

# Propuesta de un protocolo de comunicaciones manet entre robots móviles usando teoría de nodos

Roberto Ferro Escobar<sup>1</sup>  
Andrés Rodríguez Fonseca<sup>2</sup>  
Ricardo González<sup>3</sup>

## Resumen

Cada vez son más los ámbitos en que los robots realizan tareas y no solo trabajan como entes autónomos sino además son partes de un grupo de trabajo, por tanto en el presente documento se describe un protocolo de capa de aplicación para la planeación de rutas de entrega o movilidad de un producto entre robots móviles, sobre el estándar IEEE 802.11[1] modo AD-HOC.

## Abstract

There are more and more areas in robots perform tasks and not only work autonomous entities but also are part of a working group, so in this paper describes an application layer protocol for the planning of delivery routes or mobility of an product among mobile robots, Over the IEEE 802.11 standard AD-HOC mode.

Index Terms—Adhoc, MANET, protocolo, robots móviles.



1 rferro@udistrital.edu.co  
2 aarodriguezf@correo.udistrital.edu.co  
3 gonzalez.ricardo@fuac.edu.co

## Introducción

EL aumento de las funciones incorporadas en robots móviles como NAO [1] al agregar el estándar IEEE 802.11 conlleva a la creación de redes móviles MANET (Redes Móviles Ad Hoc), redes simples, inalámbricas y de uso temporal sin la necesidad de contar con infraestructura de red adicional a la ya incorporada por el robot [2].

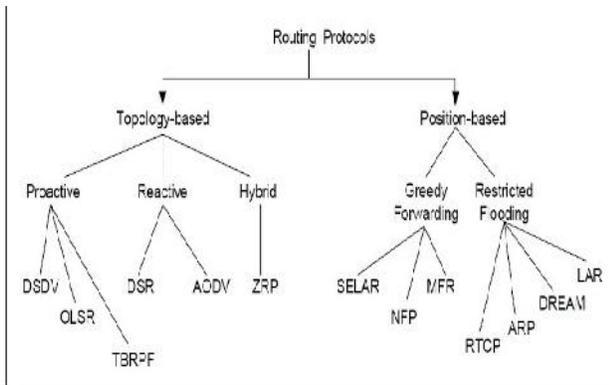


Fig. 1. Resumen de las clases y protocolos de redes ad hoc [5]

Lo que desde el punto de vista práctico, puede simular la comunicación humana con los beneficios que posee el estándar WiFi en modo Ad-Hoc como protocolos de acceso al medio, corrección de errores, encriptación de información y protocolos de enrutamiento para hacer llegar la información donde se necesite [3].

En el presente documento se describen algunos protocolos de enrutamiento necesarios para que los nodos móviles, en este caso los robots reciban o dirijan la información en caso de que no sea para este, al igual que un modelo de protocolo de capa superior encargado de controlar la información de posición y viabilidad de movimiento, con el cual cada nodo decide hacia donde debe dirigir la entrega física del producto.

## Protocolos de enrutamiento en Manet

Generalmente, hay dos etapas diferentes en el enrutamiento; que son descubrimiento de ruta y de reenvío de datos. En el descubrimiento de ruta el destino se encuentra mediante la difusión de la consulta. Una vez se ha establecido la ruta, el envío de datos se inicia a través de las rutas que se han determinado. Los nodos que reciben la consulta la difunden a todos los vecinos, por tanto se transmite gran número de mensajes de control. Lo cual se complica aún más si los nodos se mueven y nuevas rutas deben ser recalculadas.[4]

Los protocolos de enrutamiento se dividen en dos grandes categorías “*Topology-based*” y “*Position-based*”. Los cuales hacen referencia a la topología de red, con base a la información de los enlaces de la red y la información física acerca de los nodos participantes, respectivamente [5].

Los protocolos o algoritmos de enrutamiento basados en la topología a su vez se dividen en proactivos, reactivos o híbrido.

**Proactivos:** Esta clasificación hace referencia a la capacidad de mantener actualizadas las tablas de enrutamiento a través de envíos de paquetes en intervalos de tiempo fijos, lo cual es bueno al tener disponibles rutas en todo momento, pero la desventaja está en invadir el ancho de banda del canal.

**Reactivos:** Invocando un procedimiento para determinar el correcto direccionamiento sólo en el momento en el que el paquete deba efectivamente transmitirse. De este modo, se reduce el tráfico de señalización en detrimento de un aumento de los tiempos de entrega [5].

**Híbrido:** Como dice su nombre, busca unir las ventajas de ambos protocolos precedentes, limitando la aplicación de algoritmos proactivos sólo a los nodos adyacentes del que quiere transmitir.

Por su parte los protocolos basados en la posición física se dividen en reenvío codicioso e inundación restringida.

**Reenvío codicioso:** Serán seleccionados los nodos que tienen el mejor progreso y el paquete de datos se remitirán a estos nodos. Idealmente, este proceso se repite hasta que el paquete llegue al destino, cabe destacar que no hay descubrimiento de ruta en el reenvío codicioso.

**Inundación restringida:** Para mitigar el problema de broadcast sólo unos nodos en la dirección del destino participará en el descubrimiento de ruta hasta que se encuentra la ruta de destino. La participación de los nodos de enrutamiento optimizará la radiodifusión en MANET. Inundación restringida transmite mensajes a un número seleccionado de nodos que es por lo general, los que se encuentran más cerca del destino. Esto reduce significativamente no sólo el consumo de energía, sino también la probabilidad de colisiones de paquetes [4].

## Métricas en protocolos aplicables a MANET

Las métricas son parámetros de comparación que posibilitan la elección de la ruta más conveniente para la transmisión de los datos. Las más utilizadas son las métricas basadas en la topología de la red y aquellas que se basan en la utilización de mediciones de sondeo activo.[6]. A continuación se describen:

**Número de saltos:** Su facilidad de implementación ha hecho que sea la métrica más utilizada en cualquier tipo de red. Cada enlace cuenta como una unidad, y el peso del trayecto es igual al número total de nodos que se encuentren en este. El fundamento para minimizar la métrica del número de saltos es sencillo. Menos saltos en la ruta de datos deben implicar una menor demora, un mayor throughput y menos desperdicio de recursos de red sin importar las características técnicas de enlace [7].

**Signal Strength:** La intensidad de señal se ha utilizado como métrica de calidad del enlace en varios esquemas de direccionamiento inalámbricas en malla. La hipótesis es: Se recibe un paquete con éxito cuando la potencia de la señal supera un cierto valor umbral, la potencia de la señal podría ser vista como un buen indicador de la calidad del enlace. Las tarjetas de red inalámbricas básicas proporcionan un valor de intensidad de señal media recibida por cada paquete recibido con éxito. Los valores de intensidad de señal se han utilizado en el enrutamiento de dos maneras diferentes:

- Como parámetros de control para la exclusión de rutas con “mala” calidad del enlace.
- Como métrica de enrutamiento convencional, en la función de coste se toma como uno de los parámetros de entrada la intensidad de la señal [7].

**Round Trip Time (RTT) por Salto:** Esta métrica refleja la demora bidireccional en un enlace. Para poder medir el RTT, se envía periódicamente a cada nodo vecino un paquete de sondeo con un valor de timestamp, el cual cada nodo retorna inmediatamente. Esta respuesta posibilita que el nodo emisor calcule el valor de RTT. La métrica de trayecto RTT es simplemente la suma de cada uno de los valores de RTT estimados en cada enlace de la ruta. Esta es una métrica dependiente de la carga, ya que abarca las colas, la contención del canal y las demoras de retransmisión. Además de la sobrecarga de la red relacionada al envío de paquetes de sondeo, la desventaja de emplear RTT como métrica de enrutamiento es que puede llevar

a una inestabilidad de la ruta (fenómeno de auto-interferencia) [7].

**ETX (Expected Transmission Count):** Es una de las pocas métricas que se han implementado en la práctica. ETX estima el número requerido de transmisiones (incluyendo las retransmisiones) para enviar un paquete a través de un enlace. Minimizar el número de transmisiones no solo optimiza el throughput general de la red, sino que también minimiza el consumo total de energía y la interferencia resultante. Si  $df$  es la razón de entrega de paquetes hacia adelante y  $dr$  la razón de entrega en reversa (por ejemplo, la probabilidad de que la confirmación de un paquete sea transmitida satisfactoriamente), entonces la probabilidad de que un paquete arribe y sea confirmado correctamente es  $df \times dr$ , quedando definida la métrica ETX como:

$$ETX = \frac{1}{df \times dr} \quad (1)$$

Las razones de entrega son calculadas utilizando paquetes de sondeo de capa de enlace enviados por difusión. El valor de ETX para una ruta se define como la suma de los valores de las métricas de los enlaces que conforman esa ruta. Las principales ventajas de la métrica ETX son su independencia con respecto a la carga del enlace (inmune al fenómeno de auto-interferencia) y que toma en cuenta los enlaces asimétricos. Las desventajas esenciales de la métrica ETX es la sobrecarga de la red debido a la transmisión de los paquetes de sondeo y que esta sólo es relevante para las interfaces de radio que realizan retransmisiones.[7]

**ETT (Expected Transmission Time) y WCETT (Weighted Cumulative Expected Transmission Time):** La métrica ETX no es óptima bajo algunas circunstancias, por ejemplo, ETX preferirá enlaces altamente congestionados a enlaces libres si la razón de pérdida de paquetes de los enlaces congestionados es menor que la de los enlaces libres, y esto no es deseable. Para afrontar esta dificultad se propuso la métrica ETT, que incorpora el throughput a sus cálculos. Esta métrica depende del tamaño del paquete de sondeo, del ancho de banda medido en un enlace y de la propia métrica ETX.

Como muchas tecnologías inalámbricas, incluyendo WiFi, proveen múltiples canales sin solapamiento, se ha propuesto una adaptación de la métrica que toma en cuenta el uso de múltiples canales, denominada Weighted Cumulative ETT (WCETT). Esta métrica utiliza un parámetro ajustable para balancear los

pesos, y un número que representa el número de veces que el canal es utilizado o se ha experimentado interferencia intra-flujo en ese canal. WCETT define un menor costo para las rutas que utilizan canales más diversificados con menos interferencia intra-flujo [7].

MIC (Metric of Interference and Channel switching): La métrica MIC supera a la métrica WCETT al abordar el problema de las interferencias intra-flujo e inter-flujo. Está basada en el valor mínimo de ETT en la red, el uso de la interfaz de radio y el costo de la conmutación de canal. MIC depende específicamente de los parámetros IRU (Interference-aware Resource Usage) y CSC (Channel Switching Cost). La métrica MIC provee un mejor rendimiento debido a que considera las interferencias intra y extra-flujo y la diversidad de canal. La principal desventaja es la elevada sobrecarga que se necesita para estimar el valor de la métrica para cada ruta. Otras desventajas son que cada nodo debe conocer el total de nodos en la red, lo que puede ser muy costoso en redes de gran tamaño, y que el rango de interferencia es siempre mucho mayor que el rango de transmisión [7].

### Protocolos más usados

#### Proactivos:

DSDV: Destination-Sequenced Distance Vector.  
OLSR: Optimized Link State Routing.

TBRPF: Topology broadcast based on reverse-path forwarding.

BATMAN: Better Approach to Mobile Ad hoc Networking

DREAM: Distance Routing Effect Algorithm for Mobility[6]

#### Reactivos:

AODV: Ad hoc On demand Distance Vector routing.  
DSR: Dynamic Source Routing.

#### Híbridos:

ZRP: Zone Based Routing Protocol.

#### Reenvío codicioso:

SELAR: Scalable energy-efficient location aided.

NFP: Nearest Forward Progress.

MRF: Most Forward within Radius.

#### Inundación restringida:

RTCP: Real-Time Transport Control Protocol.

DREAM: A distance effect algorithm for mobility.

LAR: Location-Aided Routin

### Necesidades de enrutamiento de la aplicaciones

Las topologías que puede describir la red de robots móviles son demasiadas y dependen de los grados de libertad que pueda tener el robot, por lo cual pensar en un protocolo proactivo es gastar mucho ancho de banda en actualizaciones de rutas cada vez que los robots se desplacen.

Por lo cual se elige el protocolo reactivo AODV como protocolo de enrutamiento sobre a red AD-HOC.

### Análisis de protocolos AODV

#### Protocolo AODV (Ad-Hoc On DemandDistance Vector)

Es un protocolo de encaminamiento IP basado en DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector) y DSR(Dynamic Source Routing) [8] que permite a un nodo encontrar y mantener rutas hacia otro nodo la red. AODV es on-demand, o reactivo, en el sentido de que las rutas se establecen sólo cuando se necesitan (cuando la estación origen quiere transmitir datos a un destino). Las decisiones de encaminamiento se hacen usando vectores distancia, es decir distancias medidas en saltos a todos los nodos disponibles. El protocolo soporta unicast y broadcast. Dicho protocolo esta descrito en RFC 3561 [9].

Cada estación mantiene un número de secuencia que guarda un timestamp, y una tabla de encaminamiento que contiene rutas hacia los destinos. Los números de secuencia se usan para determinar si una ruta es actual (cuanto mayor sea el número, más actualizada está la ruta; el más antiguo puede descartarse) y con ellos el protocolo se asegura de que no hay bucles. Cada entrada de la tabla contiene la dirección del siguiente salto (siguiente nodo hacia el destino), un contador de saltos (número de saltos hacia el destino) y un destination sequence number. Ya que es un esquema de vector-distancia on-demand, los nodos mantienen las distancias de aquellos destinos con

los que necesitan contactar o transmitir información. Cada ruta activa se asocia con un tiempo de vida almacenado en la tabla; cuando este tiempo finaliza, la ruta se marca como inválida y después se borra de la tabla para no sobrecargarla. AODV usa dos procedimientos principales, el descubrimiento de rutas y el mantenimiento de rutas [10].

### Descubrimiento de rutas:

Si el nodo fuente necesita una ruta a un destino, envía por broadcast un mensaje ROUTE REQUEST (RREQ). Cada nodo también guarda un identificador de broadcast que, junto con la dirección IP del origen, identifica unívocamente a un RREQ. Cada vez que el emisor emite un RREQ, incrementa en uno su identificador de broadcast y el número de secuencia. Además, almacena este RREQ durante un tiempo PATH DISCOVERY TIME (PDT), y así no lo vuelve a procesar si un vecino se lo envía de vuelta. El emisor espera durante un tiempo NET TRAVERSAL TIME (NETT) a que le llegue un mensaje ROUTE REPLY (RREP). Si no se recibe un RREP durante este tiempo, volverá a mandar por broadcast otro RREQ hasta un número de veces RREQ TRIES. Con cada intento adicional, el tiempo de espera (NETT) se duplica.

Cuando una estación recibe un mensaje RREQ que no ha visto con anterioridad, configura una ruta de vuelta a la estación de la que proviene el RREQ. Esta ruta de vuelta tiene un valor de tiempo de vida ACTIVE ROUTE TIMEOUT (ART). La entrada en la tabla correspondiente a la ruta de vuelta se almacena con la información de la dirección de destino requerida. Si la estación que recibe este mensaje no tiene una ruta al destino, reenvía por broadcast el RREQ. Cada estación guarda el número de saltos que ha hecho el mensaje y también qué estación ha reenviado el RREQ. Si una estación recibe un RREQ que ya ha procesado, lo descarta y no lo reenvía.

Si una estación tiene una ruta a un destino, contesta enviando por unicast un mensaje RREP a la estación de la que recibió el mensaje de petición. Como el RREP se propaga de vuelta a la estación fuente, las estaciones configuran punteros hacia el destino. Cuando la estación fuente recibe el RREP, la ruta se ha establecido y los paquetes de datos pueden enviarse al destino. Opcionalmente, la estación origen puede emitir un mensaje RREP-ACK al destino para asegurarse de la fiabilidad del camino bidireccional.

### Mantenimiento de rutas:

La función del mantenimiento de rutas es proporcionar un feedback al sender en caso de que un nodo o un enlace se rompa, y así la ruta puede modificarse o redescubrirse. Una ruta puede dejar de funcionar simplemente porque uno de sus nodos se mueva. Si se mueve un nodo fuente, debe informar a todos los vecinos que necesiten este salto. Este mensaje se reenvía a todos los otros saltos y la ruta obsoleta se borra. El nodo origen debe descubrir una nueva ruta.

Una forma para que una estación guarde información de sus vecinos es usando mensajes HELLO. Estos se envían periódicamente para detectar fallos en los enlaces. Cuando se recibe una notificación de enlace roto, la estación fuente puede reiniciar el proceso de descubrimiento de rutas. Si hay un enlace roto, puede enviarse por broadcast un mensaje ROUTE ERROR (RERR) a la red. Cualquier nodo que recibe el RERR, invalida la ruta y reenvía por broadcast los mensajes de error con el destino inalcanzable a todos los nodos de la red [10].

### Modelo de protocolo de capa superior para la planeación de rutas de entrega usando teoría de nodos.

La decisión de cuál es la mejor vía que debe seguir el producto físico, está gobernada por la valoración que se le da a las mismas, dicha valoración debe obedecer a las características en particular, que solo exige una aplicación específica, sin embargo desde el punto de vista práctico puede reducirse a solo dos posición física del robot y la posibilidad de entregar el producto a su robot vecino, lo cual se denomina como métrica.

### Métrica de posición física del robot

Desde el punto de vista de la topología geométrica la forma en que se divida el campo no tiene mayor trascendencia dado que no es necesaria una división muy fina del campo, ya que las decisiones que se tomen en diferencias de decenas de centímetros serán las mismas. Por lo cual el campo de acción del conjunto de robots puede ser dividido de forma regular o no, como se observa en la figura 2. Dicha posición será anunciada por el robot como una zona de ubicación del mismo.



Fig. 2. División del campo de trabajo en espacios topológicos.[11]

Tomando como base la teoría de nodos las figura 2 muestra un grafo que se puede representar como en la figura 3.

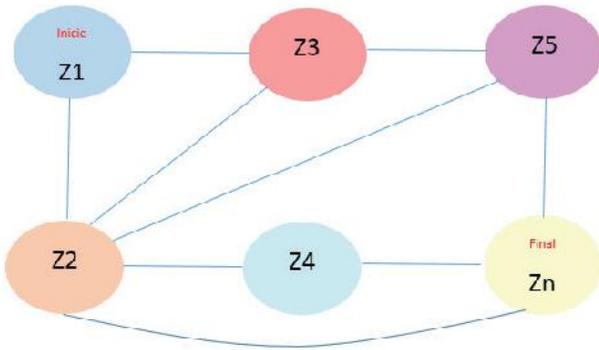


Fig. 2. Grafo que representa los cambios entre zonas de ubicación [12].

Donde los nodos son las posiciones físicas de los robots es decir la zona de ubicación y las aristas estarán valorados por la métrica de posibilidad de movimiento.

**Métrica de posibilidad de movimiento:**

El protocolo contempla el movimiento físico de un producto o bien que este manipulando el robot, buscando al robot más cercano o con mayor posibilidad de movimiento, es decir que se pueda desplazar sin tener obstáculos.

Por lo cual la métrica de movimiento hace referencia a que tan obstruido está el espacio en que se debe desplazar y será el valor que acarrearía la arista del grafo.

**Modelo funcional del protocolo:**

Protocolo calculara la ruta optima al implementar el grafo de forma lógica y darle valor a las arista basado en la información publicada por los robots que conforman la red Ad-Hoc.

Para el cálculo de la ruta optima el protocolo usa el algoritmo matemático de Dijkstra [13]. Cuya entrada es el grafo previamente determinado.

Cada robot está en la capacidad de y necesidad de correr el protocolo cuando le llega el producto que debe desplazar o entregar.

**Diagrama de Flujo**

Los pasos a seguir por el protocolo se describen a continuación y se representan en la figura 3 diagrama de flujo del protocolo.

Cuando el robot tiene en su poder el producto, solicita la ubicación y posibilidad de movimiento de cada robot.

A medida que el robot recibe la información de cada miembro de la red, la va almacenando en tablas de ruta y acusa el recibido de la misma al respectivo robot.

Cuando se posee toda la información el protocolo hace el grafo de red y corre el algoritmo del camino óptimo calculando el movimiento o a que robot debe entregar la carga, para que dicho robot repita el proceso.

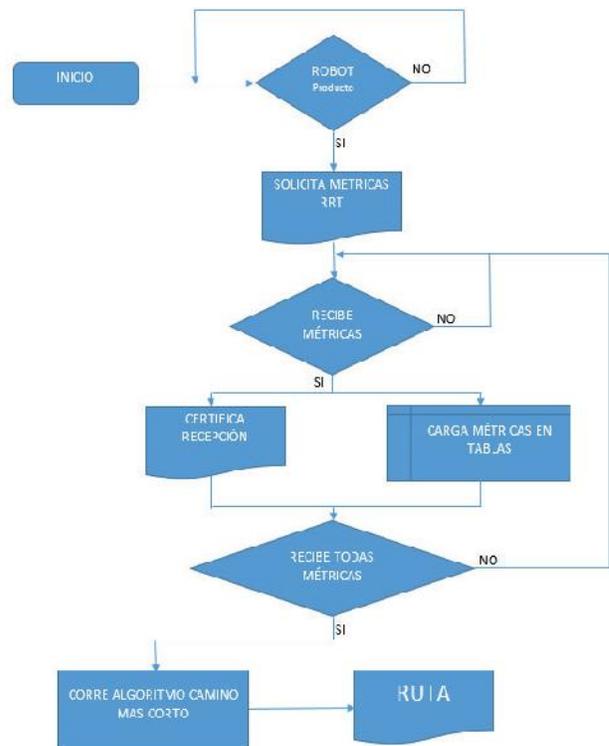


Fig. 3. Diagrama de flujo de protocolo.

## Conclusiones

El protocolo propuesto simula la interacción humana en la toma de decisiones grupales, ya que espera retroalimentación del grupo y con base en ella decide. La aplicación de la teoría de nodos a sistemas de movimiento facilita la toma de decisiones, dado que no exige medidas de posición exactas.

La teoría de grafos modela procesos de movimiento sin tener en cuenta medidas exactas, para la toma de decisiones de desplazamiento, en cambio procesa las cualidades del sistema.

Sin un protocolo de comunicación para el desarrollo de una tarea, nos es posible que entes autónomos se comporten como un equipo. La evaluación del protocolo exige que sea programado en simuladores como NS-2, donde se puede simular la red Ad.Hoc, el movimiento de los robots con posición y velocidad de desplazamiento, además puede ser programado el protocolo de capa superior mostrando los paquetes que intercambian los robots y la toma de decisiones.

## Referencias

- [1] B. Maisonnier, "Who is NAO?," <https://www.aldebaran.com/en/humanoid-robot/nao-robot>, 2015. [Online]. Available: <https://www.aldebaran.com/en/humanoid-robot/nao-robot>.
- [2] S. Corson and J. Macker, "Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations," *Comput. Syst.*, vol. 54, pp. 1–12, 1999.
- [3] R. Piermattei and B. Garcia, "Análisis de los protocolos de ruteo OLSR y AODV en redes Ad-Hoc IBSS," *Análisis los Protoc. ruteo OLSR y AODV en redes Ad-Hoc IBSS.*, pp. 620–630, 2012.
- [4] I. Chlamtac, M. Conti, and J. J. N. Liu, "Mobile ad hoc networking: Imperatives and challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 13–64, 2003.
- [5] A. Rahman and Z. Zukarnain, "Performance comparison of AODV, DSDV and I-DSDV routing protocols in mobile ad hoc networks," *Eur. J. Sci. ...*, vol. 31, no. 4, pp. 566–576, 2009.
- [6] W. Coya, Lucy & Ledesma, Talia & Garcia, "SELECCIÓN DEL PROTOCOLO DE ENRUTAMIENTO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA MANET ROUTING PROTOCOL," *Convección Cient. Ingeniería y Arquít.*, pp. 1–11, 2014.
- [7] R. B. Georgios Parissidis, Merkourios Karaliopoulos and B. P. Thrasyvoulos Spyropoulos, *Routing Metrics for Wireless Mesh Networks*. Paris, 2009.
- [8] M. Abolhasan, E. Dutkiewicz, and T. Wysocki, "A review of routing protocols for mobile ad hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 2, no. 1, pp. 1–22, 2004.
- [9] C. & B. E. & D. S. Perkins, "RFC 3561," *Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing*, 2003. [Online]. Available: [www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt](http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt).

[10] F. J. H. Pastor, "Estudio de viabilidad de la utilización de redes inalámbricas Ad-Hoc en edificios departamentales," p. 19, 2008.

[11] F. Martin, P. Barrera, G. De Rob, U. Rey, and J. Carlos, "Localización topológica basada en visión para robots móviles," *XXVII Jornadas de Automática*, vol. ISBN: 84–6, 2006.

[12] M. Farber, "TOPOLOGY OF ROBOT MOTION PLANNING Michael Farber University of Durham," no. 1987, 2005.

[13] N. Coulter, "Dijkstra algorithm as a route SPF TCL implement," *Wiki TCL*, 2013. [Online]. Available: <http://wiki.tcl.tk/38547>.

## De los autores

**Roberto Ferro Escobar.** Ingeniero electrónico y magister en Teleinformática de la universidad Distrital Francisco José de Caldas, Doctor en informática de la UPSAM. Docente de carrera en la universidad Distrital Francisco José de Caldas.

**Andrés Rodríguez.** Ingeniero electrónico de la universidad Distrital Francisco José de Caldas. Estudiante maestría en ciencias de la Información y las comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 8 años de experiencia en el sector de las telecomunicaciones y 2 años en la docencia universitaria.

**Ricardo Alirio González Bustamante:** Ingeniero Electrónico, Master en Teleinformática, Estudiante de Doctorado. Docente Investigador de la Fundación Universidad Autónoma de Colombia. Director de la Especialización en Telecomunicaciones Facultad de Ingeniería Electrónica. [gonzalez.ricardo@fuac.edu.co](mailto:gonzalez.ricardo@fuac.edu.co)