

DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS HANDOFF EN REDES INALÁMBRICAS DE BANDA ANCHA BASADO EN EL PROTOCOLO IEEE 802.16

DESIGN OF HANDOFF PROCEDURES FOR BROADBAND WIRELESS ACCESS IEEE 802.16 BASED NETWORKS

V. Rangel-Licea, J.E. Cota-Guajardo, J. Gómez-Castellanos y J. Reyes-García

Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones. Facultad de Ingeniería, UNAM

E-mails: victor@fi-b.unam.mx, eduardocg@fi-b.unam.mx, javierg@fi-b.unam.mx, jrg307@fi-b.unam.mx

(Recibido: enero de 2006; aceptado: junio de 2007)

Resumen

El protocolo IEEE 802.16 es un estándar de nueva creación para conexiones inalámbricas fijas de banda ancha que está buscando agregar movilidad entre sus usuarios. Sin embargo, primero deben solucionarse algunos obstáculos técnicos, como es el caso de **“handoff” HO** (cambio de conexión que ejecuta un nodo en movimiento entre dos “estaciones base” BS). En este artículo, se aborda la problemática de HO tratando de conservar la calidad y servicio (QoS) de los usuarios. Varios mecanismos y algoritmos para el cambio de conexión son presentados. También se menciona un modelo de programación basado en OPNET MODELER¹ para simular y evaluar los mecanismos de HO aquí presentados. Finalmente, se demuestra que es posible implementar mecanismos confiables de HO sobre el protocolo IEEE 802.16, capaces de mantener una QoS aún durante el cambio de conexión, incluyendo usuarios con aplicaciones intolerantes al retardo como voz sobre IP (VoIP).

Descriptores: Handoff, IEEE 802.16, WiMax, BWA, VoIP, QoS

Abstract

IEEE 802.16 is a protocol for fixed broadband wireless access that is currently trying to add mobility among mobile users in the standard. However, mobility adds some technical barriers that should be solved first, this is the case of HO “handoff” (change of connection between two base stations “BS” by a mobile user). In this paper, the problem of HO in IEEE 802.16 is approached trying to maintain the quality of service (QoS) of mobile users. A mechanism for changing connection during HO is presented. A simulation model based on OPNET MODELER was developed to evaluate the performance of the proposed HO mechanism. Finally, this paper demonstrates that it is possible to implement a seamless HO mechanism over IEEE 802.16 even for users with demanding applications such as voice over IP.

Key words: Handoff, IEEE 802.16, WiMax, BWA, VoIP, QoS.

Introducción

Una gran demanda por conexiones de banda ancha a Internet, así como la tendencia a utilizar

1 La licencia de operación de OPNET MODELER v. 11, se obtuvo a través del proyecto UNAM- PAPIIT N° 1N-110805 “Técnicas de mejoramiento de capacidad de redes inalámbricas de banda ancha”.

canales inalámbricos, han dado surgimiento a las redes de acceso inalámbrico de banda ancha (Broadband Wireless Access-BWA). A diferencia de otras tecnologías de banda ancha como: xDSL (Digital Subscriber Line), FITL (Fiber In The Loop), WITL (Wireless In The Loop) entre otros, los sistemas BWA son fáciles de desplegar y expandir, requieren de una baja inversión inicial y de mantenimiento, son fáciles de actualizar y prometen tener un buen futuro, debido al evidente crecimiento del mercado de banda ancha en áreas urbanas. Sin embargo, no fue hasta esta última década que se empezaron a realizar esfuerzos por estandarizar este tipo de tecnologías, surgiendo de este modo, protocolos como Wireless ATM y IEEE 802.16 (Eklund et al, 2002).

El protocolo IEEE 802.16 provee de una conexión inalámbrica que puede soportar conexiones que van desde 1 Mbps hasta 34 Mbps con coberturas de hasta 50 km para usuarios fijos. Está clasificado como red de tipo MAN (Metropolitan Area Network) se puede utilizar indistintamente del protocolo utilizado en las capas superiores (ATM o IP, por ejemplo).

Actualmente, se están haciendo esfuerzos por agregar movilidad al estándar IEEE 802.16, para lo cual se creó el grupo de trabajo IEEE 802.16e. Con esto se pretende incrementar el mercado potencial para los sistemas BWA añadiendo el nuevo servicio de movilidad. Sin embargo, movilidad introduce muchos problemas técnicos, entre ellos, el problema de HO. A continuación, se presenta una descripción general de la operación del protocolo IEEE 802.16 y posteriormente se introduce el procedimiento de HO en donde se implementó un modelo de simulación en OPNET MODELLET v11.0 para estudiar su comportamiento dinámico.

Descripción del protocolo IEEE 802.16

Desde la aparición de la primera versión del protocolo IEEE 802.16 en abril del 2002, se han ido desarrollando mejoras y adaptaciones que han sido registradas como nuevas versiones dentro del

mismo grupo de estándares. La última versión IEEE 802.16 e (2004), describe el modo de operación en las frecuencias de 10-66 GHz con un apartado para frecuencias por debajo de los 11 GHz, que permite conexiones NLOS (sin línea de vista), pensando en futuras comunicaciones móviles. Este protocolo define la operación de las capas físicas y MAC (Control de Acceso al Medio) dentro de una red.

Descripción de la capa física

Generalmente, se utiliza una arquitectura PMP (punto-multipunto) donde una BS provee de una conexión a un conjunto de SS (nodos fijos) o MSS (nodos móviles). El canal de *uplink* (canal de subida) es compartido por todos los usuarios para enviar datos hacia la BS, mientras que el canal *downlink* (canal de bajada) es utilizado sólo por la BS para enviar datos hacia los nodos. Se utiliza FDD (Duplexaje por División de Frecuencia) para separar los canales *uplink* y *downlink*. Dentro del canal *downlink* se utiliza TDM (Multiplexaje por División de Tiempo), y a su vez, el canal *uplink* utiliza TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo) Y DAMA (Acceso Múltiple por Asignación de Demanda), los cuales se utilizan para definir regiones de tiempo para usos específicos como se muestra en la figura 1.

Descripción de la capa MAC

Cuatro clases de QoS están definidos: UGS (Unsolicited Grant Service), rtPS (real time Polling Service), nrtPS (non real time Polling Service) y BE (Best Effort). UGS es para aplicaciones que generan paquetes de tamaño fijo de manera constante, como VoIP por ejemplo; rtPS es para aplicaciones que generan paquetes de tamaño variable y período fijo, como en el caso de video MPEG; nrtPS es ideal para aplicaciones que transmiten con una tasa de transmisión variable y en forma regularmente periódica sin exigencias de tiempo real, como es el caso de FTP (Protocolo de Transferencia de Archivos) de alta velocidad; BE es ideal para tráfico de tipo Internet, ya que provee el

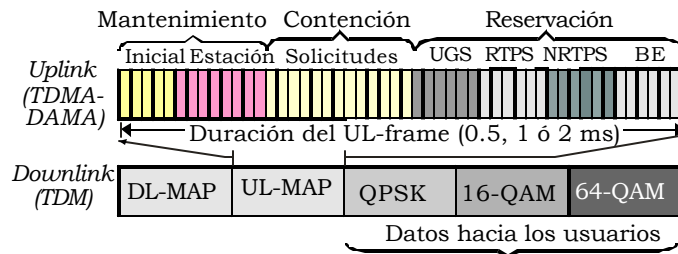


Figura 1. Estructura de los canales UL y DL

mejor servicio posible sin garantía de ningún tipo. Dependiendo de la QoS asignada a un usuario, será el procedimiento que éste ejecute en la capa MAC para poder transmitir sus paquetes hacia la BS. Los tres métodos para poder transmitir datos hacia la BS son:

- A) Por solicitudes: es el mecanismo que utiliza un nodo para indicar a la BS que necesita BW (ancho de banda) para transmitir. Las solicitudes se pueden enviar en un encabezado de BW o en forma de *piggyback*²;
- B) Por reservaciones: es cuando un nodo transmite datos en ranuras reservadas de antemano por la BS;
- C) Por consulta: es el proceso mediante el cual, la BS asigna BW a los nodos para uso exclusivo de peticiones de BW. Estas asignaciones pueden direccionarse a un nodo específico (unicast) o a un grupo de nodos (multicast) en cuyo caso, los nodos involucrados deberán entrar en contención para mandar sus requerimientos de BW.

Resolución de colisiones

Una colisión resulta cuando dos o más nodos transmiten de tal forma que la señal llega exactamente al mismo tiempo a la BS, ocasionando que ésta no pueda entender a ninguno de ellos.

² Método para solicitar más ancho de banda utilizando cabeceras extendidas dentro de los paquetes de datos para evitar entrar en la región de contención cada vez que se requiera transmitir un nuevo paquete.

Para resolver colisiones, los nodos utilizan el algoritmo *exponential backoff binario trunçado*, como se describe en (Rangel et al., 2001-a), el cual utiliza los parámetros “ventana de *backoff* inicial” y “ventana de *backoff* final”. Este algoritmo se resume de la siguiente forma: Cuando un SS tiene información para enviar y necesita entrar en el proceso de resolución de colisiones, éste selecciona aleatoriamente un número “n” que se encuentre dentro de la ventana de *backoff* $[0, 2^{\text{backoff inicial}}]$. Este valor “n” indica el número de oportunidades de transmisión (*slots*) en la región de contención que deberá dejar pasar antes de transmitir su requerimiento. Si el nodo no recibe ninguna notificación para transmitir dentro de un tiempo especificado por parte de la BS después de haber mandado su petición, se considera que la transmisión de solicitud de BW colisionó con un mensaje de otro nodo, y por lo tanto, que se ha perdido. En este caso, el SS incrementa la ventana de *backoff* por un factor de 2, esto es una ventana de 0 a $2^{(\text{backoff inicial} + 1)}$, y vuelve a escoger un número “n” aleatorio que esté dentro de esta nueva ventana y espera “n” oportunidades para volver a enviar su solicitud de BW. Si el SS recibe ahora una asignación de BW, por parte de la BS, termina el proceso de resolución de colisiones. Pero por el contrario, si vuelve a pasar un tiempo especificado sin recibir una asignación de BW, el nodo considera que hubo otra colisión y vuelve nuevamente a incrementar la ventana de *backoff* $([0, 2^{\text{backoff inicial} + 2}])$ y repite el proceso hasta que el nodo reciba una asignación de BW o hasta que la ventana de *backoff* sea igual al valor de ventana de *backoff* final $([0, 2^{\text{backoff final}}])$. Si esto último sucede, el nodo descarta el paquete para el cual estaba solicitando el BW.

Proceso de inicialización

El proceso de inicialización mostrado en la figura 2, es llevado a cabo por todos los nodos que deseen entrar a la red por primera vez. La fase de *ranging* y *ajuste automático* es la más crítica para el proceso de HO, ya que es aquí donde el nodo envía el primer mensaje de registro hacia la BS, el cual deberá enviarlo en la región de contención. También es en esta fase donde se corrige el *offset* de tiempo y se ajusta la potencia de transmisión del nodo, para lo cual, numerosos mensajes entre el MSS y la BS pueden ser intercambiados. El tiempo que transcurre en la ejecución completa de esta fase es aleatorio. En la figura 2, se muestra el proceso de inicialización donde los retardos por

inicialización pueden ir desde unos pocos segundos hasta varios minutos, en el peor de los casos, como se describe en (Cota, 2005).

Cuando un MSS se aleja demasiado de la BS, debe ejecutar un procedimiento de HO con el fin de conectarse con otra BS que esté más cerca y le pueda proveer de una mejor conexión. El proceso de HO debe ejecutarse de la manera más rápida posible, ya que aplicaciones como VoIP, exigen retardos muy bajos (en el orden de 20 a 50 ms) para la transmisión de paquetes, por lo que la QoS debe mantenerse aún durante el proceso de HO. La forma natural de ejecutar un proceso de HO sería terminar el servicio con la BS actual e iniciar uno nuevo con la BS más cercana, pero esto

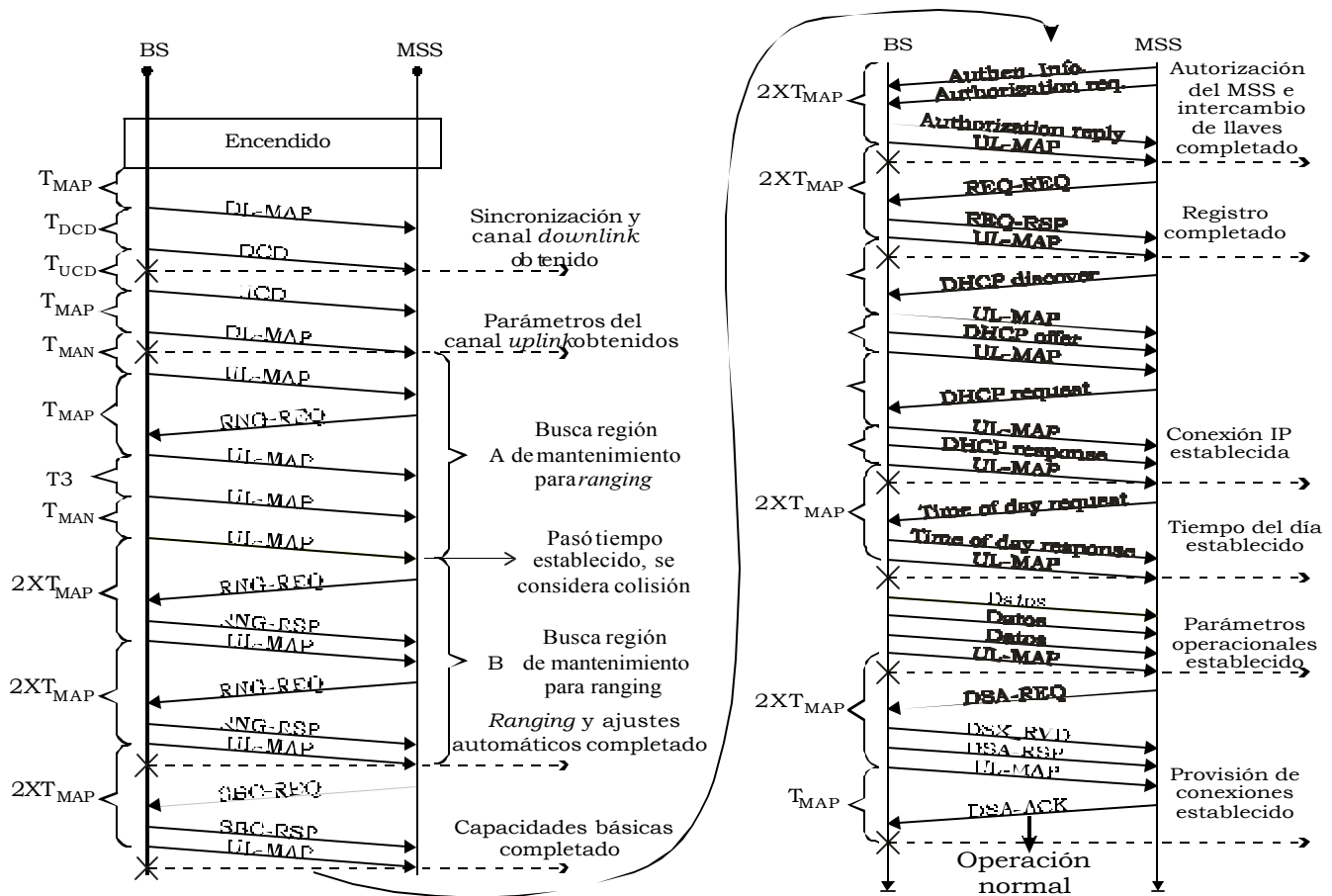


Figura 2. Proceso de inicialización de un nuevo nodo que se va a unir a la red

causaría la interrupción momentánea del servicio, debido a los grandes retardos de inicialización ya mencionados. Por consiguiente, es indispensable proveer de un mecanismo de HO transparente que permita mantener la calidad de servicio al cambiarse de BS. A continuación, se presenta nuestra propuesta de HO en IEEE 802.16.

Propuesta de mecanismo de *Handoff*

En la figura 3 se muestra de forma detallada el procedimiento para el cambio de BS. Una vez que

un MSS pasa por la etapa de inicialización (como se describió en la sección anterior), deberá solicitar a la BS servidora que se le asigne un tiempo de reconocimiento para que pueda escuchar los *beacons* o mensajes de configuración de red (ADV MSG) provenientes de las BS vecinas, como se muestra en el punto (1) de la figura 3. Todas las BS deberán transmitir periódicamente mensajes de forma *broadcast* “*beacons*” para informar a los MSS circundantes, tanto de su presencia como de su configuración. Gracias a estos *beacons*, un MSS puede saber desde antes de ejecutar el

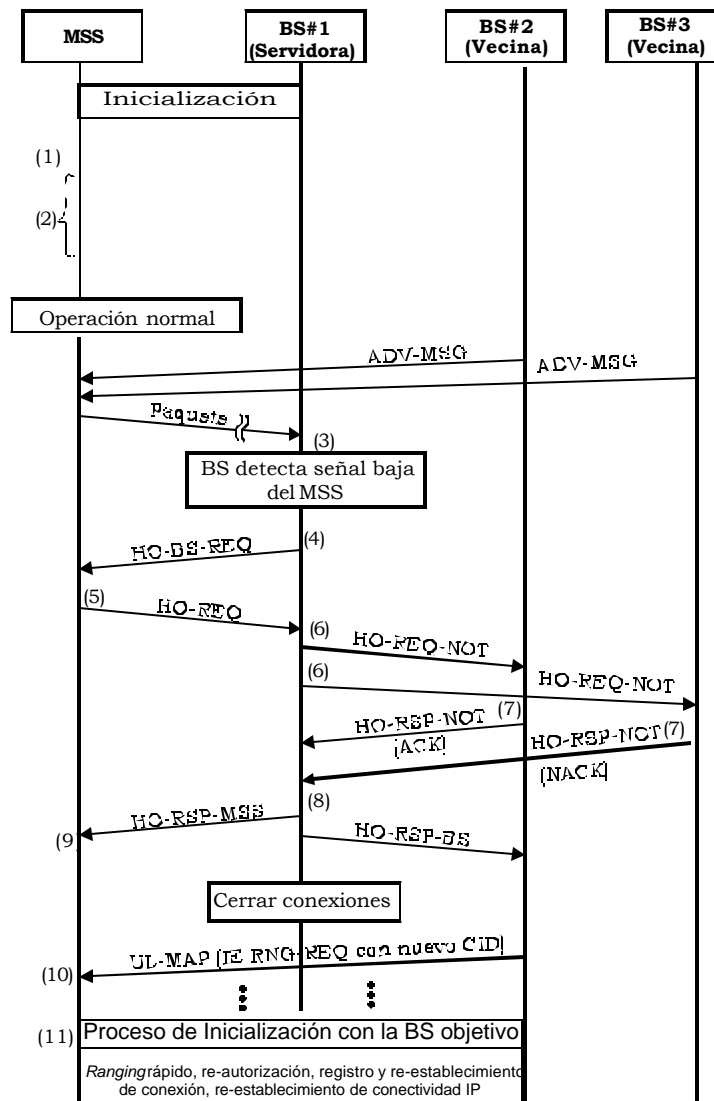


Figura 3. Flujo de mensajes durante el proceso de HO

procedimiento de HO, cuáles BSs vecinas están al alcance y qué relación SNR (señal/ ruido) guarda con cada una de ellas. Para garantizar que un cambio de BS sea transparente, es necesario que un MSS realice una asociación de la etapa de *Ranging* y que se lleve a cabo un pre-registro con las BS vecinas, las cuales hacen que el cambio de BS sea mucho más rápido. La asociación de la etapa de *Ranging* (2) permite al MSS ponerse en sincronía y ajustar su potencia de transmisión con las BS vecinas. La etapa de pre-registro permite a un MSS negociar los parámetros de operación, como por ejemplo: nuevos CIDs, estimación de tipo de servicio –QoS, tipo de modulación, tipo de FEC y CRC, entre otros.

El procedimiento de HO inicia cuando la BS servidora detecta que la señal proveniente del MSS empieza a caer por debajo de un umbral definido previamente (3), como se aprecia en la figura 3 y tabla 1, ésta envía el mensaje *HO-BS-REQ* (4) hacia el MSS para que dispare su mecanismo de HO. Por el contrario, cuando es el MSS, quien detecta una señal débil proveniente de la BS servidora, el proceso de HO empieza en el paso (5) de la figura 3. Hecho esto, el MSS envía el mensaje *HO-REQ* a la BS servidora como respuesta (5). Dentro de este mensaje se deben incluir los datos obtenidos a través de los *beacons* y las etapas de asociación de *ranging* y pre-registro, como mediciones de SNR y tipo de calidad de servicio requerida. El MSS deberá esperar la llegada del mensaje *HO-RSP-MSS* (9) de la BS servidora. En paralelo, la BS servidora manda el mensaje *HO-REQ-NOT* (6) a cada una de las BSs vecinas que el MSS ha incluido dentro del mensaje *HO-REQ*. El mensaje *HO-REQ-NOT* contiene entre otros parámetros la QoS y el tipo de conexión que el MSS necesita para continuar con su operación actual. Cada BS vecina que haya recibido el mensaje *HO-REQ-NOT*, deberá enviar como respuesta el mensaje *HO-RSP-NOT* (7) a la BS servidora. Si la BS vecina puede aceptar al MSS con los requerimientos especificados, deberá incluir el CID que el MSS ocupará dentro de esta BS vecina, también deberá mencionar si necesita más información del

MSS. Si la BS vecina no puede aceptar al MSS con los requerimientos específicos, podrá incluir además, otra QoS inferior que pudiera en su caso concederle al MSS. Cabe destacar que el envío de mensajes entre BS se realiza mediante un enlace dedicado y con la mayor prioridad, por lo que no se requiere ningún método de acceso para el envío de los mismos, y por lo tanto, los mensajes entre BS deberán intercambiarse de una forma fluida y sin contratiempo.

Tabla 1. SNR aceptado en el receptor para un BER menor a 1×10^{-6} después de FEC

Modulación	Tasa de codificación	SNR recibido (dB)
BPSK	$\frac{1}{2}$	6.4
QPSK	$\frac{1}{2}$	9.4
	$\frac{3}{4}$	11.2
16-QAM	$\frac{1}{2}$	16.4
	$\frac{3}{4}$	18.2
64-QAM	$\frac{1}{2}$	22.7
	$\frac{3}{4}$	24.4

Una vez que la BS servidora ha detectado que todas las BSs vecinas a quienes les envió el mensaje *HO-REQ-NOT* le han contestado con el mensaje *HO-RSP-NOT*, deberá recopilar toda la información y tomar la decisión de cuál BS vecina será seleccionada como BS objetivo (8) (BS con quien se mudará el MSS). Para la elección de la BS objetivo, la BS servidora elegirá aquella que en primer lugar pueda atender de la mejor forma al MSS de acuerdo con sus necesidades de QoS y BW. En caso de que varias BSs vecinas tengan total disponibilidad para atender al MSS, entonces la que tenga mejor SNR será elegida como BS objetivo. En este punto, la BS servidora mandará dos mensajes, el primero de ellos *HO-RSP-MSS* (8) irá dirigido al MSS, y dentro del mismo se informará cuál BS ha sido marcada como BS objetivo, así como el CID que será válido con esta BS. El segundo mensaje *HO-RSP-BS* (8) se mandará exclusivamente a la BS vecina que ha sido mar-

cada como BS objetivo. Dentro del mensaje, se indica el CID del MSS (el que tiene actualmente) que va a realizar el HO, y si es el caso, más información relativa al mismo.

La BS vecina, que ha sido seleccionada como objetivo, empezará a asignar *slots unicast* para *ranging* (IEs), para el nuevo MSS que está en proceso de HO (10), con lo cual se evita la región de contención, que es la etapa que produce más del 90 % de los retardos en un HO como se indica en (Cota, 2000). Por otra parte, el MSS una vez que ha recibido el mensaje *HO-RSP-MSS*, dejará de transmitir datos aunque tenga paquetes pendientes en la cola de espera. Si un paquete se genera en este momento, será trasladado hacia una cola especial mientras termina la parte crítica del cambio de conexión a la BS objetivo (BS2). Ahora el MSS cierra conexiones con la BS servidora y cambia las frecuencias tanto en su transmisor como en su receptor para sincronizarse nuevamente con la BS objetivo. Durante el proceso de inicialización con la BS objetivo (11), las etapas de “negociar capacidades básicas” y “autorización e intercambio de llaves” son ignoradas, ya que los parámetros que son intercambiados durante estas etapas ya han sido traspasadas entre la BS servidora y la BS objetivo mediante el mensaje *HO-RSP-BS*. La etapa de “transferir parámetros adicionales” también es ignorada porque no se espera que estos parámetros cambien. La etapa de “tiempo del día” ya ha sido establecida durante el proceso de inicialización normal, por lo que no es necesario que se lleve a cabo otra vez. Las etapas de “registrarse con la BS” y “levantar las conexiones”, debido a su naturaleza, deberán ser completadas rápidamente. Cuando el MSS está trabajando bajo el protocolo IP, necesita forzosamente ejecutar la fase “establecer conexión IP”.

Existen varias propuestas para movilidad con IP (Campbell et al., 2002), aunque Mobile IP (Perkins, 1997) suena como la más recomendable, ya que el nodo establece direcciones IP temporales con la BS objetivo, por lo que no es necesario que ejecute nuevamente el mecanismo DHCP (Dyna-

mic Host Control Protocol) para la obtención de una nueva dirección IP. En la siguiente sección se presenta un análisis del comportamiento dinámico que se tendría hasta la etapa de “establecer conexión IP”.

Modelo de simulación y resultados

Para la implementación de nuestro algoritmo de HO, se utilizó el simulador OPNET MODELER v.11, el cual permitió analizar los retardos de propagación de los paquetes generados por los nodos móviles, así como la tasa de transmisión instantánea durante el cambio de conexión, parámetros que indicarán la calidad de nuestro mecanismo de HO. En las simulaciones que llevamos a cabo, algunas aplicaciones como VoIP, exigen retardos de propagación del orden de 20 a 50 ms (Rangel, et al., 2001-b) que garantizan la ausencia de ecos durante el período de conversación.

Por otro lado, una disminución en la tasa de transmisión durante el HO, haría que la conversación fuese de mala calidad o incluso intangible. Algunas otras aplicaciones no son tan exigentes en este aspecto, tal es el caso de tráfico tipo Internet, el cual es generalmente asociado con una QoS de BE.

Para las simulaciones realizadas se utilizó un modelo jerárquico como el que se muestra en la figura 4, donde en el nivel más alto se encuentran los componentes de la red, en este caso las BSs, los SSs y los MSSs (Figura 4A). En el siguiente nivel, se define el modo de operación de los componentes del nivel superior mediante bloques que representan sus componentes internos como pueden ser: el generador de tráfico, las antenas, la capa MAC, etcétera (figura 4.B). El siguiente nivel define la operación de cada uno de los bloques anteriormente mencionados mediante FSM (máquinas de estado finito) como se aprecia en la figura 4.C. Finalmente, el nivel más bajo define mediante código Proto C, el funcionamiento de cada uno de los estados dentro de un FSM.

El escenario utilizado en las simulaciones, está formado por tres estaciones base de igual capacidad y de misma distancia de cobertura con una configuración tipo celular, como se aprecia en la figura 5. La cantidad de nodos que cada BS puede soportar, dependerá del tráfico que genere cada uno de ellos. Para la comunicación inter-BS se utilizaron enlaces duplex dedicados con una capacidad E1 (2048 kbps). Los parámetros utilizados durante las simulaciones se muestran en la tabla 2.

Para el estudio del comportamiento dinámico se utilizaron dos tipos de tráfico:

1) Tráfico Internet (IP). Para este tipo de tráfico se utilizó la distribución presentada en (Rangel, et al., 2001-b) en donde la distribución de los mensajes es como sigue: Tramas

de 64 bytes 60%, Tramas de 128 bytes 6%, Tramas de 256 bytes 4%, Tramas de 512 bytes 2%, 1024 Tramas 25% y Tramas de 1518 bytes 3%. La tasa de transmisión para este tipo de tráfico es de 38.4 kbps en la capa física (o 32 kbps en la capa IEEE 802.16 MAC) y es atendido con una QoS de BE; y

2) Tráfico VoIP. Se utilizó el codec G723.1 (ITU-T Recommendation G.723.1, 1996) en la modalidad de 5.3 kbps (frames de 20 bytes cada 30 ms), este codec es el recomendado por ITU (International Telecommunications Union) para enlaces de voz con bajo requerimiento. Este codec demanda una tasa de transmisión de 25.6 kbps en la capa física y utiliza supresión de encabezados como se recomienda en (ETSI ES 200 800, 2001). El tráfico de VoIP será atendido con una QoS UGS.

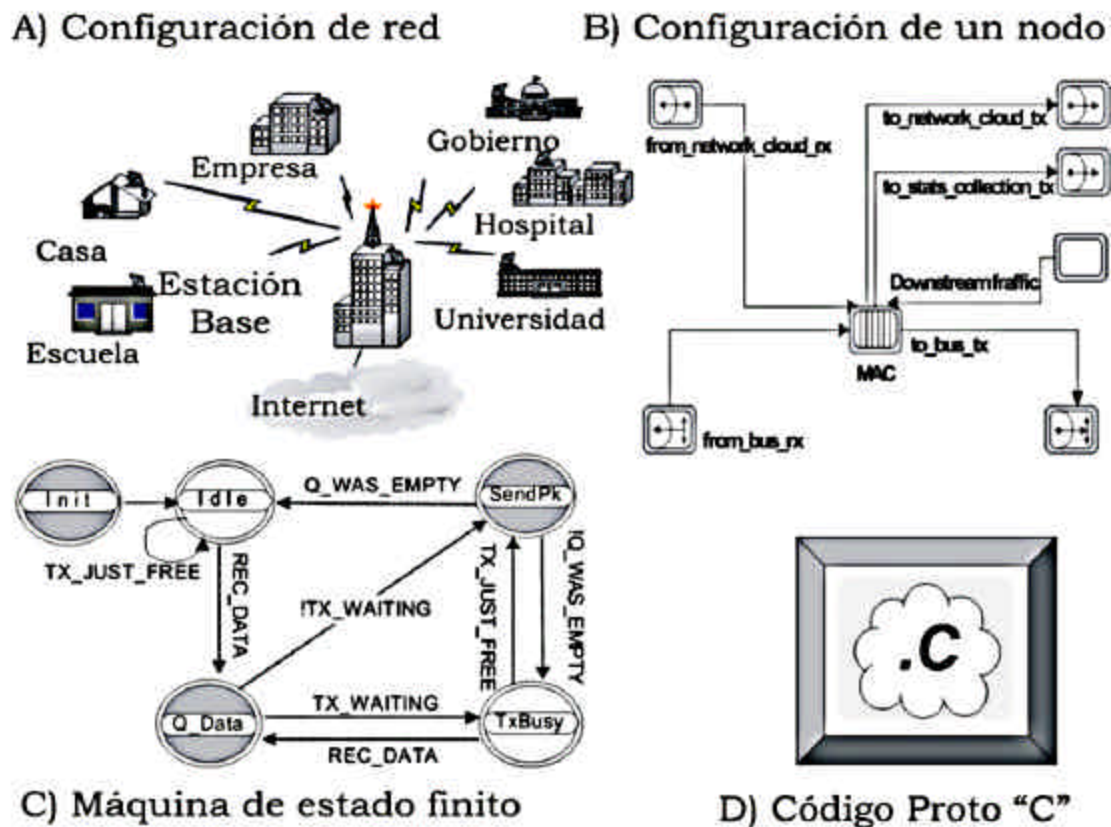


Figura 4. Modelo de simulación

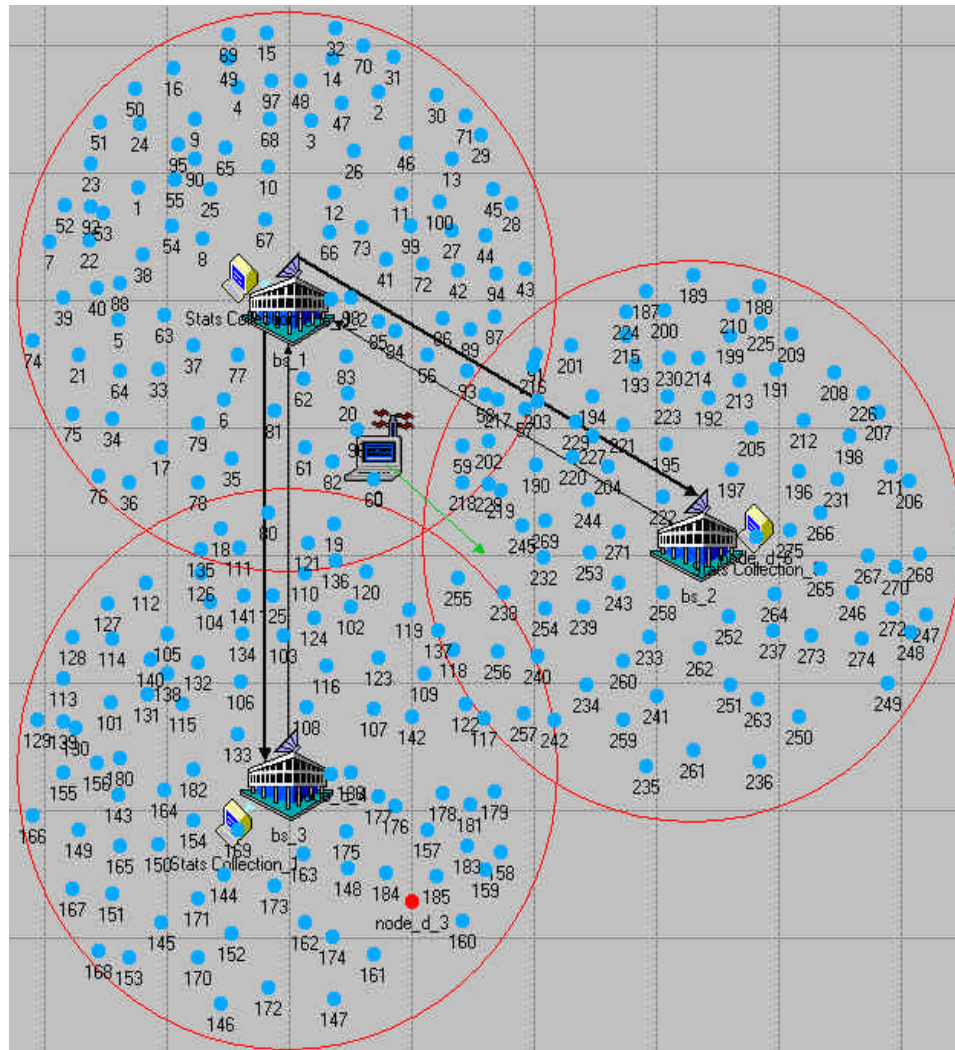


Figura 5. Escenario de simulación

Tabla 2. Parámetros de simulación

Parámetro	Valor
Duración por mapa	2 ms
Ranuras por mapa	44
Ranuras de contención por mapa	8
BW uplink	2,816 Mbps con QPSK
BW downlink	22,400 Mbps con 16-QAM
Radio de cobertura	2.35 km
Tamaño <i>minislot</i>	16 bytes

Resultados para tráfico Internet (con servicio Best Effort)

La figura 6, muestra el *throughput* y los retardos obtenidos cuando un MSS lleva a cabo el procedimiento de HO propuesto, para una QoS BE y un tráfico de tipo Internet. En este análisis se consideró una red con 40 nodos, aproximadamente un 70% de su capacidad máxima. Podemos apreciar que los retardos no son continuos, debido a la naturaleza de BE y al algoritmo *exponential backoff binario truncado*, como se muestra en la figura 6.

El cambio de BS es transparente al MSS por la asociación de *ranging* y pre-registro. El retardo aproximado, reportado por nuestro simulador, para el cambio de BS fue de 11 ms. En la figura 6, el retardo acumulado de MSS cuando envía su primer mensaje en la nueva BS fue de 14.5 ms, la diferencia de 2.5 ms, es consecuencia del tiempo que tardó la nueva BS en hacer la reservación del canal.

Para evitar el riesgo de colisión cuando un usuario se cambia de BS, la etapa de Reconocimiento de BS vecinas nos ayuda a simplificar la etapa más crítica del proceso de inicialización, que es la etapa de *ranging*. En la figura los retardos provocados por esta etapa fueron de 2 ms (de los 11ms en total). Esto se logra al hacer que el usuario móvil, mucho antes de activar su mecanismo de HO, ya esté sincronizado y pre-registrado con las estaciones base vecinas. La variación del *throughput* se debe a la distribución exponencial de las llegadas y la distribución de los paquetes utilizada para modelar tráfico tipo Internet, el cual oscila entre los 31 y 32 kbps en la capa IEEE 802.16 MAC.

Resultados para tráfico de voz (con servicio UGS)

La figura 7 muestra el retardo de los paquetes cuando se utiliza VoIP con una QoS de UGS. La razón por la que se aprecia un aumento de aproximadamente 30 ms después de ejecutar el procedimiento de HO, es porque durante el cambio de conexión se le prohíbe transmitir al MSS. Sin

embargo, éste sigue generando paquetes cada 30 ms por lo que después de ejecutar el cambio de conexión, el MSS tiene un paquete en el buffer, esperando ser transmitido, éste se desfasa un tiempo (igual al tiempo entre llegadas de los frames de voz) como se aprecia en la figura 8. Para solucionar este problema, se proponen tres métodos:

- A) Eliminar los paquetes generados en el lapso de HO.
- B) Conceder más *slots* al MSS después del proceso de HO para que pueda transmitir los paquetes pendientes.
- C) Aprovechar los momentos de silencio para ajustar el retardo enviando el paquete que se encuentre en ese momento en la cola de espera.

La figura 9 muestra los resultados obtenidos para A), B) y C), respectivamente. De la figura 9.A se puede observar que el retardo ya no sufre aumentos, el pequeño retardo que se sigue apreciando después de ejecutar el procedimiento de HO, es debido al mecanismo de QoS UGS y no al proceso de HO. La variación del retardo del MSS que se aprecia en la figura 9.A, antes de ejecutar el procedimiento de HO, es porque la BS está cercana al punto de saturación (aproximadamente a un 90% de su capacidad de carga máxima), pero esta variación está dentro de los límites para soportar tráfico de VoIP, el cual no excede los 50 ms de jitter permitidos. La recaída en el *throughput* (en el tiempo 4.48s de la figura 9.A) es resultado

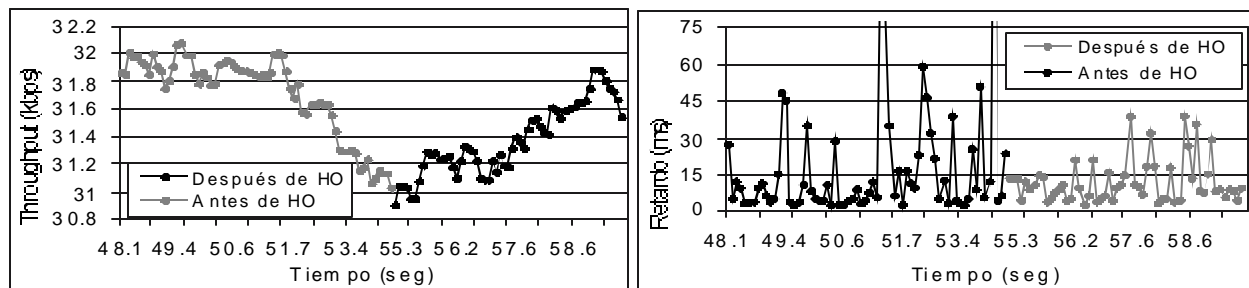


Figura 6. Comportamiento dinámico, tráfico Internet y QoS best effort con 40 nodos en la BS

del paquete que se eliminó. De la figura 9.B³ se puede ver que el paquete que es retenido hasta que el proceso de HO es completado, eleva momentáneamente los retardos. Sin embargo, el *throughput* se recupera con mayor rapidez que en el caso anterior. De nueva cuenta, la pequeña diferencia que se sigue apreciado en el retardo después del proceso de HO es por el mecanismo de UGS. Finalmente, de la figura 9.C⁴ podemos concluir que los momentos de silencio pueden ser bien aprovechados, ya que efectivamente el retardo es nuevamente ajustado sin necesidad de tirar paquetes o de consumir más *slots*.

3 Para la gráfica 9.B, se utilizaron solo 2 minislot para contención por mapa.

4 la escala en el eje "X" de la figura 9.C no es lineal, existen tiempos muertos entre las ráfagas de paquetes.

Para ambos escenarios (Internet y VoIP), no se incluyó una discusión en este artículo sobre el impacto de los errores de canal, debido a limitaciones de espacio. Los errores en el canal inalámbrico pueden degradar el servicio (QoS) asignado a los MSS en varias formas. Por ejemplo, para el servicio UGS, la pérdida de paquetes en el canal inalámbrico debido a errores pueden representar una violación de incumplimiento del acuerdo de la clase de servicio asignado al MSS. Para solucionar este problema, estamos investigando nuevas formas de asignación de recursos de aire en Ortiz (2006) y Rangel (2005). Una solución a este problema sería la asignación de oportunidades de transmisión adicionales a los MSS que enfrentan problemas de comunicación, por causa de interferencias, para poder mantener la QoS contratada por el MSS.

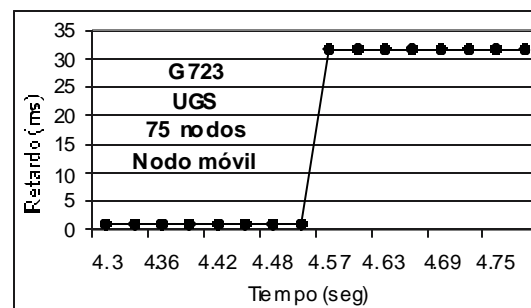


Figura 7. Comportamiento dinámico, VoIP y QoS UGS con 75 nodos en la BS

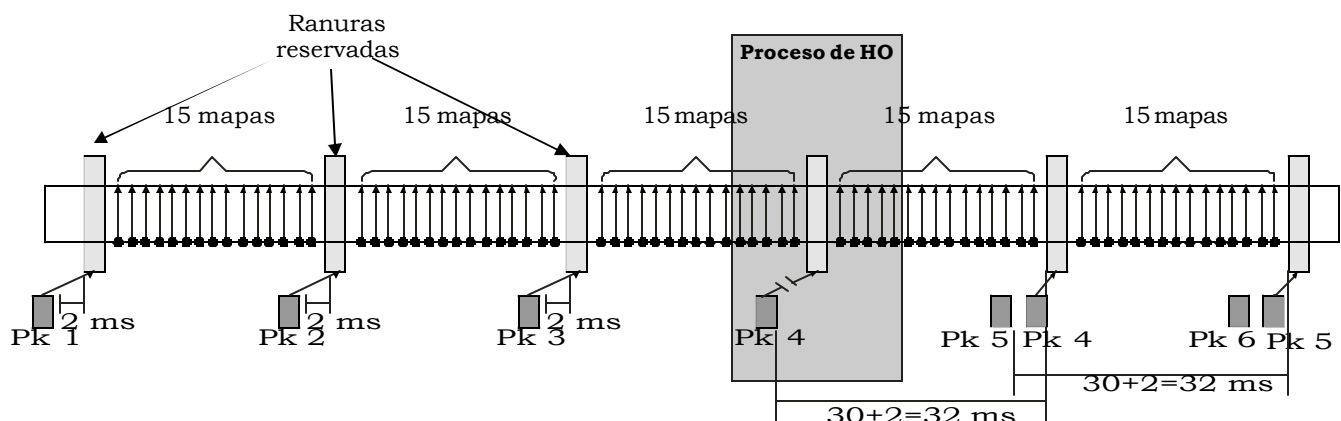


Figura 8. Aumento constante en el retardo del MSS después de ejecutar el procedimiento de HO

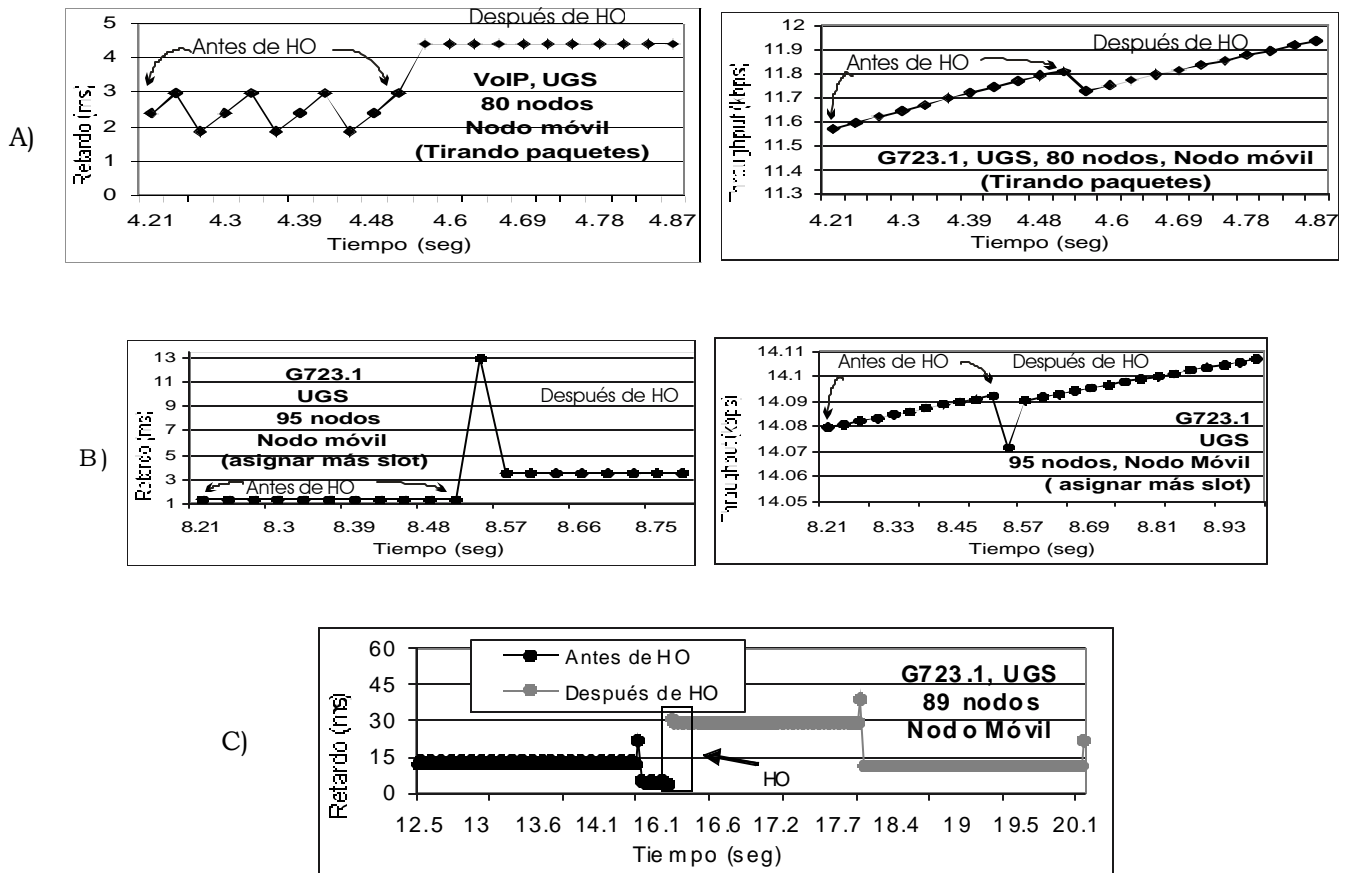


Figura 9. Throughput y retardos para VoIP con servicio UGS

Conclusiones

Este artículo colabora a los esfuerzos por situar al protocolo IEEE 802.16 como una tecnología de vanguardia, al hacer propuestas y proponer soluciones contra los obstáculos que implica la adición de movilidad. Durante el desarrollo del mismo, se demuestra que IEEE 802.16 cuenta con los elementos necesarios para mantener la QoS dentro de los parámetros exigidos durante el cambio de conexión (HO). Se ha desarrollado una propuesta de HO funcional, que ha sido probada bajo los esquemas de UGS y BE con dos formas distintas de tráfico: Internet y VoIP. En lo que a tráfico de Internet con un servicio BE respecta, se ha obtenido que el tiempo de ejecución de HO varía de forma directamente proporcional al número de usuarios en operación, ya

que a mayor cantidad de usuarios, mayor número de colisiones, y por lo tanto, mayores retardos (para BE, no se evita la región de contención durante el proceso de HO). Si consideramos que BE está diseñado para usuarios, cuyos servicios no son exigentes, entonces se ha desarrollado un mecanismo de HO que no consume recursos innecesarios para un servicio que no lo necesita. Para el caso de VoIP con una QoS de tipo UGS, se ha demostrado que se pueden cumplir con las exigencias de retardo, al no sobrepasar los 50 ms de tiempo tolerados por este tipo de aplicaciones. Actualmente se investigan nuevas formas de asignación de recursos para diferentes clases de servicio (UGS, rtPS, nrtPS y BE), así como análisis del impacto que tienen los errores del canal inalámbrico sobre la QoS asignada a los MSS.

Agradecimientos

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, por su apoyo y financiamiento en la culminación del proyecto PAPIIT No IN110805 e IN104907.

Referencias

- Campbell A., Gómez J., Kim S. y Wan C.Y. Comparison of IP Micromobility Protocols. *IEEE Wireless Communications*, 9: 72-82, 2002.
- Cota E. Diseño de procedimientos Handoff en redes inalámbricas de banda ancha basado en el estándar IEEE 802.16. Tesis (Maestría en ingeniería eléctrica). México. División de Estudios de Posgrado, UNAM. Junio 2005.
- Eklund C., Marks R., Standwood K.L., y Wang S. IEEE standard 802.16: A Technical overview of the wireless MANTM air interface for broadband wireless access. *IEEE Communications Magazine*, 40 (6): 2002, 98-107. 2002.
- ESTI ES200 800. Digital video broadcasting: Interaction channel for cable TV distribution system (CATV). ESTI, Ver. 1.3.1, 2001
- Perkins C. Mobile IP. *IEEE Communications Magazine*, 40 (5): 66-82. 1997.
- Ortiz J. Análisis y diseño de técnicas de calidad de servicio en redes inalámbricas de banda ancha. Tesis (Maestría en ingeniería eléctrica). México. División de Estudios de Posgrado, UNAM. Enero 2006.
- Rangel V., Edwards, R. and K. Shunke (2001-a). Contention resolution algorithms for CATV network based on the DVB/DAVIC cable modem protocol specification (ETS EN 200 800). In: Proc. of IBC. Vol. 1, Amsterdam, 2001, pp 193-202, Sept.
- Rangel V., Edwards, R. (2001-b). Performance analysis and optimization of the digital video broadcasting/digital audio visual council cable modem protocol for the delivery of isochronous stream. In: Proc. of IEEE GLO- BECOM. Vol. 1, 2001, pp. 430-434, Nov.
- Rangel V., Gómez J. (2005). Performance Analysis of QoS Scheduling in Broadband IEEE 802.16 Based Networks. Enviado a IEEE ICC-2006.

Bibliografía sugerida

- IEEE 802.16 e. Part 16: Air interface for Fixed Broadband Wireless Access System. IEEE 802.16 Working Group, October 2004.
- ITU-T Recommendation G.723.1. Speech coders: Dual rate speech coder multi media communications transmitting at 5.3 and 6.3 kbits/s. ITU, 1996.

Semblanza de los autores

Víctor Rangel-Licea. En 1996, se tituló como ingeniero en computación en la Facultad de Ingeniería, UNAM. En 1998, recibió el grado de maestría en telemática, otorgado por la Universidad de Sheffield, Reino Unido. Posteriormente se graduó como doctor en telecomunicaciones por la misma institución en el 2002. Durante su estancia en el extranjero, laboró en ARRIS INTERACTIVE (Boston) y NETTONICS Ltd. (Sheffield) como consultor. Sus líneas de investigación se orientan a técnicas de optimización en redes celulares y redes inalámbricas de banda ancha. Desde 2002, es profesor e investigador del Departamento de Telecomunicaciones de la UNAM y pertenece al SNI.

Javier Gómez-Castellanos. Obtuvo el grado de ingeniero mecánico electricista en 1993 por la UNAM, así como los grados de maestro en ciencias y el doctorado en telecomunicaciones en 1996 y 2002, respectivamente, ambos por la Universidad de Columbia, Nueva York, E.U. Trabajó en el IBM TJ-Watson Research Center en Hawthorne, New York. Sus intereses de investigación incluyen QoS, diseño de algoritmos eficientes de energía y redes de sensores inalámbricos, así como redes *ad hoc*. Desde el otoño del 2002, se desempeña como profesor titular en el Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México y pertenece al SNI.

José Eduardo Cota-Guajardo. Se tituló como ingeniero electrónico en 2001 por el ITC (Instituto Tecnológico de Culiacán) en Culiacán, Sinaloa; becado por fundación Telmex. En el año de 2005, obtuvo el grado de maestro en ingeniería eléctrica por parte de la UNAM, en el área de redes inalámbricas de banda ancha. Durante su estancia en el posgrado, participó en el proyecto PAPIIT No: 1N-110805 y fue becado por fundación Telmex y CONACYT. Actualmente reside en Culiacán, Sinaloa, en donde busca continuar bajo la misma línea de investigación de redes inalámbricas.

Jesús Reyes-García. Es ingeniero mecánico electricista por la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Realizó sus estudios de maestría en ingeniería eléctrica (Área de comunicaciones) en el Posgrado de Ingeniería de la UNAM. Ha sido profesor de tiempo completo en el área de telecomunicaciones durante los últimos 27 años en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Ha impartido materias relacionadas con el electromagnetismo aplicado, sistemas de comunicaciones, comunicaciones ópticas y sistemas de radiocomunicaciones. Ha dirigido más de 50 tesis y participado en diversas conferencias. Fue uno de los profesores que participó en la creación de la carrera de ingeniería en telecomunicaciones en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.