILCOM '89)*, October 1989.
 [6] **E. Gafni, D. Bertsekas**. Distributed Algorithms for Generating Loop-free Routes in Networks with Frequently Changing Topology, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 29, Nr. 1, January 1981, pp. 11-15.
 [7] **M. Glossglauser, D. Tse**. Mobility Increases the Capacity of Ad hoc Wireless Networks, INFO-

COM 2001. *Proceedings. IEEE*, Volume: 3, 2001: 1360-1369.

[8] **P. Gupta, P. Kumar**. The Capacity of Wireless Networks, *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(2), March 2000, pp. 388-404.

[9] **IEEE**, Standard 802.11b: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band, 1999, <<http://www.ieee.org>>.

[10] **IETF MANET Charter**, <<http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>>.

[11] **P. Jacquet, P. Muhlethaler, A. Qayyum, A. Laouiti, L. Viennot, T. Clausen**. Optimized Link State Routing Protocol, <<http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>>.

[12] **L. Jinyang, C. Blake, D. De Couto, H. Lee, R. Morris**. Capacity of Ad hoc Wireless Networks, *Proc. ACM/IEEE MOBICOM*, Rome, Italy, July 2001.

[13] **D.B. Johnson, D.A. Maltz, Y.-C. Hu, J.G. Jetcheva**. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks, <<http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>>.

[14] **H. Lundgren, D. Lundberg, J. Nielsen, E. Nordström, C. Tschudin**. A Large-scale Testbed for Reproducible Ad hoc Protocol Evaluations, Uppsala University, Department of Information Technology, Technical report 2001-029, November 2001.

[15] **Minneapolis Skyway Maps**, <<http://www.downtown-mpls.com/>>.

[16] **V.D. Park, M.S. Corson**. A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks, *Proceedings of the IEEE INFOCOM '97*, Kobe, Japan, April 1997.

[17] **C.E. Perkins, P. Bhagwat**. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSRV) for Mobile Computers, *Proc. of the SIGCOMM '94 Conference on Communications, Architectures Protocols and Applications*, August. 1994, pp. 234-244.

[18] **P. Santi, D. Blough, F. Vainstein**. A Probabilistic Analysis for the Range Assignment Problem in Ad Hoc Networks, *Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, Long Beach, October 2001, pp. 212-220.

[19] **Specification of the Bluetooth System**, Version 1.1, December 2000, <<http://www.bluetooth.com>>.

[20] **The Network Simulator - ns-2**, <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>>.

[21] **C.K. Toh, V. Vassiliou**. *The Effects of Beaconing on the Battery Life of Ad Hoc Mobile Computers*, in Perkins, C. (ed), *Ad Hoc Networking*, Addison-Wesley, 2001

[22] **XIRCOM Wireless LAN Module for Palm m500 Series Handhelds**, Technical Description, <http://www.intel.com/network/connectivity/products/handheld_adapters.htm>.