Las Redes Ad-Hoc Inalámbricas y sus Límites

J.J. Vinagre, A.G. Marqués y A.J. Caamaño
Universidad Rey Juan Carlos, Madrid
Ponencia

Resumen

Bajo una perspectiva tradicional, una red de comunicaciones puede concebirse como un conjunto de dispositivos que ofrecen servicios de comunicación a usuarios externos. De esta forma, el conjunto de parámetros que deben ser considerados para su diseño, operación y consecución de los niveles de calidad exigidos se restringe al ámbito interno de la misma, limitando el papel de los usuarios a un mero acceso a la red bajo ciertas condiciones impuestas. En un principio se reclamó movilidad, más tarde diversidad de medios y contenidos y por último libertad para el establecimiento de sus propias redes que atiendan necesidades concretas en tiempo y espacio. Este requerimiento hace necesarios nuevos esquemas en los que la red estÈ conformada únicamente por dispositivos terminales, que actuen por tanto como *nodos* sin infraestructura externa y fija, y cuyo despliegue sea sencillo y de bajo coste. Todo ello obliga a una respuesta tecnológica que desplace el control de dichas comunicaciones hacia los extremos más periféricos de las redes.

I. Redes Ad Hoc Inalámbricas

Las primeras experiencias en este campo se deben a la *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) que desarrolló durante la década de los 70 la llamada Red Radio de Paquetes (*Packet Radio Network*) para comunicaciones entre vehículos en movimiento. Este concepto de redes carentes de infraestructura cableada para la comunicación derivó en las conocidas como *Redes Ad Hoc Inalámbricas*. Ya en su propio término queda reflejada la característica principal de su comportamiento y aplicación: *Ad Hoc*. Esta expresión está contenida en el estándar 802.11 del *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) [1], donde se contempla la configuración de operación independiente -ad hoc- de las estaciones en la capa de Control de Acceso al Medio (MAC), de tal forma que sea posible la comunicación directa entre ellas. Esta visión es reforzada en la definición aportada por la *Internet Engineering Task Force* (IETF) en [2] donde se añade la movilidad de los nodos a la definición. Sin embargo, el requerimiento de contar con Redes Ad Hoc Inalámbricas no produce una mera posibilidad teórica sino que desencadena una serie de desarrollos específicos en esta área. La muestra más evidente del interés en este tipo de redes es la existencia de iniciativas de estandarización de distintas particularizaciones de las mismas. Así, el propio grupo de trabajo del 802.11 generó una extensión bajo el nombre de IEEE 802.11s, que incluye la definición de las llamadas *redes malladas* (*mesh*), caracterizadas por permitir la comunicación a través de topologías multisalto autoconfigurables. El primer borrador de dicho estándar fue admitido como tal en marzo de 2006 -versión D0.01- y en la actualidad se encuentra en su versión D1.00. Por su parte, dentro del grupo de trabajo del IEEE dedicado a las Redes de ¡rea Personal (PAN) también se dedican esfuerzos orientados en el sentido de las redes malladas (802.15.5). Dentro de este mismo grupo, se incluye asimismo el IEEE 802.15.4 -la última versión del cual, 802.15.4-2006, fue publicada en septiembre de 2006- dedicado a las PAN de baja tasa. Entre éstas se encuentran las Redes de Sensores (WSN), de máximo auge hoy en día. Este estándar recoge las capas física (PHY) y de control de acceso al medio (MAC) y está respaldado por la Alianza ZigBee, que cuenta entre sus promotores con empresas como Philips, Honeywell, Siemens, Texas Instruments, Schneider Electric, Samsung, Motorola, Mitsubishi o Freescale. La especificación ZigBee recoge aspectos relacionados con la capas de red y superiores para la creación de redes de baja tasa y mínima complejidad, coste y consumo de potencia, destinadas primordialmente a aplicaciones de monitorización y control.

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

II. Encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas

Sobre las bases expuestas anteriormente, el encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas debe satisfacer ciertos objetivos [3]:

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

Además, debe admitir diversos modos de operación [2]:

- Distribuido: el fundamental, dada la estructura de la red.
- Bajo demanda: la adaptación del encaminamiento a los patrones de tráfico particulares de cada situación hace posible reducir el gasto de ancho de banda y energía, aunque se amplía el tiempo de obtención de la ruta.
- Activo: solventa el problema anterior y cubre aplicaciones que necesitan de un envío sistemático de datos, como monitorización ambiental, por ejemplo.

- De período de sueño: con el objetivo de preservar su energía, los nodos pueden pasar a un estado de sueño en el que sus funcionalidades de emisión y recepción se encuentran parcialmente inactivas hasta cierto grado.

Con estos propósitos se ha desarrollado una gran cantidad de protocolos de encaminamiento que optan por criterios de diseño en distintas líneas. De este modo, puede sugerirse una serie de taxonomías de protocolos de encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas. A continuación se recogen diferentes aproximaciones publicadas a este respecto -[4], [5], [6], [7] y [8]- en una propuesta nueva de catalogación de protocolos de encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas. La Figura 1 presenta el esquema formulado, especificando algunos de los protocolos representativos de cada categoría.

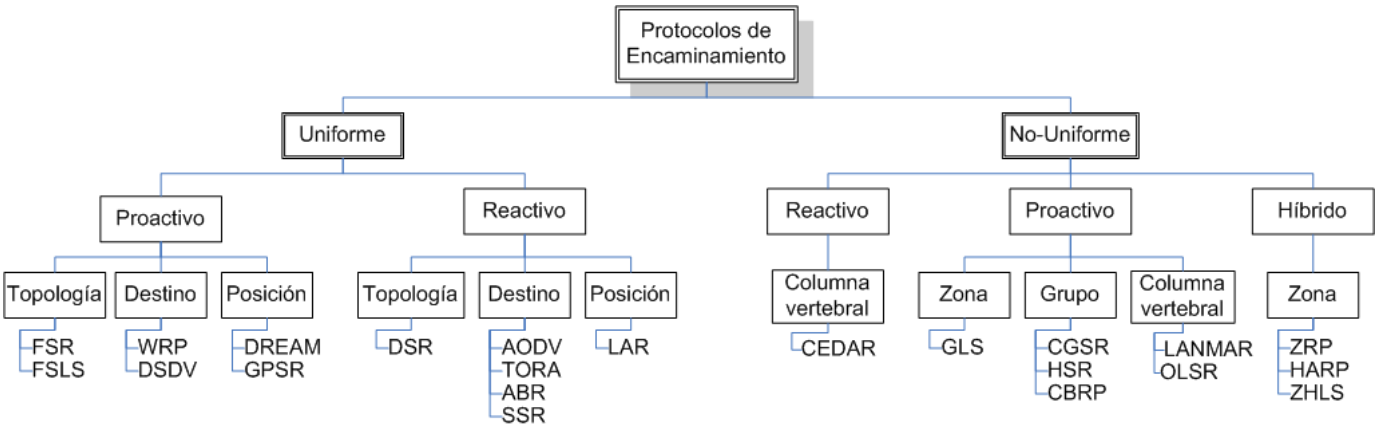

Figura 1. Taxonomía de protocolos de encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas.

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

- *Uniforme*: o de estructura plana. Todos los nodos de la red desempeñan iguales funciones y poseen las mismas características. En este caso, no se incurre en ningún coste de mantenimiento de la estructura de la red; sin embargo, se adaptan en muy poca medida a ampliaciones conservando sus mismas prestaciones.
- *No uniforme*: propios de estructuras jerárquicas en las que algunos nodos desarrollan papeles especiales e incluso pueden dotarse de capacidades particulares en términos de cómputo, energía o almacenamiento entre otros. Esto les permite soportar algoritmos más complejos, reducir la sobrecarga debida a la comunicación y ofrecer la posibilidad de balanceo de carga mientras mantienen sus características incluso ante incrementos del número de nodos en la red; por el contrario, generan cierto coste de mantenimiento de la estructura y necesitan en muchos casos la disponibilidad de nodos heterogéneos.

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

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

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

- *Topología*: los nodos mantienen información referida al conjunto global de la red. Un grupo importante de estos protocolos son los basados en el estado del enlace, en los que la información sobre las conexiones establecidas por cada nodo con sus vecinos es diseminada a lo largo de la red de tal forma que cualquier nodo conozca el esquema de enlaces de la misma. Esta aproximación no se adapta de forma óptima al carácter dinámico de este tipo de redes; sin embargo, una información de tal calibre incide muy positivamente en la selección de la mejor ruta, el balanceo de carga o la gestión de la calidad del servicio.
- *Destino*: el conocimiento en este caso se restringe al ámbito local. El grupo más numeroso de entre esta clase de protocolos son los llamados “distancia-vector” dado que, en lugar de rutas completas, mantienen cierta medida de la distancia hasta distintos destinos -generalmente el número de saltos mínimo- y el vector de dirección hacia ellos -el identificador del nodo del salto siguiente-.

- *Posición*: el conocimiento de cada nodo se basa en las coordenadas geográficas de sí mismo y del resto. El principio del encaminamiento consiste en la aproximación secuencial hacia el destino mediante la implementación de saltos al vecino que esté más próximo a éste. En redes de topología homogénea resulta una técnica muy eficiente; sin embargo, en presencia de discontinuidades u obstáculos debe apoyarse en algoritmos específicos para mejorar su rendimiento; al mismo tiempo, esta aproximación requiere un sistema de posicionamiento absoluto o relativo, lo cual limita considerablemente su aplicación.

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

- *Zona*: los nodos son agrupados según la zona geográfica que ocupan. Así, se reduce la sobrecarga de mantenimiento de ruta al ámbito local de la misma. Una vez más, es necesario el conocimiento de la posición de los nodos y el consiguiente sistema que lo provea.
- *Grupo*: la asociación de nodos se realiza en torno a uno de ellos (*clusterhead*) que actúa como líder del grupo, responsabilizándose del alta y la baja de nodos en el grupo y de ciertas funciones jerarquizadas del encaminamiento. Esta jerarquía reduce la sobrecarga de control de la red a partir de nodos que, en la mayoría de los casos, requieren capacidades más amplias que las del resto.
- *Columna vertebral*: un conjunto de nodos son seleccionados dinámicamente para conformar una columna vertebral (*backbone*) de la red. A dichos nodos se les asignan funciones especiales como la construcción de caminos y la propagación de paquetes de control y datos. El resto de nodos se apoya en éstos para realizar su establecimiento de ruta para la comunicación deseada. Una vez más, se logra una alta capacidad de adaptación a las ampliaciones de la red y un control del encaminamiento a un menor coste; por el contrario, sigue incurriéndose en cierto gasto de mantenimiento de la estructura.

III. Una perspectiva global del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas

El objetivo principal del encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas es encontrar rutas óptimas en relación con un parámetro o conjunto de parámetros determinado. El nivel más básico de estos parámetros lo ocupa la capacidad para construir un camino lo más cercano a la línea recta que une fuente y destino. Esta capacidad es denominada *eficiencia de encaminamiento* y no debe circunscribirse exclusivamente al protocolo que gobierna la operación de los nodos en lo concerniente a la búsqueda y transporte de la información mediante distintos saltos. Existen interrelaciones entre capas que no se restringen al ámbito del encaminamiento sino que se producen asimismo entre otros parámetros. La Figura 2 refleja dichas interrelaciones entre las capas PHY, MAC y de RED del modelo OSI, que en algunos casos resultan fundamentales para la operación de una Red Ad Hoc Inalámbrica.

		PHY						MAC		RED					
		Pot. TX	Topo logía	Desva necim.	Movi lidad	BER	Cons. Energ.	Interfe rencia	Nº ReTX	Multi salto	Tasa transf.	Re tardo	Equi dad	Segu ridad	Enca minam
PHY	Pot. TX														
	Topología														
	Desvanec.														
	Movilidad		x												
	BER	x	x	x	x										
	Con. Ener.	x			x										
MAC	Interfer.	x	x		x	x									
	Nº ReTX	x			x	x	x	x							
RED	Multisalto	x		x	x	x	x	x							
	Tasa trans		x		x	x		x	x						
	Retardo		x		x				x	x					
	Equidad										x	x			
	Seguridad	x								x					
	Encamin.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

Figura 2. Tabla de interrelaciones entre parámetros de las capas PHY, MAC y RED.

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

- *Teoría de la Información*: estudia la capacidad del canal. Esta se particulariza en la capacidad de transporte de la red, para la que se establece un límite en $\Theta(\sqrt{N})$, que denota su tendencia hacia $\sqrt{N}$ cuando $N \rightarrow \infty$. Esta capacidad de transporte de la red se concreta en $\Theta(1/\sqrt{N})$ para cada uno de los N nodos de la misma [9].
- *Teoría de la Comunicación*: se ocupa del cálculo analítico de parámetros como *BER*, *SINR* (relación señal a ruido más interferencia) que caracterizan las prestaciones reales de un sistema de comunicaciones. Bajo esta visión, el encaminamiento es estudiado como una sucesión de enlaces con unos determinados valores de BER o SINR, que se acumulan a lo largo de la ruta establecida.
- *Teoría de Grafos*: una Red Ad Hoc Inalámbrica se observa como un conjunto de puntos interconectados según un patrón particular. El objetivo por tanto es la determinación del camino óptimo entre dos puntos de un grafo con base en métricas como el camino más corto.
- *Teoría del Control*: interpreta una Red Ad Hoc Inalámbrica como un sistema en continua variación cuyas componentes deben ser ajustadas de forma dinámica.

IV. Modelos y Límites

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

mayor parte de los casos- puede actuar como fuente o destino de forma indiscriminada y variable en el tiempo. Asimismo, dados su carácter denso y la restricción impuesta como objetivo prioritario para este tipo de redes, la potencia de transmisión no puede tomar valores elevados para evitar un alto nivel de interferencias y un consumo energético inaceptable, respectivamente. Por estos motivos, el destino no puede ser alcanzado en un único salto y, así, se debe recurrir a esquemas multisalto para efectuar el envío de información de fuente a destino.

Es por tanto necesaria la inclusión del concepto de encaminamiento como responsable de la toma de decisiones sobre la dirección en la que transmitir la información en cada salto. La variable que mide este acercamiento se denomina *progreso* y se define como la componente en la dirección de la recta que une fuente y destino de la distancia recorrida [10]. El objetivo principal del encaminamiento bajo este punto de vista es que se produzca un progreso secuencial hasta el destino que minimice el número de saltos dentro de los límites impuestos por los niveles de interferencia generados. En consecuencia, debe determinarse el rango de cobertura de cada nodo con base en unos criterios que aseguren la optimización de la capacidad de la red en función de la relación entre el progreso en cada salto y el porcentaje de transmisiones efectuadas con éxito sobre el escenario de interferencias producido. El trabajo en [10] se centra en este aspecto, aún en el ámbito de las Redes Radio de Paquetes, precursoras de las actuales Redes Ad Hoc Inalámbricas. En el mismo, se describe un modelo para el cálculo del radio de cobertura que maximiza la capacidad de una Red Radio de Paquetes, llegando a la conclusión de que el número medio de vecinos óptimo es aproximadamente 6, $n \approx 6$. Este llamado "número mágico" es recalculado en [11] y establecido en 8 a partir del compromiso entre la probabilidad de realizar una transmisión con éxito, que decae con la inversa del número de vecinos, $1/n$, y el progreso, proporcional a $\sqrt{n}$.

Adicionalmente, la consideración acerca del radio de cobertura de los nodos no sólo repercute en la capacidad de la red sino en un parámetro incluso más esencial que éste, su conectividad, como premisa fundamental para que se produzca la comunicación en una Red Ad Hoc Inalámbrica. Con este fin, en [12] se establece que, por debajo de $0{,}074 \log N$ vecinos por nodo, donde N es el número de nodos en la red, la probabilidad de que ésta esté desconectada converge a 1 con $N \to \infty$; al mismo tiempo, la red muestra una conectividad asintótica asegurando un número de vecinos por nodo superior a $5{,}1774 \log N$.

El estudio relativo a radios de cobertura, conectividad de la red y distancias entre nodos reflexiona sobre el encaminamiento en el ámbito de cada salto individual que es implementado. Por consiguiente, el siguiente paso del análisis debe considerar la extensión de este enfoque hasta la ruta completa, formada por una serie de saltos individuales. Éste es el punto de partida de [13], que se concreta en la caracterización mediante una función Gamma generalizada de la distribución de distancias al vecino n-ésimo para redes infinitas con despliegues de nodos aleatorios y uniformes. Asimismo, se presenta un listado de factores como interferencia, encaminamiento o número óptimo de saltos, entre otros, que pueden ser analizados con base en los resultados obtenidos.

La observación del número de saltos en una red recae dentro de los límites del análisis de una ruta como tal. Sin embargo, este parámetro no ofrece una representación unívoca de las capacidades del encaminamiento ya que, como se muestra en [14], tan sólo puede establecerse una acotación de la relación entre el mismo y la distancia. Éste es el objeto de [15], que propone un modelo teórico para estimar la longitud de los caminos construidos en una red unidimensional mediante protocolos de encaminamiento que implementan el descubrimiento de ruta mediante técnicas de inundación. Bajo estas condiciones, se alcanza una relación entre la longitud del camino, L, y la distancia que separa fuente y destino, R, de la forma $L = \frac{4}{3}R$.

V. Conclusiones

En los trabajos aquí revisados, se puede obserbar que, si bien los trabajos teóricos ofrecen modelos excesivamente simplificados, sus predicciones limitan bastante los grados de libertad en el despliegue de las Redes Ad-Hoc Inalámbricas. Por otra parte, en los trabajos experimentales o de simulación, los modelos suelen ser muy específicos y con un gran número de parámetros libres que no ayudan a establecer límites concretos a las prestaciones de dichas redes. Se observa por tanto una necesidad clara de seguir investigando en un campo que apenas ha empezado a dar sus primeros frutos.

Referencias

[1] I. C. Society, "Ieee std 802.11-1997 information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements-part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications," Tech. Rep., Noviembre 1997. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5258

[2] S. Corson and J. Macker, "Mobile ad hoc networking (manet): Routing protocol performance issues and evaluation considerations," RFC 2501 Memo del IETF Network Working Group, Enero 1999.

[3] S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, and I. Stojmenovic, *Mobile Ad Hoc Networking*. Wiley-IEEE Press, Agosto 2004, ch. 10, pp. 275–300.

[4] S. Ramanathan and M. Steenstrup, "A survey of routing techniques for mobile communications networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 89–104, 1996.

[5] E. M. Royer and C. K. Toh, "A review of current routing protocols for ad-hoc mobile wireless networks," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 2, pp. 46–55, Abril 1999.

[6] L. M. Feeney, "A taxonomy for routing protocols in mobile ad hoc networks," SICS Technical Report T99/07, Octubre 1999.

[7] C. Liu and J. Kaiser, "A survey of mobile ad hoc network routing protocols," Universidad de Ulm, Technical Report TR-4. Nr. 2003-08, Octubre 2003.

[8] D. Lang, "A comprehensive overview about selected ad-hoc networking routing protocols," Universidad Tica de Munich, Technical Report. Department of Computer Science, Marzo 2003.

[9] P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388–404, Marzo 2000.

[10] L. Kleinrock and J. A. Silvester, "Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number," in *National Telecommunications Conference*, Birminghan, EE.UU., Diciembre 1978, pp. 4.3.1–4.3.5.

[11] H. Takagi and L. Kleinrock, "Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals," *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-32, no. 3, pp. 246–257, Marzo 1984.

[12] F. Xue and P. R. Kumar, "The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks," *Wireless Networks*, vol. 10, no. 2, pp. 169–181, Marzo 2004.

[13] M. Haenggi, "On distances in uniformly random networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 51, no. 10, pp. 3584–3586, Octubre 2005.

[14] S. De, "On hop count and euclidean distance in greedy forwarding in wireless ad hoc networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 11, pp. 1000–1002, Noviembre 2005.

[15] T. Clausen, P. Jacquet, and L. Viennot, "Optimizing route length in reactive protocols for ad hhoc networks," in *Proceedings of the First Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop*, Septiembre 2002, pp. 496–507.