

# Modelo de simulación de la capa MAC IEEE 802.16-2004 para modo Mesh

Javier Emilio Sierra

GIDATI, Escuela de Ingeniería, Facultad de Informática y Telecomunicaciones  
Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia  
jsierrac@ieee.org

Roberto Hincapié

GIDATI, Escuela de Ingeniería, Facultad de Informática y Telecomunicaciones  
Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia  
rhincapie@ieee.org

Roberto Bustamante (†)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia  
rbustama@uniandes.edu.co

Leonardo Betancur

GIDATI, Escuela de Ingeniería, Facultad de Informática y Telecomunicaciones  
Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia  
leonardobetancur@ieee.org

Fecha de recepción: 30-05-06

Fecha de selección: 30-10-06

Fecha de aceptación: 30-08-06

## ABSTRACT

IEEE 802.16-2004 standard supports mesh networks topology and its important to realize the performance of such systems. Simulation of communication systems allows its optimization in performance measures. In this article we present a model developed over Network Simulator 2 to simulate data link layer operation in mesh topologies based on that standard. We present the results based on a link scheduler and the model developed, as the mean queue length, mean queue delay and the system capacity for different topologies.

## KEY WORDS

MAC, Wimax, Mesh, simulation models

## RESUMEN

El estándar IEEE 802.16-2004 soporta la creación de redes mesh. La simulación de sistemas de comunicación permite su optimización, sobre todo para la mejora de los parámetros de desempeño. En este artículo se presenta un modelo desarrollado e implementado en NS2 para la simulación de la capa de enlace de datos para topologías mesh basadas en el estándar mencionado. Se muestran resultados obtenidos con un planificador de enlace, así como longitudes promedio de las colas, retardo en cola, capacidad del sistema para diferentes topologías.

## PALABRAS CLAVE

MAC, Wimax, Mesh, simulación

Clasificación Colciencias: A

## I. INTRODUCCIÓN

El estándar IEEE 802.16-2004 define la interfaz física y la capa MAC para el acceso a sistemas de banda ancha que emplean topología mesh. Las redes mesh en los últimos años han sido de gran estudio por su facilidad de despliegue como redes emergentes. Es sin duda un área de investigación en la cual hay mucho por realizar.

Network Simulator 2 (NS2) es una herramienta de simulación en eventos discretos, la cual permite el desarrollo de entidades que puedan representar de una manera correcta tecnologías inalámbricas; es útil para simular la capa de enlace para topologías mesh que emplean el estándar en mención.

En este artículo se muestra un modelo desarrollado de la entidad correspondiente a las funcionalidades de la capa de enlace de datos para el análisis de sistemas de acceso de banda ancha en topología mesh basados en el estándar IEEE 802.16-2004; con el fin de facilitar por medio de la simulación, el diseño y análisis de redes que emplean esta tecnología, mejor conocida como WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access).

El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: inicialmente se realiza un background de los trabajos relacionados con el tema y sobre el estándar IEEE 802.16. En la sección III se indican las características dadas por el estándar referente a las topologías mesh y los planificadores. En la sección IV se muestra el modelo de capacidad equivalente para la capa PHY en condiciones ideales, el modelo desarrollado e implementado,

así como el diagrama de eventos; por último, en la sección V se muestran los resultados de las simulaciones realizadas para el planificador y el modelo desarrollado e implementado en NS2.

## II. BACKGROUND

### A. Trabajos relacionados

Las redes inalámbricas mesh son un tipo de redes de comunicación especiales orientadas a proveer acceso remoto a usuarios en lugares donde una red común (celdas) no es óptima. La característica de estos lugares es que son sitios remotos con baja densidad de usuarios y de difícil acceso con una simple estación base. En [1], [2] y [3] los autores presentan un escenario más realista donde las redes mesh están constituidas por alrededor de 30 nodos y son orientadas a proveer servicios de última milla a usuarios remotos. Ejemplos de estos escenarios son las comunicaciones rurales [4] e internet banda ancha de acceso residencial.

El análisis de capacidad para redes mesh ad hoc inició con [5], quien presentó un modelo de capacidad basado en la teoría de la información. Chang [6] realizó un análisis orientado a garantizar retardos para las redes mesh sin considerar redes inalámbricas. En [7] los autores presentan el concepto de servicios diferenciados, representados por diferentes colas en un nodo transmisor, cada una con una clase de servicio determinada.

Otros trabajos relacionados son [8] y [9], los cuales analizan la calidad de servicio (QoS) de los sistemas. Estos artículos proponen un modelo para arquitecturas punto-multipunto

(PMP) similar al modelo propuesto en este artículo, basado en una entidad MAC con varias colas para diferentes tipos de flujo y un control de acceso al medio. En [10] los autores presentan un análisis de PMP y topologías mesh empleando simulación. [9] y [11] realizan y muestran un análisis para planificadores de redes mesh.

La mayoría de los trabajos relacionados con el estándar IEEE 802.16-2004 están enfocados a arquitecturas PMP; sin embargo, se encuentra [12], donde los autores simulan topologías mesh pero no mencionan la herramienta usada ni especifican los detalles del modelo de simulación.

En la literatura se encuentran entidades para redes mesh basadas en IEEE 802.11 en el DCF incluyendo capas superiores como enrutamiento, TCP, UDP y aplicaciones. Algunas simulaciones consideran movilidad mientras que otras no lo hacen. Estas entidades no se pueden adaptar al modelo que se plantea en este trabajo, ya que estas son ranuradas (slotted) y sincronizadas, mientras que en IEEE 802.11 el método de acceso al medio es basado en contención.

Sobre el proceso de planificación, en [13] los autores presentan un análisis de planificación de paquetes orientado a topologías PMP; [12] analiza un planificador distribuido para redes mesh del tipo *WiMAX*. De una manera general, es analizado el comportamiento de las redes mesh *WiMAX* en [14] y [15][16] presentan el problema de los planificadores de enlace TDMA para redes inalámbricas ad hoc.

### B. Estándar IEEE 802.16

Las actividades de trabajo sobre el estándar IEEE 802.16 iniciaron en

1998, sin embargo, la primera versión del estándar fue completada en octubre de 2000 (IEEE 802.16-2001) y publicada el 8 de abril de 2002. Este define la interfase física y la capa de enlace MAC (Medium Access Control) para redes inalámbricas de área metropolitanas (WirelessMAN), con la intención de proveer banda ancha inalámbrica para servicios de voz y datos con usos residenciales y empresariales. La primera versión solo fue considerada para usuarios fijos [17]. El estándar fue diseñado con capa MAC que soportará diferentes interfases de aire, pero con capa física que depende del uso del espectro y de las regulaciones existentes. Se concentró en las bandas de frecuencias de 10 a 66 GHz.

Un nuevo proyecto de reforma denominado IEEE 802.16a aprobado antes de finalizar el 2002 extendió el rango de trabajo a las bandas de frecuencia de 2 a 11 GHz, incluyendo de esta forma bandas licenciadas y no licenciadas en las diferentes regulaciones.

En junio de 2004 fue aprobado el estándar actual para redes *WiMAX* fijas conocido como 802.16-2004 [18]. Los trabajos actuales sobre el estándar están concentrados en darle soporte de movilidad (entre 70 y 80 mph) para el empleo de dispositivos como PDA, teléfonos o computadores portátiles. Este grupo es conocido como IEEE 802.16e y aprobó el estándar el 7 de diciembre de 2005.

Entre las características principales del estándar IEEE 802.16-2004 se tienen:

- La capa MAC soporta arquitecturas punto multipunto con

topología opcional de redes enmalladas.

- La capa MAC está estructurada para soportar múltiples capas físicas (PHY).
- Para frecuencias entre 10-66 GHz la capa PHY emplea modulación *Single Carrier*.
- Debajo de los 11 GHz donde no es requerida línea de vista, puede ser empleado: OFDM, OFDMA o *Single Carrier*.
- El estándar consolida IEEE std 802.16-2001, IEEE std 802.16aTM-2003 e IEEE std 802.16cTM-2002.
- El estándar especifica la interfase de aire para el acceso banda ancha a redes inalámbricas fijas soportando diferentes servicios multimedia.

### III. MESH IEEE 802.16-2004

#### A. Características del estándar

Las redes mesh son aquellas en las que la comunicación se puede hacer entre los diferentes nodos y no sólo entre nodo y estación base. Para este tipo de redes se pueden realizar las operaciones de dos maneras diferentes: distribuida o centralizada. Para la distribuida, todos los nodos deben coordinar con el vecindario extendido la manera de transmitir para evitar colisiones con los datos y realizar el control de tráfico, y además deben enviar por difusión (*Broadcast*) su respectivo estado (recursos disponibles, peticiones y concesiones) a todos sus vecinos. Para la centralizada, los recursos se asignan de una manera agrupada, donde la Mesh BS, recopila varias peticiones de un determinado

sector y otorga los respectivos recursos para cada enlace, al mismo tiempo que comunica estas decisiones a las demás estaciones del sector.

En la topología *Mesh* cada nodo tiene 48 bit de dirección MAC, la cual es utilizada durante el ingreso a la red y como parte del proceso de autorización. Cuando se autoriza al nodo candidato, este recibe un identificador de 16 bits (Node ID), empleado para identificar al nodo durante la operación. El Node ID es utilizado en el *Mesh Subheader* (*en unicast y broadcast*).

En el estándar define mensajes de control para el modo *Mesh* [18]:

*MSH-NCFG message*: provee un nivel básico de comunicación entre los nodos en diferentes redes del mismo o diferentes proveedores de equipos. Todos los nodos, ya sean BS o SS (subscriber) en la red *mesh* transmiten este mensaje.

*MSH-NENT message*: provee características para que un nuevo nodo gane sincronización e inicie *Network Entry* en la red *mesh*.

*MSH-DSCH message*: se emplea en modo distribuido en la red mesh y se transmite en un intervalo regular para informar a los vecinos del *scheduler* de la estación de transmisión. El tiempo de transmisión es determinado por el mismo algoritmo de MSH NCFG.

*MSH-CSCH message*: es creado por un Mesh BS y se emplea en modo centralizado. La BS envía en *broadcast* el mensaje a todos los vecinos indicando el tiempo de transmisión. También los nodos pueden emplear este mensaje para realizar peticiones

de ancho de banda al Mesh BS. Cada nodo reporta cuánto es su demanda de tráfico al Mesh BS, para que éste realice las tareas de *scheduler*.

*MSH-CSCF message*: al igual que el mensaje anterior, se envía en broadcast cuando se emplea modo centralizado y es empleado para realizar la configuración necesaria de los nodos Mesh.

#### B. Planificadores definidos en el estándar

Como se ha mencionado el estándar define dos tipos de algoritmos de planificación para topología mesh:

*Planificación distribuida*: todas las estaciones (BS y SS) coordinan sus transmisiones en su vecindario extendido (hasta dos saltos). Todas las estaciones en la red emplean el mismo canal para transmitir la información de planificación en un formato específico. Cuando existe una Mesh BS ésta actúa como responsable de enviar el Network Descriptor con la información necesaria de la red. Los nodos deben transmitir el MSH-DSCH de la misma forma como coordinan los mensajes MSH-NCFG. Los nodos establecen los requerimientos de BW de una forma directa entre dos nodos sin la participación de una BS. Las Peticiones/Concesiones se transmiten a los vecinos para que todos conozcan el algoritmo de planificación y eviten colisiones. Toda la asignación se realiza en unidades de minislots.

*Planificación Centralizada*: las conexiones y la topología de red son las mismas que en distribuido, pero el *scheduler* de transmisión es definido por una estación BS. La BS determina la asignación de recursos que depende de las solicitudes de las SS.

El *scheduling* centralizado asegura comunicaciones libres de colisiones y trabaja de la siguiente forma: el control lo realiza la Mesh BS por medio de mensajes del tipo MSH-CSCH y MSH-CSCF. Los primeros se encargan de la coordinación de las estaciones y el segundo de la configuración. Los nodos se agregan a un árbol de enrutamiento, en el cual la Mesh BS corresponde a la raíz y se organizan por medio de su distancia en saltos hasta la base. En las peticiones los nodos más lejanos transmiten primero en orden de aparición en este árbol. En las concesiones, se transmite en orden creciente de distancia al Mesh BS, pero dentro de cada nivel en el orden de aparición en el árbol de enrutamiento.

## IV. MODELO

### A. Modelo capacidad para capa PHY en condiciones ideales

Luego de realizar un estudio al estándar, se encontró que los parámetros principales de OFDM son:

- *Nfft*: longitud de la transformada de Fourier desarrollada en el proceso ( $Nfft = 256$ ).
  - *BW*: es el ancho de banda de la señal a utilizar. Este valor puede ir hasta alrededor de 20MHz.
- $\eta$  factor de muestreo. Es claro que no se puede analizar exactamente una señal que va hasta  $BW/2$  por medio de una frecuencia de muestreo de  $BW$ , por lo cual, la frecuencia de muestreo es igual a  $BW * \eta$ .
- Guard Time *CP*: se da como una fracción del tiempo útil del símbolo. Puede tomar valores de 1/4, 1/8, 1/16 o 1/32 según el estándar.

- $N_p$ : corresponde al número de portadoras de datos. Según los procesos de subcanalización de OFDM, se pueden tener múltiplos enteros de 12 portadoras entre 12 y 192 portadoras.
- Finalmente un aspecto que depende del esquema de modulación y de codificación de la señal es la cantidad de bits codificados  $CB$  (Coded bits) por símbolo QAM y la tasa de codificación  $CR$  (Coding rate).

**Tabla I.** Número de símbolos OFDM por trama.

BW	5.00E+06	1.00E+07	1.50E+07	2.00E+07
Tsym (μs)	56	28	18.667	14
Ttr=2.5 ms	44.6	89.3	133.9	178.6
Ttr=2 ms	71.4	142.9	214.3	285.7
Ttr=5 ms	89.3	178.6	267.9	357.1
Ttr=8 ms	142.9	285.7	428.6	571.4
Ttr=10 ms	178.6	357.1	535.7	714.3
Ttr=12.5 ms	223.2	446.4	669.6	892.9
Ttr=20 ms	357.1	714.3	1071.4	1428.6

Con los valores anteriores se deduce la tasa de transmisión (bits):

$$R = \frac{N_p \cdot CB \cdot CR \cdot BW \cdot \eta}{N_{fft} \cdot (1 + CP)} \quad (1)$$

El parámetro anterior (Ec. 1) es la capacidad del canal sin tener en cuenta tramas, encabezados, etc. Son solamente a nivel de bits sobre el canal.

Las tramas del estándar tienen una duración que oscila entre 2.5, 4, 5, 8, 10, 12.5 y 20 mseg; sin embargo, para configuraciones mesh el tiempo de trama dispuesto por el estándar es de 4 mseg. Dentro de esta trama se encuentra un número de símbolos OFDM:

$$N_{sym} = \frac{T_{tr}}{T_s} \quad (2)$$

Con  $T_{tr}$ : tiempo de trama.

Existen ciertas limitaciones sobre la utilización de la trama por parte de los usuarios. En primer lugar, aparece el concepto de la trama de control, la cual tiene una duración en términos de símbolos OFDM, dada por 7 x MCL (longitud de la subtrama de control). El valor de este parámetro es de 4 bits, con lo que puede oscilar entre 0 y 15. El resto de los símbolos de la trama están ocupados con datos del usuario.

Con base en los valores de parámetros de OFDM, se encuentran diferentes números de símbolos por trama. Se observa en la Tabla I que cuando la trama dura el mayor tiempo posible y se tiene el mayor ancho de banda (equivalente a la menor duración de símbolo), se logra la mayor cantidad de símbolos OFDM por trama.

Todos los datos de la subtrama de control deben ser transmitidos en

QPSK1/2, los símbolos restantes se asignan en conjuntos de minislots a los usuarios. El campo de asignación de minislots se compone de 8 bits, y el valor máximo a asignar en posición y tamaño es 255. Por lo tanto, la parte de la trama restante se divide en minislots de tamaño dado por:

$$M_{size} = Ceil \left( \frac{N_{sym} - 7 \cdot MCL}{256} \right) \quad (3)$$

Todos los minislots de la trama tienen este tamaño, con la posible excepción del último. Cabe anotar que los campos de la subtrama de control no tienen todos su duración como carga útil, ellos tienen un preámbulo largo y unos símbolos de guarda posteriores, con lo cual su duración efectiva se hace más corta. Antes de los datos de control se ubica un Long Preamble equivalente a 2 símbolos OFDM.

En la gráfica *Mesh frame structure* del estándar [18](p.459), se interpreta que luego de la trama de MSH NET ENTRY, aparecen tres símbolos OFDM de guarda. Luego de las tramas de SCHEDULING y de MSH NCFG aparece un símbolo de guarda antes de comenzar la nueva trama. Con esto se reduce aún más el tamaño de la carga útil de estas tramas. En el caso de la subtrama de entrada a la red, se reduce a dos símbolos OFDM o a un total de 384 bits o de 48 bytes únicamente.

El tamaño del minislot es un indicativo de la cantidad de información que se puede transmitir para un determinado usuario en función de símbolos OFDM, no de bits, pues en cada rango de minislots se pueden tener diferentes opciones de configuración de modulación y codificación. El número de minislots estaría dado por:

$$numMS = \frac{N_{sym} - 7 \cdot MCL}{Ceil \left( \frac{N_{sym} - 7 \cdot MSH}{256} \right)} \quad (4)$$

La asignación se realiza por medio de minislots (MS), indicando el MS de inicio y la duración en unidades también de MS.

Teniendo en cuenta que para un enlace determinado el canal estaría

asignado durante un rango de MS, se puede encontrar finalmente la rata de transmisión asignada de manera equivalente al usuario:

$$R_{eq} = \frac{M_{size} \cdot MS_{asignados} \cdot N_p \cdot CB \cdot CR}{T_{tr}} \quad (5)$$

La cantidad anterior indica que la percepción del canal por parte del usuario depende del ancho de banda, del porcentaje del canal asignado, de las portadoras y del esquema de

modulación elegido. La rata de transmisión equivalente es inversamente proporcional a la longitud de guarda elegida para proteger contra multi-trayectoria.

B. Modelo capa MAC mesh IEEE 802.16

El modelo desarrollado fue implementado en el simulador de eventos discretos Network Simulator 2. El diagrama general del modelo se

muestra en la Figura 1, con las entidades que permiten la simulación de la capa MAC del estándar IEEE 802.16-2004 para topología mesh. Se observan las siguientes entidades:

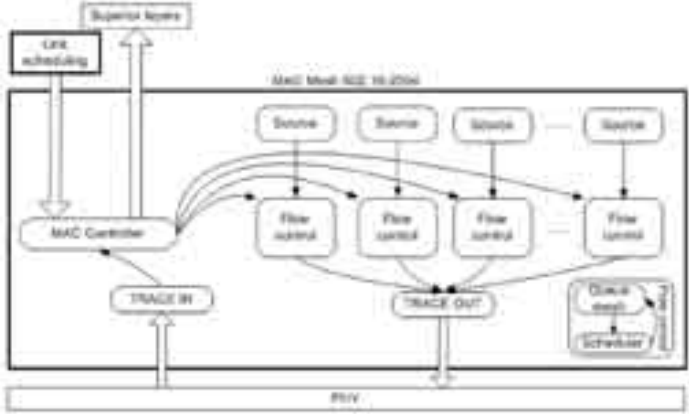


Figura 1. Diagrama general.

1) *Link Scheduling*: Es una entidad codificada en C++ externa a la Capa MAC Mesh 802.16-2004 encargada de la asignación de los parámetros de planificación del sistema. Link Scheduling se comunica con el Controlador MAC para indicarle los tiempos de trama y los tiempos en que cada Planificador debe habilitar su respectiva cola. La entidad posee dos estructuras de apuntadores, una de Controladores MAC y otra de Planificadores. Además, carga los datos de asignación de ranuras y tráfico (en unidades de minislots) de archivos generados por el programa realizado en Matlab que se mencionará en IV-D.

2) *Capa MAC Mesh 802.16-2004*: Es una entidad TCL que contiene otras entidades C++ para su funcionamiento como se observa en 1. El modelo planteado en este trabajo no

tiene en cuenta las capas superiores, por lo tanto las fuentes de tráfico se encuentran dentro de la MAC; el scheduling se realiza de manera global y es centralizado; el planificador de paquetes tiene disciplina de cola FIFO y todos los paquetes son del mismo tipo; no se realizan peticiones de scheduling a la MAC y no se realiza el procedimiento de entrada a la red. Las entidades C++ que contiene son las siguientes:

- *Control de flujo*: está compuesto por dos entidades desarrolladas en C++: ColaMesh y Planificador de paquetes.

En el Control de Flujo la ColaMesh es la encargada de empaquetar los paquetes con el tamaño indicado y modificar el Header OFDM (ver subsección B4) para la transmisión del nuevo paquete del tipo



mesh. Al conectarse ColaMesh con el Planificador, este último recibe el paquete, que a su vez lo envía por su puerto de salida.

- ColaMesh es la entidad encargada de encolar los paquetes hasta que el planificador le indique que desencole. ColaMesh es una entidad realizada en C++, la cual hereda las propiedades y métodos de la clase pública Queue. Posee los siguientes métodos nuevos: a) resumepaq (desencola un determinado número de paquetes, uno por uno sin empaquetamiento); b) resume-paquetes (desencola un determinado número de paquetes, los empaqueta dependiendo del tamaño solicitado y le agrega la cabecera OFDM al nuevo paquete para luego ser enviado al puerto de salida); c) inicializa ofdm (esta función inicializa los valores del Header OFDM que se describirán más adelante). Al emplear resumepaquetes se emplea una función packing para unir n paquetes en uno solo dependiendo del tamaño de paquete solicitado por Planificador.
- El planificador es la entidad encargada de realizar los cálculos que determinan el tamaño del paquete a transmitir (según el estándar); indica el valor del tamaño a ColaMesh. Es una entidad completamente desarrollada en C++ que hereda a la clase pública Connector; posee métodos que permiten

indicar a la cola que inicie desencolamiento o pare. Otra función de esta entidad es que dependiendo del paquete que le llegue o comando ejecutado decide la operación a realizar; si recibe un paquete del tipo control indica a la cola que inicie desencolamiento; si recibe un paquete del tipo OFDM lo envía al puerto de salida.

- *Controlador MAC*: al igual que la entidad Planificador, también es desarrollada completamente en C++ y hereda a la clase Connector. El Controlador se comunica con la entidad Control de Flujo por medio de Planificador para ejecutarle métodos que inicien o paren solicitudes a la cola. Se crea un Control de Flujo para cada conexión y el controlador posee una lista de todos los planificadores. Además, en el controlador se inicializan los parámetros Header OFDM y se selecciona el esquema de modulación a emplear. El controlador MAC recibe de Link Scheduling los tiempos en que se programará cada control de flujo. El Controlador MAC al recibir datos los analiza para determinar si son dirigidos a él; si lo son, los envía a capas superiores.
- *Fuente de datos*: es la encargada de generar los paquetes que serán enviados de un nodo a otro en cada conexión. Como se observa en la Figura 1, el modelo tiene en cuenta que las fuentes son internas en la capa MAC. Se desarrolló una nueva fuente con generación exponencial, tipo de paquete mesh y headers que se mencionarán en

IV-D. A la fuente exponencial se le configura la tasa de generación de paquetes por segundo ( $\lambda$ ) y el tamaño del paquete en bytes. Es de anotar, que la estructura Fuente-Agente no se empleó en el modelo, ya que la nueva fuente se hizo de tal forma que se pudiera realizar la conexión Fuente-MAC mesh 802.16.

3) *Trace, Trace in, Trace out*: Como se sabe los traces son los encargados de medir las variables que se requieran, enviando a un archivo los datos de la simulación. Para analizar las variables y paquetes OFDM creados se desarrolló un nuevo trace: TraceMesh. TraceMesh es una entidad que hereda las propiedades y métodos de Connector y posee las mismas variables y propiedades de Trace. La diferencia con Trace es que guarda o imprime las propiedades de los nuevos paquetes creados en ColaMesh. Imprime los siguientes datos que se encuentran en el header OFDM: Tiempo,  $N_{fft}$ ,  $T_{tr}$ , CP, CR, CB,  $\eta$ , duracionMS, numMS, Tamaño real paquete enviado, Tamaño paquete solicitado para enviar, CIDorigen, CIDdest. En caso de requerirse nueva información es posible agregarla. Para el correcto funcionamiento de la entidad TCL "TraceMesh" fue necesario realizar una súper clase en TCL, llamada "TraceMeshClass" en la cual se le indicaban los tipos de paquetes que podía soportar el trace y principalmente el formato OFDM.

4) *Headers*: Los siguientes headers fueron desarrollados para el funcionamiento del modelo de capa MAC realizado:

- hdrofdm: este header es el principal. En él se guardan todas las

características de los paquetes empleados. Los parámetros que contiene son los siguientes: BW,  $N_{used}$ ,  $n$ , CP,  $N_{fft}$ , FS, subcarrierspacing,  $T_{sym}$ , CPtime, OFDMsymboltime,  $T_{sampling}$ , CR, CB,  $T_{tr}$ , durationMS, delayMS, MSO, MSsize,  $N_{ofdm\ symbol}$ , MCL(MSH\_CTRL\_LEN), CIDorigen, CIDdest.

- hdr-packing: este header es empleado en ColaMesh para determinar la longitud del nuevo paquete y almacenar en un buffer los paquetes que está empaquetando.
- hdr-CtrlTRX: en este header se indica cuánto tiempo tiene el planificador para la ocupación del canal, el cual es igual a  $numMS \times duracionMS$ . Este header también es empleado cuando se envía un paquete de control del controlador MAC al planificador, indicando este tipo de paquete que se debe solicitar a la cola que desencole.

### C. Diagrama de eventos, funcionamiento general

En la Figura 2 se observa el diagrama de eventos que representa el modelo implementado con las características de la capa MAC dadas por el estándar. Los eventos fueron diseñados de tal forma que se pudieran agregar nuevas funciones o características, como por ejemplo el ingreso de nuevos nodos, elección del tipo de modulación dependiendo del canal, cambios de scheduler, entre otros.

Como ya se mencionó el Link Scheduler es el encargado de inicializar los parámetros de las entidades Controlador MAC y Planificadores, con datos obtenidos de archivos de configuración. Como se observa el evento

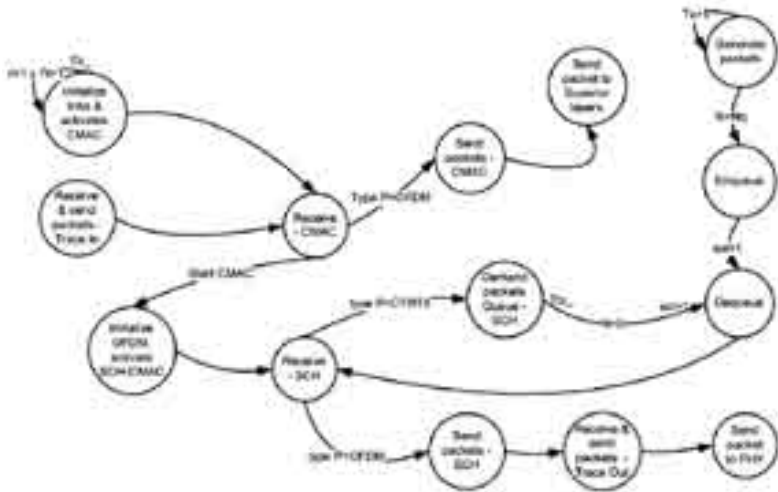


Figura 2. Diagrama de evento del modelo implementado

inicializa enlaces y activa CMAC, puede generar dos eventos, uno para crear el mismo evento y otro para activar los controladores MAC, quienes a su vez inician los planificadores (SCH). El planificador (SCH) es el encargado de habilitar a la cola para que desencole determinada cantidad de bytes, los cuales fueron determinados con las ecuaciones mostradas en la sección de parámetros OFDM. Las demás características se observan en la Figura 2.

#### D. Planificador

El scheduling implementado es del tipo *Pure greedy* [19], [20]. Todos los algoritmos *link scheduling* son centralizados, trabajan fuera de línea y requieren conocimiento global de la red.

El algoritmo busca garantizar que en un enlace (nodo A → nodo B) no resulte en colisión, ya sea en el nodo A o en el nodo B. Se tienen en cuenta dos tipos de colisiones:

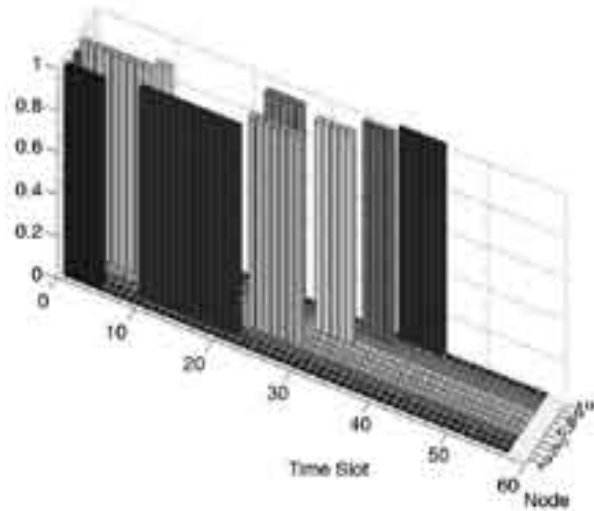
- *Primary interference*: ocurren cuando una estación transmite y recibe la misma ranura.
- *Secondary interference*: ocurren cuando una estación recibe dos o más transmisiones separadas en la misma ranura.

En *link scheduling* no se presentan colisiones y consiste en una secuencia de ranuras fijas, donde a cada enlace se le asigna un determinado número de minislots (MS) y transmite cíclicamente. Para evitar las colisiones determina qué vecinos pueden transmitir en la misma ranura. El algoritmo también asume que la transmisión de una estación es recibida por todas las estaciones con una distancia Euclidiana  $R$ .

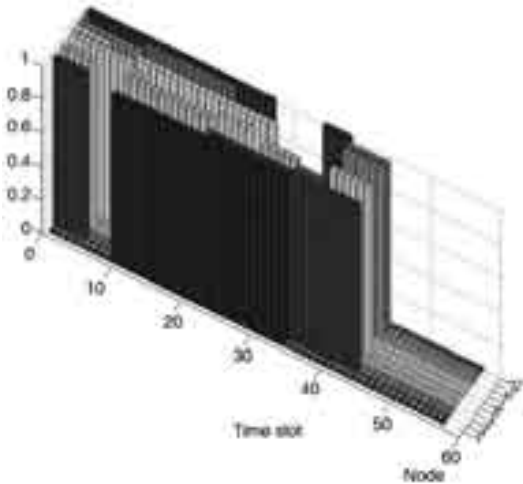
El algoritmo fue implementado en Matlab. Este programa a partir de matriz de tráfico y vecinos, calcula y asigna las ranuras a cada conexión, de tal forma que se minimice en gran medida la duración del ciclo

de transmisión. Los resultados son exportados a archivos, los cuales a su vez son empleados en NS2 por la entidad Link Scheduler para la configuración de los nodos y entidades. En la Figura 3 se observa la asignación de ranuras de transmisión para

una configuración de diez nodos en configuración mesh y en la Figura 4 se muestran las ranuras en que recibe cada nodo, lo que depende de la respectiva asignación de ranuras de transmisión.



**Figura 3.** Asignación de ranuras de transmisión



**Figura 4.** Ranuras de recepción.

## V. RESULTADOS SIMULACIONES

### A. Scheduler TDM

Con el objetivo de analizar el comportamiento del Link Scheduler centralizado implementado, se realizaron diferentes pruebas para determinar distintos aspectos, tales como la duración del ciclo de transmisión y el número de nodos que transmiten y

reciben simultáneamente en función de la conectividad de la red. También se verificó la distribución del ciclo de transmisión y el efecto que ocasiona el orden de asignación de las ranuras en el porcentaje de disminución del ciclo de transmisión, medida como el porcentaje de disminución del ciclo obtenido en el reuso espacial respecto a cuando no se emplea reuso.

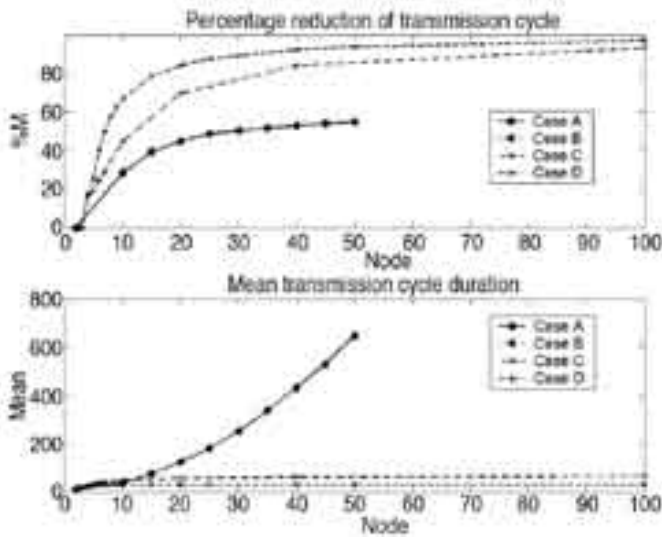


Figura 5. Percentage reduction and mean of the transmission cycle.

Se realizaron dos pruebas para topología mesh y dos para topología en relay, corriendo 1.000 veces el algoritmo de planificación para cada caso. La curva A muestra los resultados para topología mesh respecto al número de nodos y radio constante de transmisión  $R$ . El requerimiento de ranuras es aleatorio para cada enlace y el orden de asignación depende del índice en la tabla de enlaces. La curva B muestra resultados similares al caso A, pero en éste el orden de asignación en el ciclo de transmisión es aleatorio. Las curvas C y D muestran

los resultados para configuración en relay. En el caso C, el orden de asignación depende del índice en la tabla de enlace. En el caso D, el orden es aleatorio.

La Figura 5 presenta los resultados para los casos mencionados anteriormente.

Los resultados muestran que para topologías mesh no afecta si el orden de asignación es determinístico o aleatorio. El porcentaje de minimización del ciclo de transmisión ( $\%M$ ) es cercano al 100% ( $\%M \approx 100\%$ ) cuando

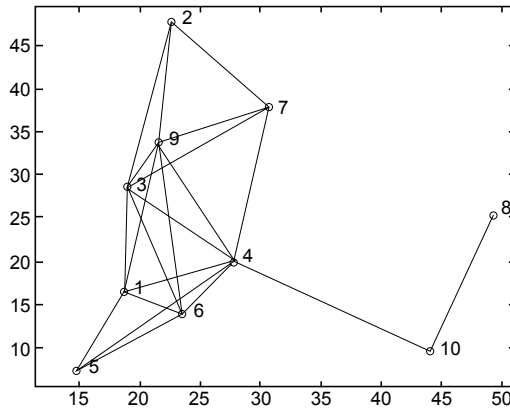


Figura 6. Ubicación de 10 nodos en configuración mesh.

$n \rightarrow \infty$  o bajo ( $\%M < 100\%$ ) cuando  $n$  es pequeño; estos casos son considerados para configuración en relay. El porcentaje de minimización ( $\%M$ ) se calculó con la ecuación 6.

$$\%M = \frac{L_{max} - L_{obt}}{L_{max}} \times 100 \quad (6)$$

$L_{max}$  es el máximo número de ranuras cuando se asigna secuencialmente (sin reuso).  $L_{obt}$  es el número de ranuras asignadas obtenidas con Link Scheduler. Se puede deducir que en configuración relay, el ciclo de transmisión no tiende a incrementar cuando el número de nodos aumenta. También en la ecuación 6 el límite tiende al 100%. En topología mesh, el ciclo de transmisión tiende a incrementar con el número de nodos, pero el porcentaje de minimización no tiende a 100% porque la cantidad en la ecuación 6 también tiende a incrementar.

Con esto se puede decir que en configuración en relay es mejor que la asignación sea en un orden específico dado por el índice de la tabla de enlace. Esto también se puede observar

en la Figura 5, donde  $\%M$  es alto para configuración en relay donde el reuso espacial aumenta con el aumento de la cantidad de nodos.

#### B. Simulación topologías en NS2

Se emplearon 5 escenarios de simulación para obtener resultados de capacidad, retardo y longitud de las colas de sistemas wireless con capa MAC IEEE 802.16-2004. Los escenarios fueron los siguientes:

- 3 nodos en mesh, tráfico idéntico para cada conexión.
- 3 nodos en mesh, tráfico variable para cada conexión.
- 10 nodos en mesh, tráfico variable para cada conexión.
- 10 nodos en relay, tráfico idéntico para cada conexión.
- 10 nodos en relay, con agregación de tráfico para cada conexión ( $T, 2T, 3T, \dots, nT$ ).

En la Figura 6 se muestra la ubicación de una de las topologías simuladas (10 nodos en configuración mesh); las líneas representan las conexiones con los otros nodos de la red, depen-

diendo de la distancia  $R$ . Para todas las simulaciones se emplearon los datos de configuración mostrados en la Tabla II.

**Tabla II.** Datos de configuración de simulaciones.

Esquema de modulación	64-QAM
BW (MHz)	3.5
$\eta$	8/7
$N_m$	256
$N_p$	192
CP	1/4
$T_{tr}$ (ms)	4
CB	6
CR	0.75
MCL	1
l Fuente exponencial	$100 \times T$
Tamaño paquete	100 bytes

**Tabla III.** Ratas de transmisión para diferente tráfico.

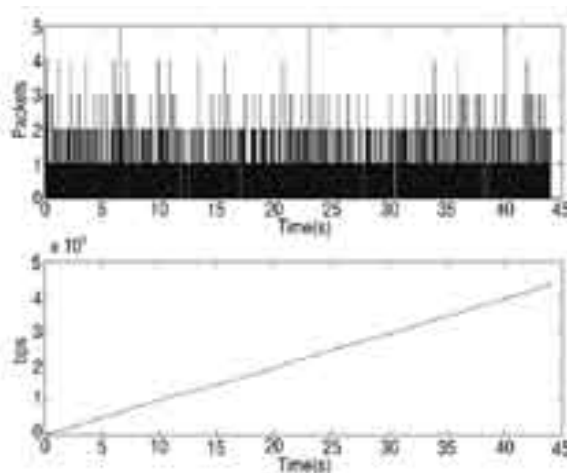
T (MS)	R(kbps)
1	216
2	432
3	648
4	864
5	1080
$\eta$	$n \times 216$

Con estos datos se obtienen las ratas de transmisión teóricas mostradas en la Tabla III.

En la Figura 7 se muestran las gráficas de comportamiento de una cola, curva de llegada y servicio para la red de la Figura 6. Se observa que la cola en un instante de tiempo posee máximo cinco paquetes y nunca pierde paquetes. Detalladamente en la Figura 8 se observa el comportamiento de la llegada de paquetes a la cola y cómo son servidos.

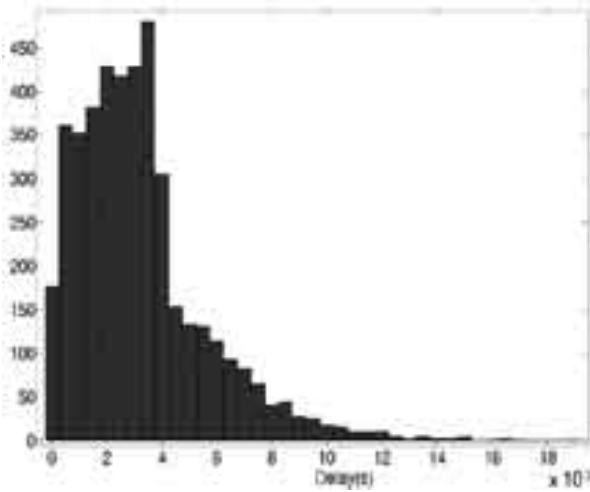
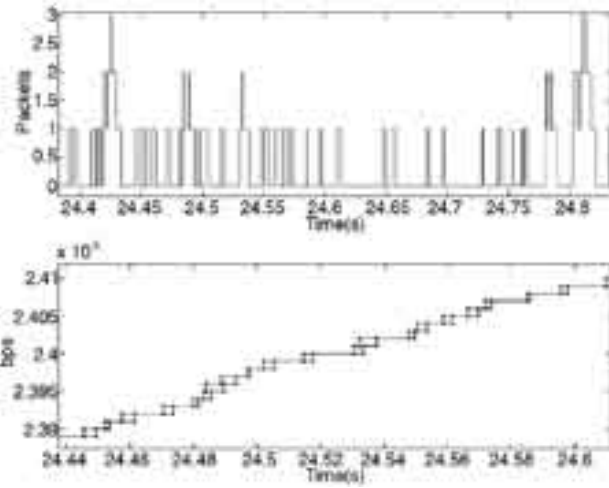
La distribución que siguen los retardos en cola se observa en la Figura 9, y se nota que la media se encuentra alrededor del tiempo de trama ( $T_{tr}$ ).

Los resultados obtenidos para todos los enlaces se muestra en las Figuras 10, 11 y 12. Se observa que la rata de transmisión lograda en promedio (para 1 MS) es muy parecida para todas las colas y que el valor es semejante al encontrado en los cálculos teóricos (Tabla III). Respecto a la longitud de la cola (Figura 11), es observable que es proporcional a la capacidad del enlace, es decir, a la cantidad de minislot asignados. Por



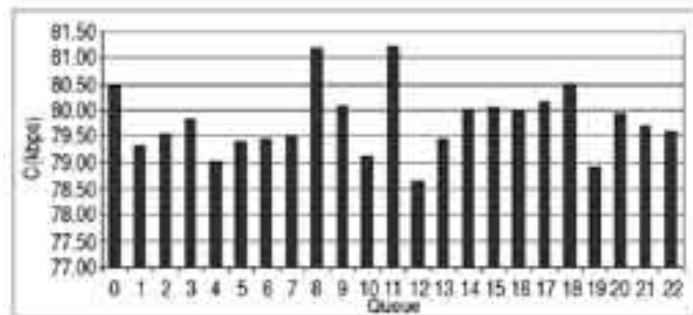
**Figura 7.** Cola 19 en el tiempo, curva de llegada y de servicio.

**Figura 8.** Acercamiento Cola 19 en el tiempo y curva de llegada y de servicio



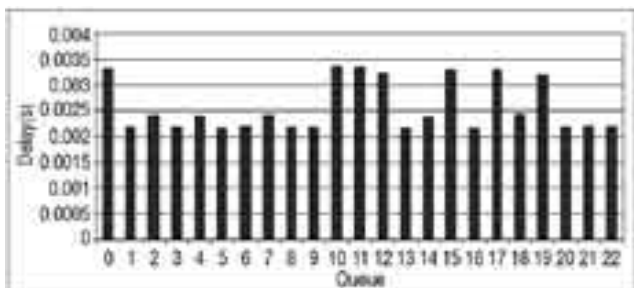
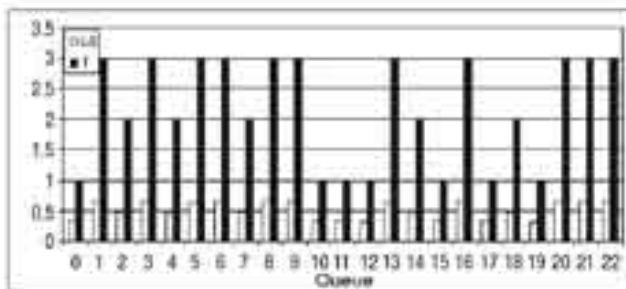
**Figura 9.** Histograma de retardos en Cola 19 - 10 nodos en mesh.

**Figura 10.** Capacidad para 1 MS para cada cola - 10 nodos en mesh.



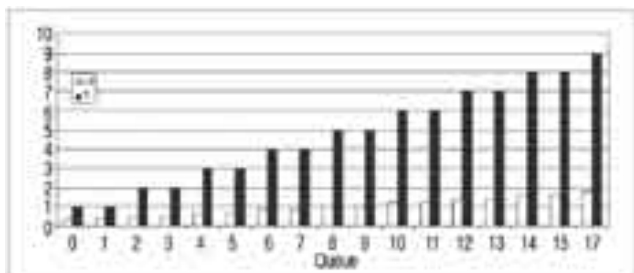
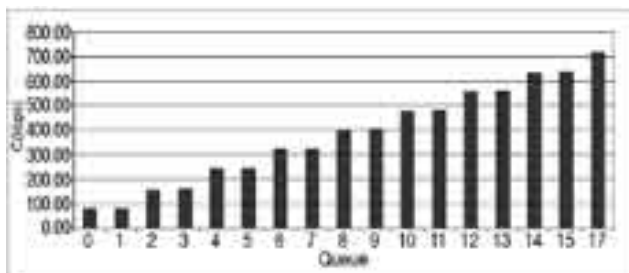


**Figura 11.** Longitud de la cola para cada cola - 10 nodos en mesh.



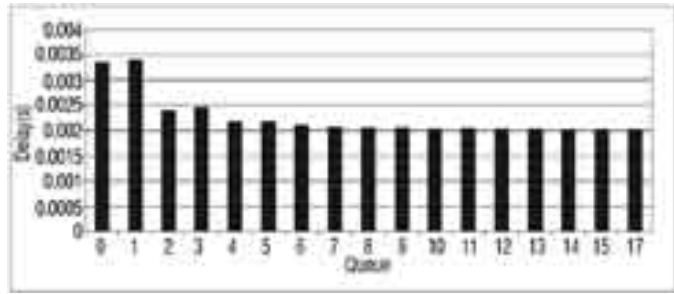
**Figura 12.** Retardo promedio para cada cola - 10 nodos en mesh.

**Figura 13.** Capacidad para cada cola - 10 nodos en relay.



**Figura 14.** Longitud de la cola para cada cola - 10 nodos en relay.

**Figura 15.** Retardo promedio para cada cola - 10 nodos en relay.



último en la Figura 12 se muestra que el valor promedio de retardo se encuentra por debajo del valor de tiempo de trama (4 ms).

Otros resultados obtenidos se muestran en las Figuras 13, 14 y 15. En éstas, se observan los resultados para una configuración de 10 nodos en relay con agregación de tráfico en una unidad cada salto, es decir, se simula el caso en que cada salto transmite sus propios datos y los anteriores (Tráfico: T, 2T, 3T,..., nT).

Es observable en las gráficas que es posible que cada cola transmita la cantidad de datos exigida, sin embargo, el planificador no asignó recursos al último salto porque interfería con otras transmisiones, es decir, los paquetes que estaban dirigidos al último nodo nunca llegaron a él.

## VI. CONCLUSIONES

En este artículo se propone un modelo de capa MAC para el estándar IEEE 802.16, el cual sirve para simular redes inalámbricas mesh; brindando con esto herramientas que permitan el análisis de planificadores, longitud y retardo en las colas, modelos de propagación, capacidad, otros. Son posibles además modificaciones para hacer extensiones a PMP.

El modelo propuesto está compuesto por módulos que se pueden adaptar para agregar funciones y características del estándar tales como inicialización de nodos, entrada a la red, planificación, esquemas de modulación y esquemas de codificación adaptativa.

Es necesario que la red disponga un buen algoritmo de planificación, capaz de asignar las ranuras de tiempo disponibles a la mayor cantidad de enlaces haciendo buen uso del reuso espacial. El motivo de esto es que para redes mesh el tiempo de trama dado por el estándar es muy corto, por lo cual la cantidad de minislot disponibles para asignar en el sistema son pocos y requiere una buena eficiencia en el ciclo de planificación.

En caso de topología relay, el planificador de enlace posee mejores características en cuanto a la duración del ciclo de transmisión se refiere, ya que después de cierta asignación de ranuras, asigna los mismos tiempos de transmisión cada tres saltos, mejorando con esto el reuso espacial.

Se puede observar que la capacidad de las redes mostradas (ranuradas) es muy similar a los valores teóricos. Los nodos que manejan tráfico de otros usuarios deben recibir mayor

asignación de recursos que los otros nodos que no lo hacen.

Sin embargo, es necesario analizar estos sistemas en condiciones más reales con errores en el canal.

El retardo promedio de un paquete en cola se mantiene por debajo del valor del tiempo de trama para casos donde la tasa de llegada a la cola es tal que se puedan transmitir en la trama siguiente.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los evaluadores anónimos por sus sugerencias.

### BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Bolcskel, A. J. Paulraj, K. V. S. Hari, R. U. Nabar, and W. W. Lu, "Fixed broadband wireless access: state of the art, challenges, and future directions," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 39, pp. 100–108, 2001.
- [2] C. Tschudin, P. Gunningberg, H. Lundgren, and E. Nordström, "Lessons from experimental magnet research," *Elsevier Ad Hoc Networks Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 221–233, March 2005.
- [3] R. Bruno, M. Conti, and E. Gregori, "Mesh networks: commodity multihop ad hoc networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 43, pp. 123–131, 2005.
- [4] K. Balaji, N. Hegde, B. V. Ramana, B. S. Manoj, and C. S. R. Murthy, "Performance evaluation of a hybrid wireless network architecture for rural communication," in *Personal Wireless Communications, 2005. ICPWC 2005. 2005 IEEE International Conference on*, 2005, pp. 212–216.
- [5] P. Gupta and P. Kumar, "The capacity of wireless networks," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 46, no. 2, pp. 388–404, 2000.
- [6] C.-S. Chang, "Stability, queue length, and delay of deterministic and stochastic queueing networks," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 39, pp. 913–931, 1994.
- [7] A. W. Berger and W. Whitt, "Extending the effective bandwidth concept to networks with priority classes," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 36, pp. 78–83, 1998.
- [8] C. Cicconetti, L. Lenzini, E. Mingozzi, and C. Eklund, "Quality of service support in IEEE 802.16 networks," *IEEE Network*, vol. 20, no. 2, pp. 50–55, 2006.
- [9] G. Chu, D. Wang, and S. Mei, "A qos architecture for the MAC protocol of IEEE 802.16 BWA system," in *Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions, IEEE 2002 International Conference on*, vol. 1, 2002, pp. 435–439.
- [10] S. Naghian, "Mesh vs. point-to-multipoint topology: a coverage and spectrum efficiency comparison," in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004. PIMRC 2004. 15th IEEE International Symposium on*, vol. 2, 2004, pp. 1048–1051.
- [11] H.-L. Chao and W. Liao, "Fair scheduling with qos support in wireless ad hoc networks,"

- IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 6, pp. 2119–2128, 2004.
- [12] M. Cao, W. Ma, Q. Zhang, X. Wang, and W. Zhu, “Modelling and performance analysis of the distributed scheduler in ieee 802.16 mesh mode,” in *MobiHoc '05: Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. New York, NY, USA: ACM Press, 2005, pp. 78–89.
- [13] D.-H. Cho, J.-H. Song, M.-S. Kim, and K.-J. Han, “Performance analysis of the ieee 802.16 wireless metropolitan area network,” in *Distributed Frameworks for Multimedia Applications, 2005. DFMA '05. First International Conference on*, 2005, pp. 130–136.
- [14] S. Redana and M. Lott, “Performance analysis of ieee 802.16a in mesh operation mode,” in *1st mobile and wireless communications summit 2004*, 2004.
- [15] P. Bjoorklund, P. Varbrand, and D. Yuan, “A column generation method for spatial tdma scheduling in ad hoc networks,” Department of Science and Technology, Linkoping Institute of Technology, Tech. Rep. LiTHITN- R-2003-9, 2003.
- [16] S. Ramanathan and E. L. Lloyd, “Scheduling algorithms for multihop radio networks,” in *SIGCOMM '92: Conference proceedings on Communications architectures & protocols*. New York, NY, USA: ACM Press, 1992, pp. 211–222.
- [17] I. W. 802.16, “The ieee 802.16 working group on broadband wireless access standards,” 1998.
- [18] I. S. 802.16, “IEEE standard for local and metropolitan area networks part 16: Air interface for fixed broadband wireless access systems,” in *IEEE Std 802.16-2004 (Revision of IEEE Std 802.16-2001)*, 2004, pp. 1–857.
- [19] R. L. Errol, “A distributed protocol for adaptive link scheduling in ad-hoc networks,” p. 11, 2000. [Online]. Available: [citeseer.ist.psu.edu/578259.html](http://citeseer.ist.psu.edu/578259.html)
- [20] P. V. Patrik Bjorklund and D. Yuan, “A column generation method for spatial tdma scheduling in ad hoc networks,” in *Elsevier Science*, 2003.

## CURRÍCULOS

**Javier Sierra** (Javier.sierra@upb.edu.co) recibió su título de Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional de Colombia en el año 2003 y su magíster en Ingeniería área Telecomunicaciones en la Universidad Pontificia Bolivariana en el 2007, donde actualmente es estudiante del doctorado en Ingeniería con el soporte de Colciencias. Trabaja para el grupo de investigación GIDATI. Entre sus áreas de interés se encuentran las redes inalámbricas, redes mesh, redes híbridas óptico-inalámbricas, optimización de redes ópticas y técnicas de simulación.

**Leonardo Betancur** (leonardo.betancur@upb.edu.co) recibió su

título de Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional de Colombia en 2003 y recibió su título de Magíster en Telecomunicaciones en la Universidad Pontificia Bolivariana en 2007, en donde actualmente realiza sus estudios de Doctorado en Telecomunicaciones con el apoyo de Colciencias. Perteneció al grupo de investigación GIDATI, y actualmente sus intereses en temas de investigación incluyen redes inalámbricas, redes de sensores, UWB y aplicaciones y tecnologías para ambientes indoor.

**Roberto Hincapie** (roberto.hincapie@upb.edu.co) recibió su título de Ingeniero Electrónico en 1996 y su título de Magíster en Telecomunicaciones en 2006 en la Universidad Pontificia Bo-

livariana, en donde actualmente es estudiante del doctorado en Ingeniería con el apoyo de Colciencias, Es miembro del grupo de investigación GIDATI. Sus temas de interés abarcan Redes inalámbricas, redes enmalladas, algoritmos para planificadores con soporte de calidad de servicio y técnicas de simulación.

**Roberto Bustamante Millar** (rbustama@uniandes.edu.co) es Ingeniero Electrónico, graduado en la Universidad de Surrey, Inglaterra. PhD en Ingeniería Electrónica (Antenas Adaptativas), Universidad de Surrey, Inglaterra. Actualmente es profesor Asociado de la Universidad de los Andes y director del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. 