

## Análisis, modelamiento y simulación de redes enmalladas basadas en el estándar 802.16-2004

Roberto Bustamante Miller PhD.

Laboratorio de Investigación en Sistemas Inalámbricos (LISI), Grupo GEST  
Universidad de los Andes  
rbustama@uniandes.edu.co

Roberto Carlos Hincapié Reyes MSc.

Grupo de investigación, desarrollo y aplicación en Telecomunicaciones e  
Informática Gidati  
Universidad Pontificia Bolivariana  
roberto@upb.edu.co

Fecha de recepción: 25-07-2005

Fecha de aceptación: 18-11-2005

### ABSTRACT

The following article is a presentation of mesh networks based on IEEE Standard 802.16-2004. Though it provides a general description of this standard, it also includes specific characteristics of mesh networks.

It also discusses technology issues associated with existing gaps found in the above mentioned standard which have not yet been resolved. It also describes typical problems of mesh networks which hinder implementation of these kinds of networks based on this or any other standard.

The last section of this paper presents information on the progress being

made as the result of the joint effort of the universities involved in this project, including the conclusions that have been drawn so far.

### KEY WORDS

Mesh Networks, Wimax, 802.16, Simulation, Modeling

### RESUMEN

El siguiente artículo es una presentación de las redes enmalladas basadas en el estándar 802.16-2004 de la IEEE, describiendo características generales de este estándar y las específicas que provee para las redes enmalladas. Se muestran los problemas que afronta la tecnología, repre-

sentados en los temas abiertos que deja el estándar y que aún falta por resolver, así como los problemas inherentes a las redes enmalladas que dificultan su implementación basadas en este o cualquier otro estándar.

El artículo termina presentando el desarrollo que se está haciendo de manera conjunta por las universida-

des involucradas en el proyecto y las conclusiones derivadas hasta el momento.

#### **PALABRAS CLAVE**

Redes enmalladas, Wimax, 802.16, simulación, modelamiento.

Clasificación Colciencias: A

## I. INTRODUCCIÓN

El acceso de los usuarios a redes de banda ancha, orientadas a la transmisión de datos, se ha vuelto una necesidad apremiante para las empresas de telecomunicaciones. Diversas modalidades de acceso como las redes DSL y HFC, basadas en redes fijas alambradas, son una solución válida en las zonas que son cubiertas por estas redes. Sin embargo, en las regiones que no cuentan con esta infraestructura de comunicación, los accesos inalámbricos son una gran alternativa.

Dentro de las soluciones inalámbricas aparece el estándar 802.16,<sup>1</sup> que ofrece soluciones a los problemas de propagación en ambientes rurales, a distancias considerables y con anchos de banda grandes. Este estándar provee un amplio rango de soluciones para sistemas que van desde configuraciones punto multipunto hasta configuraciones enmalladas, desde sistemas basados en portadora única hasta basados en múltiples portadoras y que incluyen rangos de modulación y codificación de acuerdo con las condiciones del canal.<sup>2,3,4</sup>

Dentro del estándar se eligió trabajar sobre las llamadas redes enmalladas, las cuales presentan un conjunto de propiedades deseables como la robustez y la capacidad de extender la cobertura de redes fijas o inalámbricas, apoyadas en una estación base, hacia usuarios remotos que no pueden acceder a ellas directamente por causa de obstáculos, distancia o carencia de infraestructura.

El trabajo con este tipo de redes involucra un conjunto de aspectos técnicos que es necesario resolver, como el dimensionamiento de las redes, por

la falta de ecuaciones o modelos que permitan obtener la solución más óptima ante cierta necesidad. Más aún, no se cuenta con despliegues de esta tecnología en el modo enmallado que permita entender el funcionamiento y tomar mediciones que ayuden a construir un modelo. Por esto es necesario plantear modelos teóricos y basados en simulación para entender su operación y ayudar en el planteamiento de modelos equivalentes del sistema.

Se presentan algunos apartes del estándar 802.16-2004, necesarios para entender el trabajo desarrollado, posteriormente varios conceptos de las redes enmalladas, los modelos de simulación que se están desarrollando y finalmente algunas conclusiones.

## 2. ESTÁNDAR 802.16-2004

El grupo de trabajo IEEE 802.16,<sup>1</sup> ha creado un nuevo estándar para acceso inalámbrico de alta velocidad y bajo costo, con facilidad de implantación y que provee una solución escalable al problema de extender las redes fijas hacia usuarios remotos. Los enlaces basados en este estándar cubren distancias tan grandes como siete kilómetros, con velocidades alrededor de los 70 Mbps, en condiciones óptimas como la presencia de línea de vista.

Más allá de crear accesos a usuarios por medio de un simple salto inalámbrico, la tecnología puede ser utilizada para crear soluciones de *backhaul* de área amplia. Cuando la solución se despliega en modo enmallado no solamente incrementa la cobertura sino que provee menores costos de instalación, un más rápido despliegue y opciones de reconfiguración.

La primera versión del estándar, conocida como la 802.16, presentó las condiciones necesarias a nivel de capas PHY & MAC para el despliegue de redes en topología punto multipunto, con frecuencias superiores a los 11 GHz y por lo tanto con requerimientos de línea de vista. Este sistema utiliza una modulación de portadora única de ancho de banda grande.

La primera revisión corresponde al 802.16a, el cual modifica las condiciones anteriores y permite operaciones con frecuencias menores a 11 GHz e incluye los modos de operación sin línea de vista y la modulación con la tecnología OFDM.<sup>5</sup>

Una revisión final de este estándar correspondió a la llamada 802.16-2004 u 802.16d, la cual resume los conceptos establecidos en las versiones anteriores y determina cuatro tipos de tecnologías físicas orientadas a portadora única SC (*Single Carrier*) y a múltiples portadoras (OFDM). Define adicionalmente el modo de operación punto multipunto PMP y el modo de operación enmallado.

El estándar de la IEEE define los flujos de señalización y los formatos de los mensajes necesarios para el establecimiento y mantenimiento de la conexión en los modos de operación descritos anteriormente, sin embargo deja abiertos ciertos aspectos como el diseño y operación de los algoritmos de planificación o *Scheduling algorithms*. Se dejó el trabajo de desarrollarlos a los fabricantes de equipos, lo cual quizás agregue niveles de competencia entre ellos.

El estándar plantea un sistema físico orientado a la transmisión de señales de banda ancha a gran velocidad en ambientes rurales o urbanos. Estas

señales experimentan problemas como la multitrayectoria<sup>6</sup> que ocasiona una distorsión en el tiempo de la señal por cuenta de las diversas componentes que llegan al receptor con retardos variables unas respecto de otras. Este problema hace que las componentes de frecuencia de la señal sean tratadas de forma diferente, al contrario de los canales de banda angosta, donde el efecto del canal es el mismo en todas las frecuencias. El estándar define técnicas como el aumento de los tiempos de duración de los símbolos por medio de su descomposición en múltiples portadoras como es el caso del OFDM. Adicionalmente se definen mecanismos como el tiempo de guarda, para mitigar el problema de la interferencia intersimbólica y mecanismos de modulación y codificación adaptativas, para permitir acondicionar la comunicación al estado de atenuación del canal y lograr mayor rapidez o mayor robustez, según sea la necesidad.

La capa MAC del estándar es orientada a la conexión aunque transporte información de protocolos de capas superiores que no sean orientados a la conexión. Se compone de una subcapa superior de convergencia que adapta la información de protocolos de red a las unidades de datos de la capa MAC inferior. La subcapa de convergencia está especificada para recibir datos de redes basadas en IP y ATM, pero el estándar permite la inclusión futura de más tipos de datos.

La subcapa común de la capa MAC provee los servicios de clasificación, empaquetamiento y fragmentación de los paquetes recibidos. La clasificación se da en función de flujos de conexión, descritos por medio de un *Connection Identifier* o CID. Éste determina

completamente las condiciones de la comunicación como capacidad, modulación y codificación utilizadas, tiempos de transmisión asignados en la trama de datos y puede contar con mecanismos adicionales de verificación de errores como el ARQ.

La capa MAC es responsable del proceso de entrada del nodo a la red, registro del usuario y solicitud del ancho de banda necesario para la comunicación. En el modo enmallado es adicionalmente responsable de conectarse con los demás nodos del vecindario.

Como se mencionó anteriormente, la capa MAC tiene la función de realizar la negociación de la capacidad asignada a cada conexión y de acuerdo con los requerimientos del tipo de tráfico que transporta. Se definen los niveles de calidad de servicio como UGS, rtPS, nrtPS y BE, de acuerdo con las necesidades de ancho de banda y retardo de los usuarios.

De manera complementaria al estándar, aparece el Wimax Forum,<sup>7</sup> que determina los aspectos concretos de la implementación de esta tecnología. Este consorcio de empresas se ha encargado de crear una metodología de verificación de la interoperabilidad de los equipos de los diferentes fabricantes, de una manera similar a la forma como opera el WiFi. Se espera que para finales de 2005 se emitan los primeros certificados para equipos en la banda de frecuencias de 3.5 GHz, conocidos como la primera *ola Wimax*.

Existen muchos problemas en el desarrollo de la tecnología, como el modelamiento y diseño de algoritmos de planificación, controles de admisión, parámetros de diseño orientados a la garantía de la calidad de servicio y el aprovechamiento óptimo de los recur-

sos. El problema del dimensionamiento aún sigue abierto pues depende de los algoritmos mencionados.<sup>8</sup> El hecho de ser una tecnología naciente hace imposible realizar muchas pruebas del funcionamiento del mismo, por lo que su análisis cae en el campo de la simulación y el modelamiento teórico de los sistemas.

### 3. REDES ENMALLADAS

Una red enmallada es compuesta por una colección de nodos que se comunican entre sí, de manera directa. Si no hay necesidad de una entidad centralizada que los controle,<sup>9</sup> el modo de operación se conoce como distribuido, pero puede existir una entidad central que administre las condiciones de operación de la red, en cuyo caso se conoce como centralizado.

En cualquier caso, la comunicación se realiza entre los nodos directamente y cada nodo puede ser al mismo tiempo fuente o destino de los datos o un enrutador de la información de otro nodo.

En la Figura 1 se muestra un diagrama de una red de múltiples saltos, donde la información es llevada desde un extremo a otro por diferentes nodos.



**Figura 1.** Red enmallada.

Si los nodos de la red se conectan de manera autónoma, sin configuración previa, se dice que la red opera en

modo *ad hoc*. Si los nodos tienen movilidad, entonces se conocen como redes móviles *ad hoc* o MANET (Mobile ad hoc NETWORK). Su característica principal es que existe un continuo cambio en la topología de la red, con enlaces que aparecen y desaparecen de modo permanente.

Las características más relevantes de las redes enmalladas inalámbricas son las siguientes:

- **Robustez:** La presencia de enlaces redundantes entre los usuarios permite que la red se reconfigure automáticamente ante fallas.
- **Topología dinámica:** Se supone que las redes enmalladas tienen la capacidad de reaccionar ante cambios de la topología de la red. Por lo tanto la topología cambiante es una condición de diseño necesaria.
- **Ancho de banda limitado:** Como el proceso de comunicación exige transportar datos de otros usuarios y la cercanía de unos con otros precisa una coordinación en los tiempos de transmisión, las redes enmalladas cuentan con enlaces que usualmente permanecen en condiciones de congestión. Existen esfuerzos importantes en el estándar 802.16-2004 para mejorar el acceso al medio y lograr mejores desempeños en la red. Las primeras versiones de redes enmalladas basadas en el estándar 802.11<sup>14,15</sup> son bastante ineficientes en el aprovechamiento del espectro.
- **Seguridad:** La información transmitida se encuentra expuesta a la amenaza de viajar a

través de un medio compartido. El estándar define una subcapa de seguridad para proteger la información de los usuarios y evitar el acceso de usuarios no autorizados.

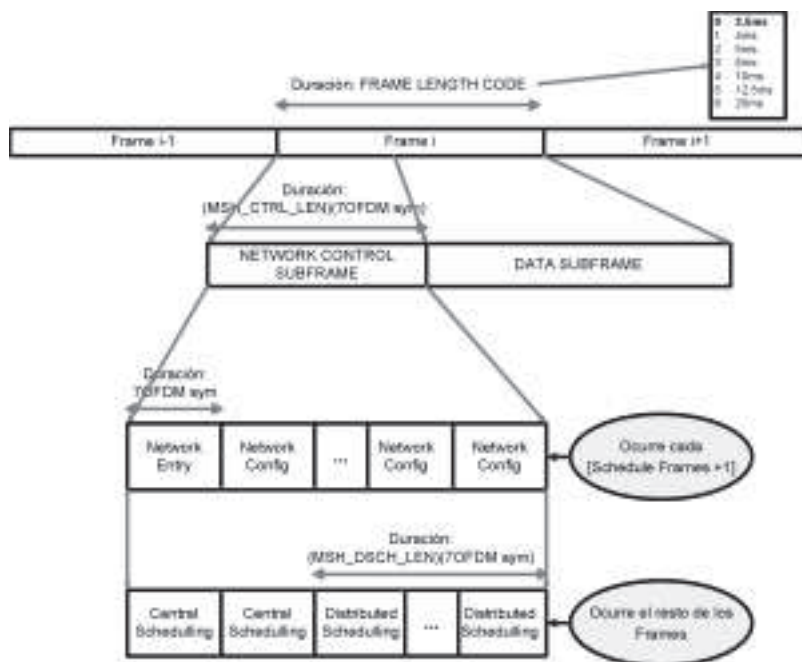
- **Canales de comunicación aleatorios:** A diferencia de las redes fijas, las redes inalámbricas cuentan con la incertidumbre propia de los canales de comunicación de radio. La característica cambiante de los mismos hace bastante inciertas las condiciones de comunicación. El estándar define aspectos como la modulación y codificación adaptativas para hacer frente a este problema.
- **Carencia de modelos de dimensionamiento apropiados:** El modelo de capacidad de redes de datos está orientado a determinar la capacidad del enlace ante procesos de multiplexación de la información de los usuarios. El modelo de capacidad de las redes enmalladas de múltiples saltos es un problema abierto<sup>8,10,11,12</sup>

Las redes enmalladas proveen, sin embargo, condiciones que permiten el acceso a usuarios en regiones apartadas. Hay artículos<sup>13</sup> que muestran cómo la capacidad de un usuario aumenta cuando se pueden utilizar saltos intermedios para acceder a la estación base. A medida que un usuario se aleja, la velocidad del canal disminuye por cuenta de la reducción del esquema de modulación y el aumento de la robustez de la codificación para compensar la disminución de la potencia recibida. Si este usuario se puede conectar a la estación base por medio de dos o más saltos, de menor distancia, se podría contar con enla-

ces de mayor velocidad, aumentando su capacidad. Este argumento no es completamente válido si no se tiene en cuenta que al aumentar los usuarios que acceden de la misma forma, la agregación de tráfico en el nodo intermedio hace que la capacidad no pueda incrementarse de la manera pensada. Sin embargo, debe poderse encontrar un punto intermedio que mejore las condiciones respecto a la solución punto multipunto. Esta es la hipótesis fundamental del trabajo, donde las estaciones base de los sistemas de acceso serán ubicadas en zonas de alta densidad de usuarios, pero la cobertura de las regiones alejadas, puede lograrse por medio de mallas que extiendan la cobertura de la celda.

El estándar 802.16-2004<sup>1</sup> define las diferentes tramas, campos y procesos necesarios para el establecimiento y

operación de las redes enmalladas, así como las condiciones de las tramas y subtramas para la comunicación. Al contrario del sistema de PMP, no se define una trama de uplink y otra de downlink, sino un conjunto de tramas donde los usuarios pueden transmitir, previa asignación de rangos de tiempo. Las tramas se dividen en subtramas de control y de datos. Las primeras permiten controlar la operación de la malla y realizar procesos de solicitud y asignación de capacidad. Las subtramas de datos son divididas en unidades de tamaño fijo, llamadas *minislots*, las cuales son la unidad de asignación de la capacidad a los usuarios. Un usuario puede recibir entre 1 y 256 unidades anteriores, especificando el *minislot* de origen y la cantidad de *minislots* asignados. En la Figura 2 se muestran algunos aspectos de estas tramas.



**Figura 2.** Tramas del modelo enmallado.

Los procesos desarrollados en las redes enmalladas se pueden dividir en tres fundamentalmente, entrada a la red, establecimiento de enlaces y negociación de la capacidad.

### 3.1 Entrada a la red

Cuando un nodo aparece en la red, bien sea porque se acerca a su área de cobertura o porque es encendido, debe buscar sincronizarse con la red. Esto se logra explorando los campos de las

tramas recibidas hasta encontrar un mensaje de configuración llamado MSH-NCFG. Una vez determinadas las condiciones de la red, debe elegir un nodo patrocinador o *Sponsor*; el cual determinará su ingreso o no a la red. Este proceso se muestra en la Figura 3. El proceso incluye la sincronización fina debido a retardos de propagación, asignación de una dirección IP, configuración adicional del nodo y autorización del ingreso del nodo.

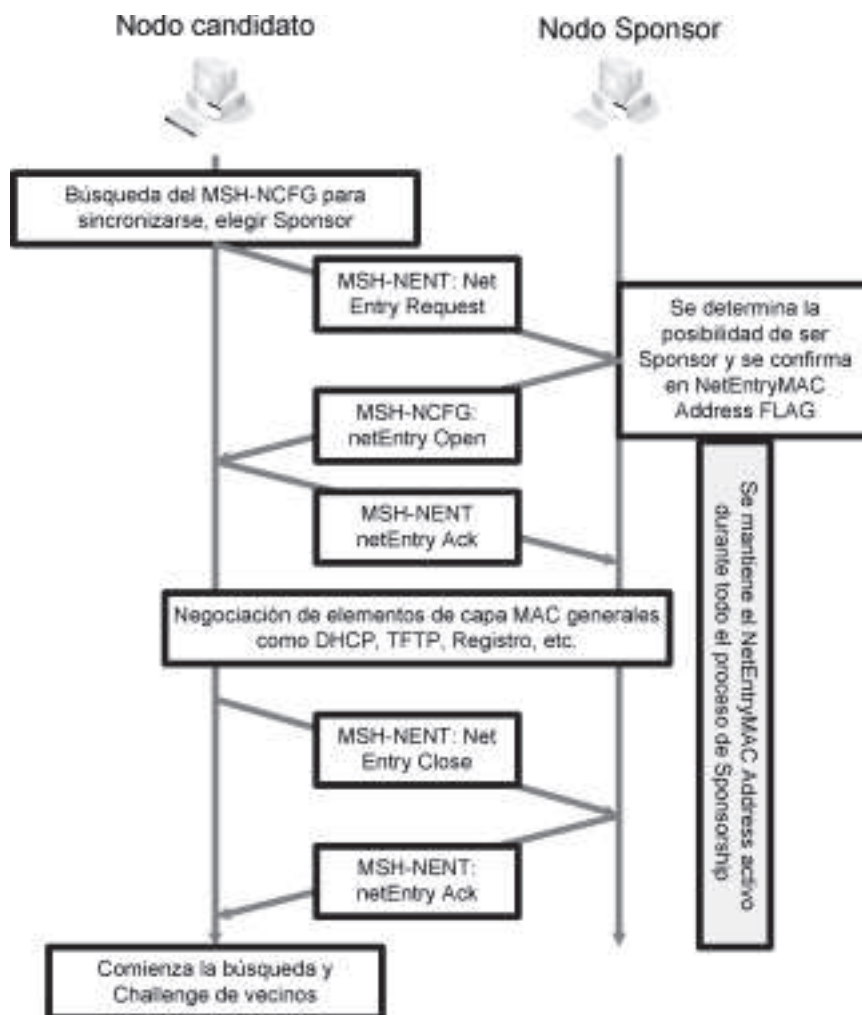


Figura 3. Entrada de un nodo a la red.



### 3.2 Establecimiento de enlaces

Cuando el nodo logra su entrada a la red debe establecer enlaces con sus vecinos. El nodo escucha permanentemente los mensajes transmitidos en la red, hasta determinar los vecinos que se encuentran a su alrededor, posteriormente el nodo les envía mensajes para establecer enlaces con ellos. En este caso, entre dos nodos se crea una etiqueta del enlace o Link ID, correspondiente a los ocho bits inferiores del CID definido anteriormente. Los nodos negocian la velocidad de comunicación y condiciones de modulación y codificación a utilizar en este enlace. Todo el proceso de negociación se realiza por medio de encabezados de configuración, transmitidos a velocidad y codificación común y robusta. El proceso de establecimiento del enlace se muestra en la Figura 4.

### 3.3 Procesos de planificación

Este aspecto es dejado como un tema abierto en el estándar. Se definen dos métodos: centralizado y distribuido con coordinación y sin ella. En todos ellos el estándar define los procesos, campos y señalización para que un nodo pueda solicitar capacidad (Request) y para que se pueda asignar esta capacidad (Grant).

El método centralizado se utiliza cuando la variabilidad del tráfico de los nodos es lo suficientemente lenta como para que se justifique todo el proceso de recolección de las peticiones hasta un nodo centralizado y el tiempo necesario para la distribución del nuevo esquema de asignación. En este caso hay un nodo que conoce el estado de toda la red.

El método distribuido está orientado a sistemas en los cuales las asigna-

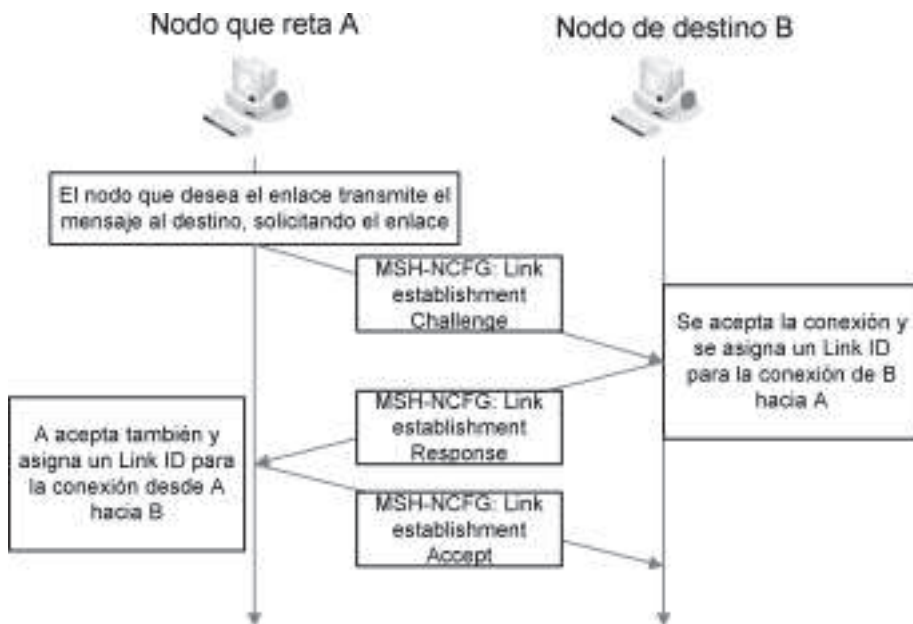


Figura 4. Establecimiento de enlaces entre nodos.

ciones de capacidad son cambiadas permanentemente, sin la posibilidad de esperar mientras se centraliza la información. El costo son algoritmos computacionales muy complejos, usualmente de órdenes de complejidad no polinómicos (NP).<sup>8,16</sup>

Los algoritmos de planificación son un tema de investigación abierto pues se necesita el desarrollo de modelos simples que puedan ser aplicados en tiempo real en máquinas de baja capacidad computacional, con requerimientos de cálculo bajos.

### 3.4 Otros aspectos de las redes enmalladas

El estándar define conceptos de calidad de servicio (relacionados con el ancho de banda y el retardo de los paquetes) con una alta flexibilidad para las redes PMP basadas en un solo salto. Sin embargo, el lograr el mismo nivel de desempeño en redes de múltiples saltos es un problema importante.

Los modelos matemáticos desarrollados para medir la capacidad de los enlaces se basan en principios como la independencia estadística entre las diferentes fuentes de datos que acceden a una cola de transmisión. Sin embargo, en una red, donde los datos son transmitidos de nodo en nodo, la llegada de los datos a uno de ellos, procedentes de diferentes nodos, son variables aleatorias usualmente correlacionadas por haber transitado a través de otros nodos comunes en la red. Por ejemplo, nodos utilizados por muchas rutas en la red, producen retardos similares en los paquetes que circulan a través de ellos.

Otro problema de estos modelos matemáticos es la necesidad de simpli-

ficación para poder encontrar soluciones cerradas a las ecuaciones, como es el caso de los modelos de capacidad de Gupta.<sup>10,11,12</sup> Los límites obtenidos por dichos autores son bastante amplios y de poca utilidad en el proceso de diseño en ingeniería. Son orientados a conocer tendencias de las variables, como por ejemplo para determinar la variación de la capacidad ante el aumento del número de nodos.

Relacionar las ecuaciones obtenidas por diversos autores puede mostrar diferencias de uno o dos órdenes de magnitud. Es necesario desarrollar modelos más concretos, que den resultados más detallados, aunque implique la solución numérica de ecuaciones.

Finalmente los modelos matemáticos se orientan a definir límites para la capacidad de la red o para el retardo de los paquetes en la misma. No toman ambos problemas de manera simultánea.<sup>8</sup> En este sentido es necesario mencionar que no significa que no se alcancen resultados en ambas direcciones, sino que pueden obtener resultados muy concretos en una de las variables, pero muy vagos, amplios y poco concluyentes en otra de ellas. En ese sentido establecen límites, ciertos pero imprácticos. Por ejemplo, no tiene sentido hacer un modelo matemático que prediga que la velocidad de un vehículo de combustión de gasolina no puede superar los 50000 m/s. Es una cantidad cierta, pero aún completamente inalcanzable, por lo cual no dice mucho.

En cuanto a las redes enmalladas, uno de los mayores problemas es lidiar con la interferencia producida por la transmisión de los nodos veci-

nos. Se define dentro del estándar que un nodo debe coordinar su transmisión con el llamado vecindario extendido, compuesto por sus vecinos y los vecinos de ellos. El proceso de diseño basado en varias capas o *cross-layer*, campañas de simulación y el desarrollo de modelos matemáticos y estadísticos es necesario para estimar posibles soluciones óptimas a estos problemas.

Un aspecto inquietante del problema planteado es que mientras el estándar define ciertos aspectos muy detalladamente, quedan otros elementos sin la más mínima definición y se encuentran relacionados entre sí. Este es el caso de las condiciones físicas del modelo de transmisión. Por ejemplo, para una comunicación basada en OFDM en redes enmalladas, se puede calcular que la capacidad equivalente vista por un enlace entre dos nodos está dada por:

$$C_{eq} = K \frac{BW \cdot n}{N_{fft} (1+CP)} N_{portadoras} \cdot CB \cdot CR$$

**Ecuación 1.** Capacidad equivalente de un enlace en redes enmalladas.

Donde **K** es un factor que depende del número **M** de *minislots* asignados a un enlace y está dado por:

$$K = M \cdot CEIL \left( \frac{\frac{T_{trama} \cdot BW \cdot n}{N_m (1+CP)} - 7 \cdot MSH\_CTRL\_LEN}{256} \right) \frac{N_m (1+CP)}{T_{trama} \cdot BW \cdot n}$$

**Ecuación 2.** Factor de capacidad equivalente.

Aunque se pueden encontrar modelos muy detallados para calcular la

capacidad, se cuenta con modelos muy simples o poco aplicables, desde el punto de vista práctico, para estimar cuánto debe ser el valor de **M**.

#### 4. SIMULACIÓN Y MODELAMIENTO

De acuerdo con los planteamientos anteriores es conveniente desarrollar modelos detallados en forma matemática y de simulación para poder analizar el comportamiento del sistema y adquirir el conocimiento necesario para estimar los procesos de planificación de redes basadas en esta tecnología.

Se conocen trabajos preliminares de otros autores, algunos orientados a la simulación de la capa física y el OFDM<sup>19,20,21,22,23,24,25</sup> y otros a simulaciones de la capa MAC, principalmente orientados a la evaluación de políticas de planificadores TDMA o a planificadores de paquetes.

En el grupo de trabajo del 802.16, se encuentran esfuerzos orientados al modelamiento de canales como el modelo *Stanford University Interim*, el cual es apropiado para terrenos semi urbanos, clasificados para el territorio de Estados Unidos, pero no lo es para terrenos urbanos ni para las condiciones propias de implantación del sistema en nuestro país.

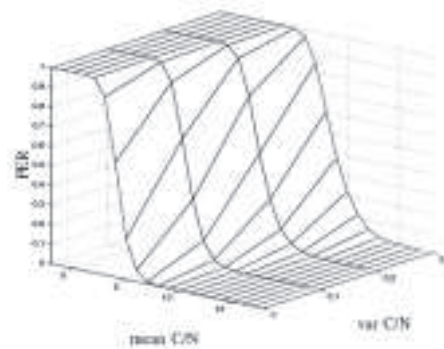
El modelo depende de las condiciones de la señal, ancho de banda y frecuencia. En este sentido, para ser concordante con el desarrollo de la tecnología se debe tener en cuenta que las bandas que contarán con equipos certificados por el foro Wimax, serán, en su orden de aparición, en frecuencias de 3.5 GHz, 2.5 GHz y de 5.8 GHz. En estos rangos de frecuencias se puede contar con canales de alrede-

dor de 5.5 MHz, no canales de 20 MHz como aparecen en el estándar y se suponen de manera general. Este aspecto es altamente limitante en el diseño de sistemas basados en el estándar 802.16-2004. Se requiere pues estudiar los modelos de propagación ajustados a las frecuencias y anchos de banda que tendrían los sistemas desplegados en el país.

Se encuentra múltiple literatura de modelos de canales y sobre todo de los valores de los parámetros como *delay spread*, *doppler spread*, *path loss coefficient*, etc. en diferentes escenarios. Un tema de investigación importante es el desarrollo de estos modelos y su lectura y estimación en condiciones propias de nuestras ciudades.

El proceso de modelamiento y simulación de sistemas basados en el 802.16-2004, requiere un estudio detallado de los modelos de propagación, para poder tener en cuenta el aspecto incierto de la propagación en el diseño del sistema. Los simuladores orientados a paquetes, como el Network Simulator 2 (NS2),<sup>26</sup> el OmNet++,<sup>27</sup> etc. proveen buenas herramientas para la simulación de protocolos, pero se quedan cortos al momento de simular el canal de propagación. Por el contrario, herramientas como el ICS Telecom,<sup>28</sup> o el EDX,<sup>29</sup> son muy buenas en simulación de la propagación, pero utilizan modelos muy primitivos para diseño de redes de datos inalámbricas (usualmente modelos poissonianos, aplicables a redes de voz, pero no a redes de datos). Se requiere la unión de simuladores que integren estas dos fortalezas para plantear modelos completos que permitan diseños y medidas más cercanos a la realidad de los sistemas modelados.

Se plantea entonces un trabajo que incluye el modelo de la propagación dentro del simulador de paquetes. Esto se logra por medio de un conjunto de simulaciones de nivel de enlace, orientadas a encontrar tablas o curvas que permitan determinar la probabilidad de error de un paquete o una trama transmitida, en función de parámetros como la relación señal a ruido, la longitud de la trama, la modulación y codificación utilizadas, el delay spread, etc., como se muestra en la Figura 5. En ella se aprecia una curva de probabilidad de error de paquete en función de la SNR y de su variabilidad (medida por la variabilidad del canal, relacionada con fenómenos de *fading* y *shadowing*).



**Figura 5.** Curva de PER vs parámetros.

El modelo detallado de simulación permitirá trabajar sobre modelos equivalentes de las capas inferiores que ayuden a establecer ideas respecto al comportamiento del sistema. Los modelos matemáticos son ajustados a aspectos concretos del estándar y por lo tanto aportarán al problema de ingeniería relacionado con el diseño, planificación e implantación de este tipo de redes.

## 5. TRABAJO A DESARROLLAR

El trabajo que se está desarrollando involucra estudiantes de doctorado, maestría y pregrado de la Universidad Pontificia Bolivariana en Medellín y a investigadores de los grupos GEST y GIDATI de las dos universidades anteriores. Se está desarrollando un simulador en el software de simulación NS2, creando una comunidad de trabajo alrededor de esta herramienta, reconocida internacionalmente en múltiples artículos e investigaciones de prestigiosas universidades.

El proceso incluye el desarrollo de las entidades de capas PHY & MAC y elementos de información (paquetes o mensajes) para el avance de las simulaciones. En el proyecto se ha desarrollado un extenso estudio de la simulación para lograr que las entidades creadas sean compatibles con los demás elementos del sistema y se puedan aprovechar las fuentes de tráfico, agentes y algoritmos de capas superiores implementados dentro de la plataforma.

El modelo planteado permite tener en cuenta diferentes conexiones o CID en una misma entidad MAC, así como la inclusión de diversos modelos de planificadores. Esto permite una estructura que facilitará el desarrollo del modelo enmallado y un modelo PMP, con la misma filosofía del simulador y por medio de la reutilización de componentes comunes.

El modelo se basa en aprovechar las funcionalidades de canales inalámbricos del NS2, pero modificando las condiciones de pro-

pagación y del canal por medio de la inclusión de modelos propios, así como el desarrollo de toda la entidad MAC.

El NS2 cuenta con un completo desarrollo de la capa MAC del 802.11, pero tiene pocos elementos en común con la capa MAC del 802.16: sin embargo su estudio permite entender el funcionamiento de la herramienta y muestra la forma de solucionar problemas concretos del desarrollo. En la Figura 6 se presenta una versión simplificada del modelo a formalizar.

Se planea también encontrar un modelo estadístico que permita hallar información del sistema y desarrollar procesos de análisis de desempeño que ayuden en el proceso de dimensionamiento de las redes. Este modelo figura en proceso de planteamiento actualmente.

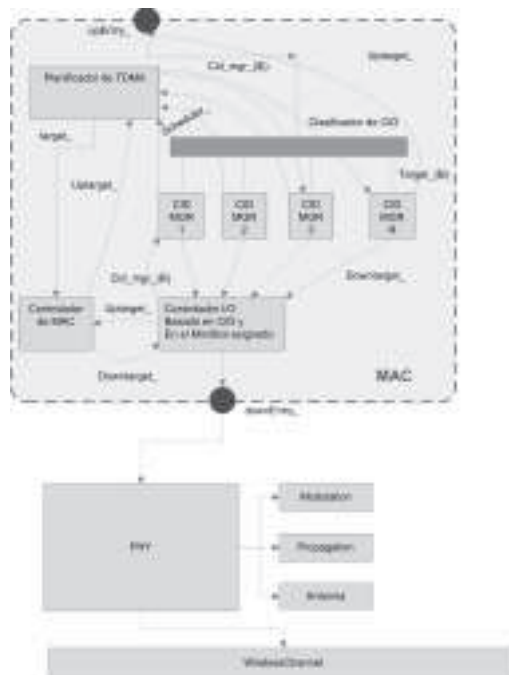


Figura 6. Modelo de simulación.

## 6. CONCLUSIONES

El estándar IEEE 802.16-2004 provee una nueva forma de acceso para usuarios a redes inalámbricas con buenas condiciones de capacidad, distancia de enlaces y costo, que la convierten en una tecnología de muy probable aplicación en soluciones de cobertura en el país, tanto para topologías PMP como enmalladas.

El estándar de la IEEE define aspectos concretos de la tecnología como los flujos de señalización y los formatos de los mensajes pero deja sin definir ciertos aspectos como el diseño y operación de los algoritmos de planificación y controles de admisión. Estos aspectos abiertos son oportunidades de investigación.

Las características más relevantes de las redes enmalladas inalámbricas son la robustez, la topología dinámica, el ancho de banda limitado, la seguridad, la aleatoriedad de los canales de comunicación y la falta de modelos de dimensionamiento apropiados.

La solución enmallada incrementa la cobertura de la solución PMP, reduce costos y tiempo de instalación e incrementa la robustez de la red. Sin embargo, es necesario estudiar aspectos como la agregación de tráfico para tener medidas más realistas de la capacidad y obtener un punto intermedio que permita extender la capacidad de las redes PMP por medio de redes enmalladas.

El estándar define conceptos de calidad de servicio con una alta flexibilidad para las redes PMP basadas en un solo salto. Sin embargo, el lograr el mismo nivel de desempeño en redes de múltiples saltos es un problema por solucionar.

Las dificultades en el planteamiento de modelos matemáticos apropiados, hace que este sea un tema abierto de investigación en las redes enmalladas. Modelos que tomen en cuenta aspectos concretos de la tecnología son necesarios para los procesos de dimensionamiento de redes basadas en el estándar.

Ante la inexistencia de equipos con las funcionalidades presentes en el estándar, se requiere el desarrollo de modelos de simulación para comprender el funcionamiento detallado del sistema.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. IEEE, "802.16 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks," 2004, pp. 893.
2. P. B. M. Media, "Telephony's complete guide to WiMAX," 2004.
3. W. Forum, "WiMAX technology: Technical information," 2005.
4. W. Forum, E. Crozier, and A. Klein, "WiMAX's technology for LOS and NLOS environments."
5. E. Lawrey, "The suitability of OFDM as a modulation technique for wireless telecommunications, with a CDMA comparison.," in Computer systems engineering, vol. Bachelor of Engineering with Honours. Northern Queensland: James Cook University, 1997, pp. 110.
6. E. Biglieri, J. Proakis, and S. SHAMAI, "Fading Channels: Information-Theoretic and Communications Aspects," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 44, pp. 2619-2692, 1998.

7. <http://www.wimaxforum.org/home>
8. A. Kumar, D. Manjunath, and J. Kuri, "Communication networking: an analytical approach". Amsterdam; Boston: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2004.
9. Z. Haas, J. Deng, B. Liang, P. Papadimitatos, and S. Sajama, "Wireless ad hoc networks," in Encyclopedia of Telecommunications, J. Proakis, Ed.: John Wiley, 2002, pp. 28.
10. P. Gupta and P. Kumar, "Capacity of wireless networks," University of Illinois, Urbana-Champaign 1999.
11. P. Gupta, "Design and Performance Analysis of Wireless Network," in Department of Electrical and Computer Engineering, vol. Doctor of Philosophy. Urbana-Champaign: University of Illinois, 2000, pp. 154.
12. P. Gupta, R. Gray, and P. Kumar, "An experimental scaling law for ad hoc networks," Univ. of Illinois, Urbana-Champaign, Technical report 2001.
13. G. Cristache, K. David, M. Hildebrand, J. Diaz, and R. Sigle, "Aspects for the integration of ad-hoc and cellular networks," presented at 3rd Scandinavian Workshop on Wireless Ad-hoc Networks, Stockholm, 2003.
14. H. Lundgren, E. Nordstrom, and C. Tschudin, "The Gray Zone Problem in IEEE 802.11b based Ad hoc Networks," presented at SIGMOB, 2002.
15. T. Networks, "802.11 technologies: past, present and future," 2004, pp.
16. G. N. Higginbottom, "Performance evaluation of communication networks". Boston: Artech House, 1998.

### CURRÍCULO

**Roberto Bustamante Miller.** 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.

**Roberto Carlos Hincapié.** Ingeniero Electrónico y Magíster en Telecomunicaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana. Actualmente es candidato a doctor en Ingeniería, área de Telecomunicaciones en la misma Universidad, e investigador en el grupo GIDATI. ☀