

Evaluación del desempeño del protocolo  
de enrutamiento AODV para diferentes  
escenarios de redes de sensores inalámbricos

Performance evaluation of AODV routing  
protocol for different scenario in  
wireless sensor networks

Paola Andrea Gómez Puerta\*  
Gonzalo Alberto Posada Pérez\*\*

Mónica Ayde Vallejo Velásquez\*\*\*  
*Universidad Nacional de Colombia (UNAL) – Sede Medellín*

\* Estudiante de pregrado, Universidad Nacional de Colombia (UNAL), sede Medellín, Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática, [pagomezp@unal.edu.co](mailto:pagomezp@unal.edu.co)

\*\* Estudiante de pregrado, Universidad Nacional de Colombia (UNAL), sede Medellín, Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática, [gaposada@unal.edu.co](mailto:gaposada@unal.edu.co)

\*\*\* Profesora Universidad Nacional de Colombia (UNAL), sede Medellín, Facultad de Minas. Departamento de Energía Eléctrica y Automática. Magíster en Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Investigador Grupo Gaunal, [mvallejev@unal.edu.co](mailto:mvallejev@unal.edu.co)

**Correspondencia:** Mónica Ayde Vallejo Velásquez, Carrera 80 n.º 65 - 223, Of. M8-112, tel.: 425 5260. [mvallejev@unal.edu.co](mailto:mvallejev@unal.edu.co)

## Resumen

Las aplicaciones emergentes en el área de redes de sensores inalámbricos comprenden una amplia variedad de escenarios que involucran típicamente un número significativo de nodos desplegados en un área amplia. Para garantizar una correcta comunicación entre los nodos de la red con la estación base, los mensajes se propagan por nodos intermedios, de forma que se establece una ruta con múltiples enlaces. En general, los nodos de una red de sensores se caracterizan por sus recursos limitados, en consecuencia, es fundamental el uso de protocolos que garanticen no solo la comunicación sino también que permitan ahorrar la mayor cantidad de energía mientras proporcionan escalabilidad.

Diferentes protocolos de enrutamiento han sido propuestos para redes inalámbricas de sensores, sin embargo, los algoritmos de enrutamiento de tipo reactivo han mostrado ser energéticamente más eficientes, lo que los hace adecuados para las redes de sensores inalámbricos. En este trabajo se evalúa el desempeño del protocolo de tipo reactivo (*ad-hoc on demand distance vector*) bajo la plataforma de simulación OMNeT++ probando diversos escenarios. El protocolo AODV ha sido elegido por la superioridad en el rendimiento, demostrada frente a otros protocolos reactivos reportados en la literatura. El protocolo ha sido evaluado bajo las siguientes métricas: tasa de entrega de paquetes, retardo promedio, sobrecarga de enrutamiento y consumo de energía. Los resultados obtenidos muestran que AODV reduce su desempeño conforme el número de nodos aumenta, en consecuencia, su usabilidad restringe la escalabilidad de la red, adicionalmente, los resultados demuestran que la distribución espacial de los nodos influye en el desempeño del protocolo. Para nuestro trabajo concreto, la distribución uniforme es la que muestra mejores resultados.

**Palabras clave:** protocolos de enrutamiento, AODV, redes de sensores inalámbricos, ZigBee.

Fecha de recepción: 25 de marzo de 2013  
Fecha de aceptación: 13 de mayo de 2013

## Abstract

Emerging applications in the area of wireless sensor networks that include a wide variety of scenarios typically involve a significant number of nodes deployed in a wide area. To ensure proper communication between the network nodes to the base station, the messages are propagated by intermediate nodes, so a route with multiple links is established. In general, sensor nodes are characterized by limited resources; therefore it is essential to use protocols that ensure not only communication but also that save the most energy while providing scalability. Different routing protocols have been proposed for WSNs, but the reactive routing algorithms have shown to be more energy efficient, which makes them suitable for wireless sensor networks. In this paper the performance of the reactive type protocol (Ad -Hoc On Demand Distance Vector) is evaluated under the simulation platform OMNeT++ through different scenarios. The AODV protocol has been chosen by the performance superiority comparing with

other reactive protocols reported in the literature. The protocol has been evaluated under the following metrics: packet delivery rate, average end-to-end delay, routing overhead and energy consumption. The results show that AODV reduces their performance when the number of nodes increases, consequently it restricts the network scalability, further results show that the spatial distribution of the nodes affect on the performance of the protocol, specific in our work, the uniform distribution shows better results.

**Keywords:** routing protocols, AODV, wireless sensor networks, ZigBee.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las redes de sensores inalámbricos son sistemas constituidos por un conjunto de nodos sensores que se comunican entre sí para realizar de forma cooperativa el monitoreo de señales físicas. En general, los nodos de una red de sensores se caracterizan por la limitación en recursos de potencia, memoria y procesamiento [1], en consecuencia, es fundamental el uso de protocolos que garanticen la comunicación entre los nodos de la red, optimicen el desempeño y permitan ahorrar la mayor cantidad de energía mientras proporcionan escalabilidad.

El rendimiento de las redes de sensores inalámbricos está estrechamente relacionado con el del protocolo de enrutamiento, debido a que las rutas pueden variar dinámicamente en el tiempo [2]. Las aproximaciones tradicionales no tienen en cuenta la restricción de energía impuesta por los nodos de estas redes, de modo que pueden llegar a consumir una cantidad significativa de energía debido al intercambio intensivo de mensajes. Diferentes protocolos de enrutamiento para redes de sensores inalámbricos han sido propuestos en la literatura [3], [4], [5]. Los protocolos de enrutamiento pueden ser clasificados de acuerdo con un gran número de características, tales como el procedimiento de establecimiento de ruta, la técnica de enrutamiento, el funcionamiento del protocolo, entre otros. De acuerdo con el procedimiento de establecimiento de ruta, están disponibles tres clases de protocolos: 1) los protocolos de tipo proactivo, que establecen las rutas antes de que haya una demanda real de tráfico, son adecuados para el tráfico en tiempo real, ya que presentan baja latencia, sin embargo, desperdician ancho de banda debido a las actualizaciones periódicas y no son energéticamente eficientes [6]; 2) los protocolos reactivos, que configuran las rutas bajo demanda, resultan ser buenos para redes de poco tráfico, ahorran energía y ancho de banda durante períodos de inactividad, lo que

los hace adecuados para las redes inalámbricas de sensores, sin embargo, el nodo fuente experimenta un retardo considerable antes de poder enviar paquetes de datos, debido a la latencia de descubrimiento de la ruta [6]; 3) los protocolos híbridos, que combinan lo mejor de ambas aproximaciones.

Entre los protocolos de enrutamiento reactivos para redes de sensores inalámbricos tenemos DSR (*Dynamic Source Routing*) [6], AODV (*Ad-Hoc on Demand Distance Vector*) [7], DYMO (*Dynamic MANET On-demand*) [8]. El rendimiento del protocolo depende del escenario, en general, algunos autores coinciden en afirmar que AODV presentan mejor rendimiento frente a DSR y DYMO bajo escenarios de alta movilidad [6], aumento en la densidad de la red y cargas de poco tráfico [9], [10].

En este artículo se pretende evaluar el desempeño del estándar IEEE802.15.4 bajo el protocolo de enrutamiento reactivo AODV para diferentes escenarios usando la plataforma de simulación OMNET++ [11], [12]. El resto del artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se presentan los conceptos generales sobre las redes de sensores inalámbricas y las características principales de los estándares *Zigbee* e IEEE802.15.4, además se detallan los principales protocolos de enrutamiento usados en una red de sensores inalámbricos. En la sección 3 se describen la metodología y la plataforma de *software* usada en la fase experimental. En la sección 4 se presentan los resultados. Finalmente, en la sección 5 se exponen las conclusiones.

## 2. MARCO TEÓRICO

### ZIGBEE / IEEE 802.15.4

ZigBee es un estándar que define un grupo de protocolos de comunicación de baja velocidad de transferencia de datos y de corto alcance de redes inalámbricas [13]. Está basado en dispositivos inalámbricos que operan en bandas de frecuencia de 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz. La banda 2.4 GHz tiene la máxima velocidad de transferencia de datos (250 Kbps) y el mayor número de canales (16).

El estándar ZigBee adoptó IEEE 802.15.4 como capa física y como protocolo de control de acceso al medio [14]. Por lo tanto, un dispositivo compatible con ZigBee es compatible con el estándar IEEE 802.15.4.

En una red IEEE802.15.4 hay dos tipos de dispositivos: FFD (*Full-Function Devices*), capaz de desempeñar todas las tareas descritas en el estándar y de aceptar cualquier función en la red, y RFD (*Reduced-Function Devices*), con capacidades limitadas. A su vez, un dispositivo FFD puede tomar tres roles diferentes: coordinador, coordinador de una red de área personal (*Personal Area Network* [PAN]), y dispositivo (RFD). Una red IEEE802.15.4, independientemente de su topología, es siempre creada por un coordinador PAN.

La red debe ser una de las dos topologías especificadas en IEEE 802.15.4, estrella o *peer-to-peer* [15]. En la topología estrella, cada dispositivo en la red puede comunicarse solamente con el coordinador PAN. En una topología *peer-to-peer*, cada dispositivo puede comunicarse directamente con cualquier otro dispositivo si estos son colocados lo suficientemente cerca para establecer un enlace exitoso de comunicación.

Otra forma de red *peer-to-peer* que el estándar soporta es una topología árbol. En este caso, un coordinador PAN establece la red inicial. Los enrutadores forman las ramas y transmiten los mensajes. Los dispositivos finales actúan como hojas de árbol y no participan en el enrutamiento de mensajes. Los enrutadores pueden hacer crecer la red más allá de la red inicial establecida por el coordinador.

En las redes inalámbricas ZigBee, la capa física (*Physical Layer* [PHY]) es responsable de seleccionar la frecuencia del canal, activar el radio para la recepción y el envío de paquetes y de garantizar que el canal no esté siendo utilizado por cualquier otro dispositivo en otra red. La capa de control de acceso al medio (*Medium Access Control* [MAC]) provee la interfaz entre la capa física y la capa de red.

Una red IEEE802.15.4 puede operar en modo con o sin *beacon*. Un *beacon* es un mensaje con un formato específico que es usado por el nodo coordinador para sincronizar los relojes de los nodos de la red conectados a él. La capa MAC es responsable de generar los *beacons* y sincronizar los dispositivos. Cuando se opera en modo *beacon*, se usa un protocolo de acceso múltiple por detección de portadora con prevención de colisiones simple (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA-CA)) [16]. En CSMA-CA cada vez que un dispositivo quiere transmitir, este primero desempeña una evaluación de canal libre (*Clear Channel Assessment* [CCA]) para asegurar

que el canal no es usado por cualquier otro dispositivo. Después de realizar esta verificación y si el canal está libre, el dispositivo comienza a transmitir su información.

Hay dos métodos para acceder al canal: basado en contención o libre contención. En el acceso a canal basado en contención todos los dispositivos quieren transmitir usando el mecanismo CSMA-CA, y el primero que encuentra el canal libre empieza a transmitir. En el método de libre contención, el coordinador PAN dedica un intervalo de tiempo específico para un dispositivo particular. Esto es llamado un intervalo de tiempo garantizado (*Guaranteed Time Slot* [GTS]). Para proporcionar un GTS, el coordinador PAN necesita garantizar que todos los dispositivos de la red están sincronizados. Un coordinador tiene la opción de transmitir señales *beacon* para sincronizar los dispositivos conectados a él. Esto es llamado una PAN con *beacon* habilitado (*beacon-enabled* PAN). La desventaja de usar *beacons* es que todos los dispositivos en la red deben despertar de forma regular, para escuchar el *beacon*, sincronizar sus relojes y volver a dormir. Esto significa que muchos de los dispositivos en la red pueden despertar solamente para la sincronización y no desempeñar otra tarea mientras están activos. Por lo tanto, la duración de la batería de un dispositivo en una red con *beacon* habilitado es normalmente menor que una red sin *beacon*.

### **Protocolos de enrutamiento reactivos para redes de sensores inalámbricos**

Los protocolos de enrutamiento reactivo también se conocen como protocolos de enrutamiento por demanda, ya que no mantienen la información de la ruta en los nodos de la red si no hay comunicación. Un protocolo puede mostrar mejor rendimiento que otro, la selección de un protocolo de enrutamiento en particular dependerá del tipo de aplicación y el uso previsto de la red. A continuación se explican en detalle los tres protocolos de enrutamiento reactivo estudiados en este trabajo: DSR, AODV y DYMO.

#### **• *Dynamic Source Routing* (DSR)**

Se fundamenta en el enrutamiento desde el origen, es decir, los paquetes de datos incluyen un encabezado de información acerca de los nodos exactos que deben atravesar, lo que implica que tienen la ruta exacta al nodo de destino. El protocolo consta de dos mecanismos principales: descubrimiento

de ruta y mantenimiento de ruta. En los procesos de descubrimiento de rutas se generan mensajes de solicitud (Route REQuest [RREQ]), respuesta (Route REPLY [RREP]) y error (Router ERRor [RERR]) [17].

Dado que es un protocolo reactivo, tiene la ventaja de generar un menor consumo de ancho de banda y de procesamiento computacional, ya que no envía paquetes a menos de que sea necesario. Además, trabaja bien en condiciones donde la movilidad es alta, detecta rápidamente cambios en la topología de la red adaptando las rutas a estos cambios. Permite el balanceo de cargas y es más robusto en la red, ya que permite tener rutas alternas para un mismo nodo destino. Puede forzar o evitar que un paquete pase por determinados nodos debido a que en su tabla de enrutamiento contiene las rutas completas con todos los nodos que la conforman [18]. Por otra parte, entre sus principales desventajas se cuentan problemas de retardos y de escalabilidad [19].

#### • *Ad-Hoc on Demand Distance Vector (AODV)*

El protocolo AODV está basado en los protocolos DSR y DSDV [20]. Es un protocolo reactivo en el cual los nodos mantienen una tabla de enrutamiento para los destinos conocidos. La tabla está formada inicialmente por los nodos más cercanos, pero posteriormente puede ser ampliada cuando un nodo desea comunicarse con otro del cual no tiene la ruta requerida [21].

AODV es un protocolo que utiliza menos ancho de banda y de procesamiento computacional, ya que no envía paquetes a menos de que sea necesario. Trabaja bien en condiciones donde la movilidad es alta, incorpora mecanismos para evitar la formación de bucles y detecta rápidamente cambios en la topología de la red adaptando las rutas a estos cambios. Sin embargo, tiene como desventaja que ningún nodo tiene conocimiento total de la topología de la red, cada uno sólo tiene información de los nodos con los que necesita comunicarse [18], [20].

El protocolo AODV emplea un mecanismo de descubrimiento de rutas en modo *broadcast*, en el cual se intercambian mensajes de petición de ruta (RREQ, *Route Request*) y mensajes de respuesta de ruta (RREP, *Route Reply*) [21]. En esta operación de búsqueda de rutas se pueden distinguir dos fases: la formación del camino de vuelta, que establece todos los itinerarios posibles desde el origen hasta el destino, trazados por el recorrido de los

mensajes RREQ; y la formación del camino de ida, que determina la ruta que finalmente seguirán los paquetes desde el nodo origen hasta el nodo destino una vez finalizado el descubrimiento de caminos.

- *Paso 1: Formación del camino de vuelta*

El proceso de descubrimiento de rutas se inicia cuando un nodo origen necesita enviar paquetes a un nodo destino del cual no tiene ninguna ruta válida en su tabla de enrutamiento. Entonces el nodo origen genera un mensaje RREQ y los nodos vecinos lo reciben y lo reenvían sucesivamente, hasta alcanzar el nodo destino. Los nodos llevan un registro de los mensajes RREQ recibidos para no reenviar la misma solicitud varias veces, ya que esto sobrecargaría la red [21].

- *Paso 2: Formación del camino de ida*

Cuando el nodo que recibe el paquete RREQ es el propio nodo destino o es un nodo intermedio que posee una ruta válida hacia el destino, se genera un mensaje de respuesta (RREP). Este mensaje se reenvía de vuelta al origen de forma *unicast*, siguiendo el camino inverso de su mensaje RREQ correspondiente. Para escoger una de las rutas posibles, se atiende al menor número de saltos.

*Paso 3: Mantenimiento de la ruta*

El protocolo AODV emplea los mensajes HELLO que se envían de forma periódica para que los nodos anuncien a sus vecinos su pertenencia a la red y, de esa manera, se pueda monitorizar el estado del enlace en una ruta activa. En el momento en el que un nodo advierte un fallo en un enlace, difunde por *broadcast* un mensaje de error de ruta (RERR, *Route Error*). Cuando el nodo origen recibe el mensaje, puede reiniciar el proceso de descubrimiento de ruta sólo si aún está interesado en dicha ruta hacia el destino.

• ***Dynamic MANET On-demand (DYMO)***

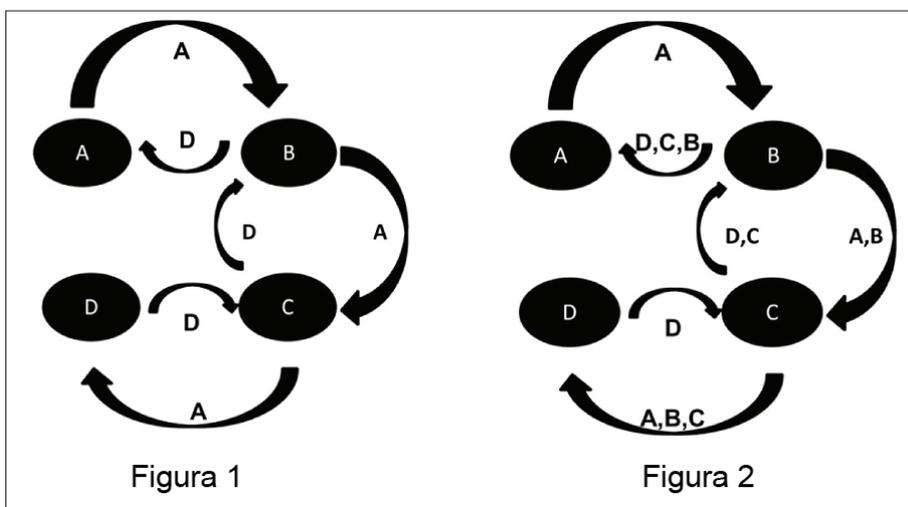
DYMO es un sucesor simplificado del protocolo AODV. El protocolo DYMO está especialmente diseñado para redes *ad-hoc* con movilidad variable y con diferentes patrones de tráfico. Entre sus ventajas está el tener un menor

consumo de ancho de banda y de procesamiento computacional, ya que no envía paquetes a menos de que sea necesario. En redes grandes tiene un mejor comportamiento en escenarios donde cada nodo sólo se comunica con una limitada porción de los demás [22], [23].

Como todos los protocolos reactivos, DYMO se compone de dos operaciones: descubrimiento y mantenimiento de rutas. Las rutas se descubren bajo demanda cuando un nodo necesita enviar un paquete a un destino que no está en su tabla de enrutamiento. Un mensaje de petición de ruta (RREQ) es enviado a todos los nodos, los cuales al recibir la petición verifican si el destino se encuentra en su tabla de enrutamiento. Si el nodo destino se encuentra en la tabla, estos proceden a verificar si el enlace aún se encuentra activo. Una vez el nodo destino recibe el RREQ, lanza un mensaje de respuesta de ruta (RREP), que es enviado de forma *unicast*, salto a salto hacia el nodo origen con la información del número de saltos intermedios y su correspondiente ruta [22], [24].

A diferencia del protocolo AODV, el cual sólo genera entradas a la tabla de enrutamiento para el nodo de destino y el siguiente, en el protocolo DYMO, además de la información acerca de una ruta de destino solicitado, un nodo también recibe la información acerca de todos los nodos intermedios de un camino recién descubierto [25]. Como se muestra en la figura 1, en AODV, cuando el nodo A inicia un proceso de descubrimiento de ruta para el nodo D, sólo tiene conocimiento sobre las rutas al nodo B, su vecino del siguiente salto, y el nodo destino D, mientras que en DYMO (figura 2), el nodo A adicionalmente tiene conocimiento sobre la ruta al nodo C y B. Esta característica en DYMO se conoce como la acumulación de ruta [26].

En el protocolo DYMO sólo se mantiene la información de enrutamiento en relación con fuentes activas y los destinos, por lo tanto es aplicable a dispositivos de memoria limitados. Actualmente se está desarrollando una versión reducida para redes de sensores llamada DYMO-LOW, en la que el objetivo principal es reducir el consumo de energía [22], [24], [27].



Fuente: elaboración propia.

Figura 1. Funcionamiento del protocolo AODV.

Figura 2. Funcionamiento del protocolo DYMO.

### 3. METODOLOGÍA

Tras el estudio realizado en la sección anterior, el protocolo AODV fue seleccionado para ser evaluado por simulación. Su elección se debe al hecho de que, de acuerdo a la literatura AODV, presenta mejor rendimiento bajo escenarios de alta movilidad, aumento en la densidad de la red y cargas de poco tráfico [6], [9], [10], lo que lo hace adecuado para las redes de sensores inalámbricos.

Para realizar la simulación se hace uso de OMNET++, un simulador libre para uso académico disponible para sistemas operativos como Windows, Linux, Mac, entre otros, y el cual puede obtenerse directamente de su página Web [11]. Información relacionada con las características físicas de la computadora, el sistema operativo y el proceso de instalación pueden ser consultadas en [28]. OMNET++ es un simulador de eventos discretos, escrito en lenguaje de programación C++ y basado en componentes modulares, que cuenta con dos interfaces, gráfica y de programación. El fichero *omnetpp.ini* permite configurar las características e inicializar los parámetros de la red que se desea simular y los ficheros *.ned* permiten diseñar los diferentes elementos.

Para satisfacer los requerimientos de nuestro trabajo se ha usado adicionalmente el *framework* Castalia [29], que es un simulador de redes de sensores inalámbricos (WSN) y de redes de área corporal (BAN) que incluye un modelo de canal inalámbrico avanzado, modelos de radio, modelos de sincronización del reloj de nodo, modelos de consumo de energía, varios protocolos MAC, incluyendo IEEE 802.15.4 y protocolos de enrutamiento. En Castalia los nodos se conectan a través del módulo de canal inalámbrico y además están vinculados a través de los procesos físicos que controlan. Cada nodo es la composición de un módulo de comunicación, un gestor de sensor, un módulo de aplicación, un administrador de recursos y un gestor de movilidad. El módulo de comunicación consiste en tres capas: la radio (capa física), la capa MAC y la capa de enrutamiento, y proporciona capacidades de comunicación al módulo de aplicación. El gestor de movilidad es responsable de la ubicación del sensor en el área. El gestor de recursos modela el uso de los recursos locales, tales como el consumo de energía, el uso de la memoria y los estados de CPU [30].

El modelo de simulación de AODV [31] usado en este trabajo está basado en la implementación del protocolo realizada por el grupo de investigación (Gercom) y disponible para su descarga en [32]. La red ha sido evaluada bajo el estándar IEEE 802.15.4 para dos escenarios diferentes que incluyen condiciones estacionarias, diferentes distribuciones espaciales de los nodos y diferentes modelos de colisión. En el modelo de radio no se utilizará sombreado, por lo que la cobertura sólo dependerá de la distancia de los nodos. En la tabla 1 se muestran las características generales de simulación.

En castalia hay disponibles tres modelos de interferencias [33]: a) interferencia = 0, es decir, no hay colisiones aunque varios nodos estén transmitiendo al mismo tiempo, sin embargo, hay algo de aleatoriedad en el módulo de radio modelado como ruido térmico (probabilidad de recepción de paquetes se basa en SNR), por lo que los paquetes recibidos desde un nodo no son exactamente iguales en dos pruebas; b) interferencia = 1, modelo simple basado en el concepto de rango de interferencia, en el cual dos transmisiones parcialmente solapadas son ambas descartadas; c) interferencia = 2, modelo de interferencia aditiva, en el cual la relación de interferencia de la señal se calcula teniendo en cuenta todas las posibles interferencias de otros nodos de sensores. Para todos los escenarios, los efectos de sombreado han sido inhabilitados y se utiliza la aplicación *throughputTest*, donde

todos los nodos envían paquetes a un nodo coordinador a una velocidad constante (configurable).

**Tabla 1.** Parámetros de simulación

Topología	Valor
Número de nodos	5,9,15
Topología	Estrella
Distribución	Circular, uniforme
Tiempo de simulación [s]	100 segundos
Área de simulación	140 m x 140 m
Modelo de capa física y MAC	IEEE 802.15.4
Modelo de enrutamiento	AODV
Modelo de radio	CC2420
Tamaño de paquetes	105 bytes
Tasa de datos de paquetes	2 paquetes/seg
Potencia de transmisión [mW]	-1 dBm / 55.18
Modelo de interferencia	0,1,2
MAC BO	6 (valor por defecto)
Mac SO	4 (valor por defecto)

**Fuente:** elaboración propia.

Los escenarios de simulación se describen en detalle a continuación.

- *Escenario 1: Nodos estáticos-distribución circular*

Red en topología estrella con 5, 9 y 15 nodos desplegados en un campo cuadrado en distribución circular alrededor del nodo coordinador, el cual se encuentra ubicado en el centro del campo. Las simulaciones se ejecutan para los tres modelos de interferencias (sin colisión, colisión simple y colisión aditiva).

- *Escenario 2: Nodos estáticos-distribución uniforme*

Red en topología estrella con 5, 9 y 15 nodos desplegados en un campo cuadrado en distribución uniforme aleatoria y con el nodo coordinador ubicado en el centro. Las simulaciones se ejecutan para los tres modelos de interferencias (sin colisión, colisión simple y colisión aditiva).

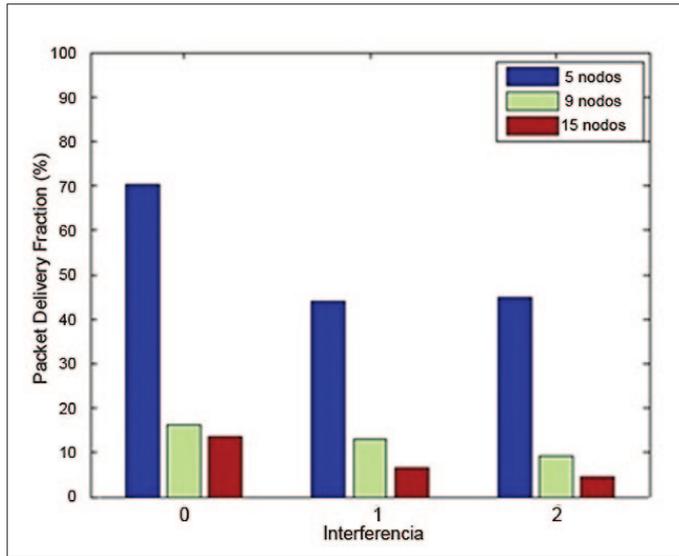
El protocolo AODV fue evaluado bajo las siguientes métricas [34], [35]:

- *Tasa de entrega de paquetes (PDF: Packet Delivery Fraction) [%]*: Número de paquetes de datos entregados con éxito al nodo destino (coordinador) dividido por el número de paquetes generados por el nodo fuente (otros nodos de la red).
- *Retardo Promedio (Average End-to-End delay) [ms]*: Cantidad de tiempo que tarda un paquete en viajar desde el nodo origen hasta el nodo destino. Esta métrica tiene en cuenta todos los posibles retardos causados por *buffering*, tiempo de retardo en cola, retransmisión de paquete en la capa MAC y tiempos de propagación y transmisión de los paquetes.
- *Sobrecarga de enrutamiento (Routing Overhead) [%]*: Número total de paquetes enviados por la capa de enrutamiento, dividido número de paquetes enviados. Permite analizar el impacto de los mensajes de control en la red. Se analizarán el número total de mensajes de control enviados (RREP, RREQ, RERR) y el número total de mensajes de error.
- *Consumo de energía [Joules]*: Cantidad de energía consumida por la red, discriminada entre la energía del nodo coordinador y el resto de los nodos de la red.

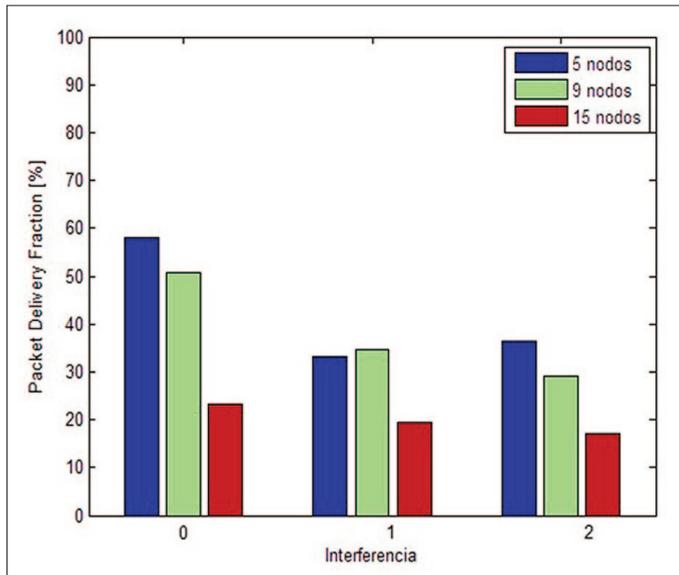
#### 4. RESULTADOS

Castalia incluye muchos procesos aleatorios, tales como sombras en el canal inalámbrico, diferentes tiempos de arranque de los nodos, varias decisiones al azar en el MAC, en total hay once secuencias de números aleatorios que afectan a diferentes partes de la simulación [33]. Para tener una mayor precisión en los resultados, se han realizado diez repeticiones para cada escenario (cada repetición se ejecuta con un conjunto diferente de semillas al azar). Los resultados obtenidos son un promedio de las diez iteraciones realizadas para cada métrica evaluada.

### Resultados *Tasa de entrega de paquetes (PDF)*



**Figura 3.** Tasa de entrega de paquetes para redes de 5,9 y 15 nodos con distribución circular.



**Figura 4.** Tasa de entrega de paquetes para redes con 5,9 y 15 nodos con distribución uniforme.

Desde las figuras 3 y 4 observamos cómo, independiente de la distribución de los nodos en el campo (circular o uniforme), AODV falla cuando la densidad de nodos aumenta; también, observamos que cuando consideramos los modelos de interferencia (interferencia = 1,2), la tasa de entrega de paquetes experimenta una reducción adicional respecto a cuando no hay colisión sino solo ruido térmico (interferencia = 0). En consecuencia, una red con una gran cantidad de nodos en el mismo segmento tiene un dominio de colisiones mayor y generalmente más tráfico.

Por otra parte, para ambas distribuciones, la red con cinco nodos y quince nodos muestra respectivamente mayor y menor variabilidad de la métrica en relación con el modelo de interferencia, sin embargo, la distribución uniforme parece ofrecer en conjunto mejores resultados que los obtenidos para la distribución circular.

### Resultados retardo promedio

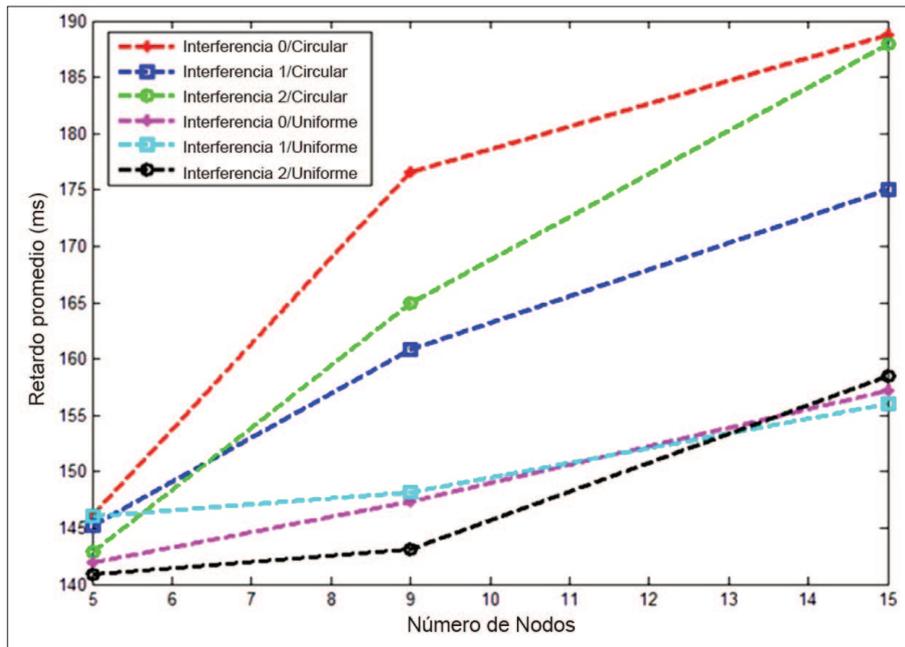


Figura 5. Retardo promedio vs número de nodos para escenarios 1 y 2.

A partir de la figura 5 podemos observar cómo el retardo promedio en la recepción de los paquetes se incrementa cuando aumenta el número de los nodos en la red. Por otra parte, también vemos que la red de sensores en distribución circular presenta los valores de retardo más altos respecto a la distribución uniforme, en consecuencia, y a pesar del impacto claramente identificado de la densidad de la red, se podría sugerir que la distribución uniforme ofrece mayores ventajas independientemente del modelo de interferencia.

### Resultados de sobrecarga de enrutamiento

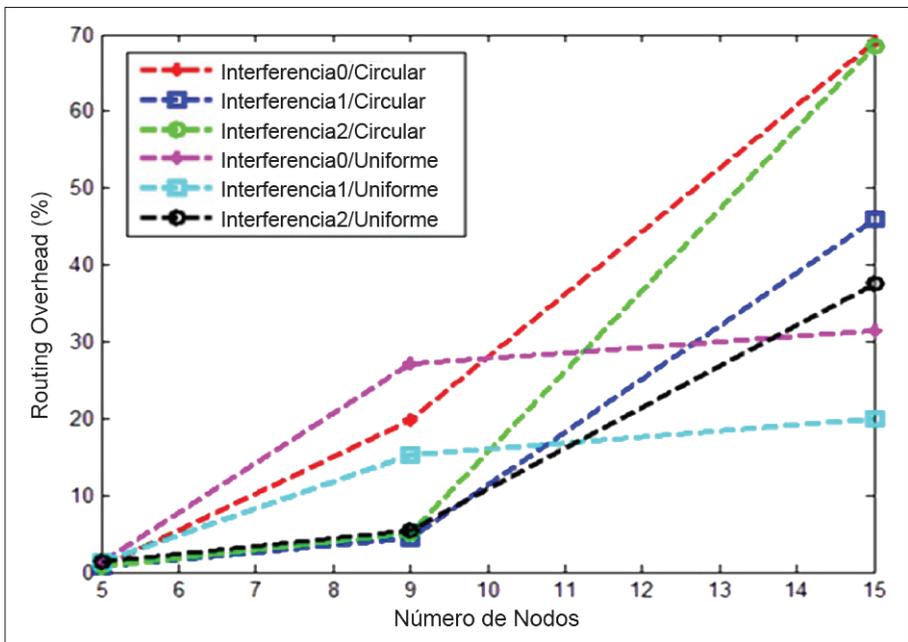


Figura 6. Sobrecarga de enrutamiento vs número de nodos para escenarios 1 y 2.

A partir de los resultados mostrados en la figura 6 podemos realizar las siguientes observaciones: 1) el valor de sobrecarga de enrutamiento se incrementa como consecuencia de la mayor cantidad de paquetes de enrutamiento enviados cuando el número de nodos aumenta; 2) la red de quince nodos en distribución circular presenta los niveles de sobrecarga más altos para todos los casos de interferencia considerados; 3) las redes

de nueve y quince nodos en distribución uniforme muestran solo un leve incremento en el valor de la sobrecarga de enrutamiento respecto a la gran variabilidad que evidencian para la distribución circular.

### Resultados de consumo de energía

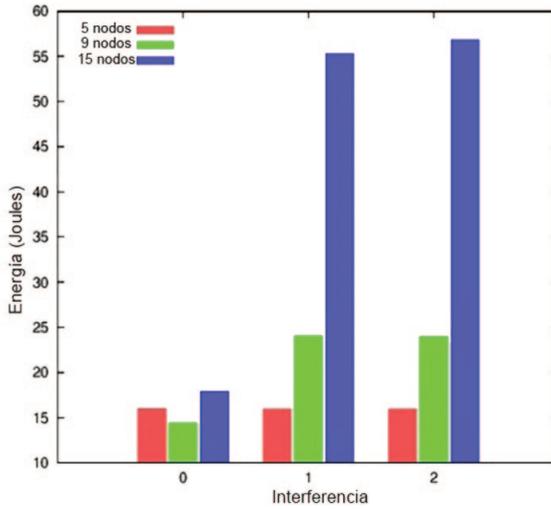


Figura 7. Consumo de energía de toda la red con distribución circular.

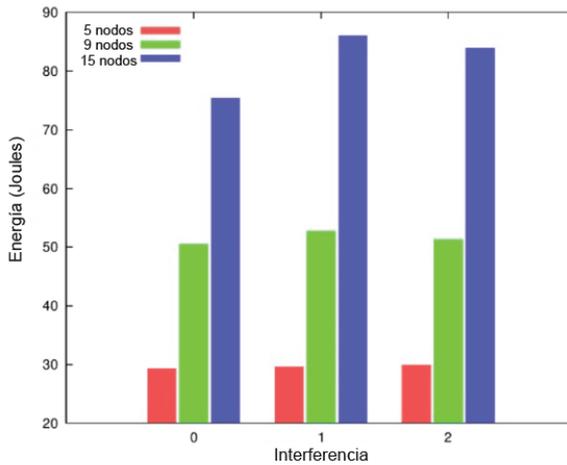


Figura 8. Consumo de energía de toda la red con distribución uniforme.

De los resultados mostrados en las figuras 7 y 8 se concluye que, independientemente de la distribución de los nodos en el campo y del modelo de interferencia, el consumo de energía se incrementa conforme crece el número de nodos en la red. Así, la red con quince nodos sensores presenta los niveles más altos de consumo de energía. Sin embargo, es muy notable que para la distribución uniforme (figura 8) se observan niveles de consumo casi del doble que los obtenidos para la distribución circular. Por otra parte, también se puede ver el efecto adicional en el consumo introducido por el modelo de interferencia. Para todos los casos, el nodo coordinador presenta el mismo nivel de consumo (6,79 joules), para la red con distribución circular, el consumo promedio de los nodos es de aproximadamente 2,5 joules y para la red con distribución uniforme es de aproximadamente 5,5 joules.

## CONCLUSIONES

La selección apropiada del protocolo de enrutamiento muestra una fuerte dependencia con el tipo de aplicación para la cual se desea implementar la red. La densidad y la distribución de los nodos de la red pueden contribuir a aumentar la complejidad de los problemas en redes inalámbricas de sensores. Esto significa que para algunas aplicaciones será mejor un tipo de protocolo de enrutamiento u otro llegando al extremo de que algunos algoritmos no son válidos según las aplicaciones. En este trabajo se evaluó el desempeño del protocolo AODV bajo cuatro métricas (tasa de entrega de paquetes, retardo promedio, consumo de energía, y sobrecarga de enrutamiento), la evaluación se realizó para una red en topología estrella, considerando diferentes densidades (5, 9 y 15 nodos), diferentes distribuciones espaciales de los nodos (circular y uniforme) y diferentes modelos de interferencia (sin colisión, colisión simple, colisión aditiva).

Con base en los resultados de simulación obtenidos se puede concluir que: 1) independiente de la distribución, el protocolo AODV se sugiere para ser usado solo en redes pequeñas (número de nodos < 9 nodos), ya que todas las métricas empeoran conforme el número de nodos aumenta, esto es debido a que el flujo de mensajes crece considerablemente, por lo que la probabilidad de colisiones entre paquetes es más elevada; 2) independientemente de la densidad y del modelo de interferencia, AODV para la red en distribución uniforme muestra los mejores resultados aunque con un alto costo energético y, en consecuencia, con un tiempo de vida estimado de

la red reducido; 3) en general, consideramos que las variaciones de rendimiento se debieron principalmente a la distribución espacial de los nodos de la red en lugar de los mecanismos de protocolo. Como trabajo futuro se pretende realizar nuevas simulaciones considerando otras distribuciones y otros protocolos de enrutamiento.

## Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con el apoyo de Colciencias y la Universidad Nacional de Colombia.

## REFERENCIAS

- [1] H. Karl and A. Willig, *Protocols and architectures for wireless sensor networks*, Wiley, 2005.
- [2] Z. Zhang, H. Zhou, and J. Gao, "Scrutinizing performance of ad hoc routing protocols on wireless sensor networks", in *First Asian Conference on IEEE Intelligent Information and Database Systems*, 2009. ACIIDS 2009, pp. 459-464.
- [3] S. K. Singh, M. P. Singh, and D. K. Singh, "Routing protocols in wireless sensor networks—A survey" *International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSSES)*, vol. 1, pp. 63-83, 2010. DOI: 10.5121/ijcses.2010.1206
- [4] N. Rathi, J. Saraswat, and P. P. Bhattacharya, "A review on routing protocols for application in wireless sensor networks", *International Journal of Distributed and Parallel Systems (IJDPS)*, vol. 3, n.º 5, , pp. 39-58, septiembre 2012.
- [5] J. Wan, D. Yuan, and X. Xu, "A review of routing protocols in wireless sensor networks", . In *IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2008. WiCOM'08. 4th International Conference on, pp. 1-4. DOI: 10.1109/WiCom.2008.946
- [6] M. Kumar, I. Gupta, S. Tiwari, R. Tripathi: "A comparative study of reactive routing protocols for industrial wireless sensor networks", *QSHINE 2013*, pp. 248-260. DOI: 10.1007/978-3-642-37949-9\_21
- [7] C. E. Perkins, and E. M. Royer, "Ad-hoc on-demand distance vector (AODV) routing", in *Proc. of the 2nd IEEE Wksp. Mobile Comp. Sys. and Apps, WMCSA '99*, New Orleans, LA, febrero 1999, pp.90-100.
- [8] I. D. Chakeres and C. E. Perkins. "Dynamic MANET on demand (DYMO) routing protocol", *Proc. of the Sixty-First Internet Engineering Task Force*, Washington, D. C., USA, noviembre 2004. IETF.

- [9] M. M. Chandane, S. G. Bhirud and S. V. Bonde, "Performance analysis of IEEE 802.15.4", *International Journal of Computer Applications*, vol., 40 n.º 5, , pp. 23-29, febrero 2012.
- [10] A. Ali, and Z. Akbar, "Evaluation of AODV and DSR routing protocols of wireless sensor networks for monitoring applications". Mr thesis, Blekinge Institute of technology, Department of Electrical Engineering with emphasis on Telecommunication, Karlskrona, Sweden.
- [11] OMNeT++. (2011, Sep7). OMNeT++ 4.2 documentation and tutorials [Online]. Disponible en: <http://www.omnetpp.org/>
- [12] A. Varga. "The omnet++ discrete event simulation system". In *European Simulation Multiconference*, Prague, Czech Republic, junio 2001, pp. 319-324.
- [13] C. García, "Impacto de la seguridad en redes inalámbricas de sensores IEEE 802.15.4". M.S. tesis, Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2010.
- [14] Open Systems Interconnection Basic Reference Model, The Basic Model, ISO/IEC 7498-1, 1994.
- [15] S. Farahani, "ZigBee Wireless Networks and Transceivers", Oxford, UK: Elsevier Inc, 2008.
- [16] IEEE, IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks- Specific Requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE Std 802.15.4-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003), 2006.
- [17] León Fernandez Antonio, Subiela Durá Roberto, "Simulación de protocolos de enrutamiento en redes móviles ad-hoc con NS-2".
- [18] A. Batiste, "Protocolos de enrutamiento en redes inalámbricas mesh: un estudio teórico y experimental". M.S. tesis, Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2011.
- [19] S. Bhat M., Shwetha D., and Devaraju J. T, "A performance study of proactive, reactive and hybrid routing protocols using Qualnet simulator", *International Journal of Computer Applications*, vol. 28, n.º 5, pp.10-17, agosto, 2011.
- [20] M. E. Gil, "Estudio de la eficiencia de enrutamiento del protocolo AODV en redes ad hoc inalámbricas de gran escala". Trabajo de fin de carrera, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España, 2009.

- [21] A. M. Palma, "Análisis de protocolos de enrutamiento para redes de sensores inalámbricas". Trabajo de fin de carrera, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Carlos III, Madrid, España, 2009.
- [22] A. B. Peral, J.S Moncayo, y M. Morillo. "Estudio del rendimiento y la seguridad en redes ad hoc". Trabajo de fin de carrera. Facultad de Informática, Departamento Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2007.
- [23] S. Agrawal, S. Jain, and S. Sharma, "Mobility based performance analysis of AODV and DYMO under varying degree of node misbehavior", *International Journal of Computer Applications*, vol. 30, n.º 7, pp. 36-41, 2011.
- [24] R. Agrawal, R. Tripathi and S. Tiwari, "Performance comparison of AODV and DYMO MANET protocols under wormhole attack environment", *International Journal of Computer Applications*, vol. 44, n.º 9, pp. 9-16, abril 2012.
- [25] I. Dietrich, C. Sommer, and F. Dressler, "Simulating DYMO in OMNeT++", Department of Computer Science, University of Erlangen, Technical Report, 01/07, abril 2007.
- [26] R. A. Santos, A. Edwards, R. Edwards, and L. Seed, "Performance evaluation of routing protocols in vehicular AdHoc networks", *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, vol. 1, n.º 1/2, pp. 80-91, 2005. DOI: 10.1504/IJAHUC.2005.008022
- [27] C. Sommer, I. Dietrich, and F. Dressler, "Simulation of ad hoc routing protocols using OMNeT++: A case study for the DYMO protocol", *ACM / Springer Mobile Networks and Applications, Special Issue on Simulation Techniques and Tools for Mobile Networking*, 2009.
- [28] Guía de instalación OMNeT++. Disponible en <http://www.omnetpp.org/documentation> Información del *framework* Inetmanet. Disponible en <https://github.com/inetmanet/inetmanet>
- [29] Castalia Framework. (2013, June 7). Disponible en <http://castalia.research.nicta.com.au/index.php/en/>
- [30] C. Nastasi and A. Cavallaro. "WiSE-MNet: an experimental environment for wireless multimedia sensor networks", *Proceedings of Sensor Signal Processing for Defence (SSPD)*, pp. 1-5, 2011.
- [31] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing (RFC3561)", Disponible en <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>.
- [32] AODV Routing Protocol Implementation, (junio 2013). Disponible en <http://www.gercom.ufpa.br/downloads/wsn>

- [33] A. Boulis, Castalia: User's manual NICTA, 2010.
- [34] H. S. Bindra, S. K. Maakar, and A. L. Sangal, "Performance evaluation of two reactive routing protocols of MANET using group mobility model", *International Journal of Computer Science*, vol. 7, n.º 3, pp. 38-43, 2010.
- [35] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y. C. Hu, and J. Jetcheva, "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols", *Proceedings of the 4th annual ACM / IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pp. 85-97. ACM, octubre 1998.