

Estimación de capacidad en una red IEEE 802.11e para entornos *outdoor* multicelda*

Christian Benavides Martínez
sbenavides@unicauca.edu.co

Guefry Agredo Méndez
g.agredo@ieee.org

Javier Andrés Gómez Ordóñez
kgomez@ieee.org

IEEE Student Members**

Fecha de recepción: 19-10-2007

Fecha de selección: 18-04-2008

Fecha de aceptación: 14-01-2008

ABSTRACT

The convergence of services as video, voice and data over a common infrastructure achieving a certain Quality of Service (QoS) level lead to the creation of the IEEE 802.11e standard which enhances the original IEEE 802.11 MAC layer by providing a fair medium access treatment according to the application needs. In addition, the deployment of WLANs in public places (hotspots) has been made in a one-cell oriented way and the behavior of parameters such as throughput, delay and loss packet in

voice and data traffic over an outdoor environment involving more than one cell has not been analyzed. These facts lead to the design of a 802.11e multicell outdoor network based on the solutions provided by special techniques commonly used by cellular telephony in order to solve some problems related to outdoor scenarios. Such design is evaluated using the Network Simulator NCTUns 3.0 and finally some conclusions related to the impact of a multiple cell scheme on the capacity of the Access Points (APs) are presented.

* Manuscrito presentado ante I2COMM 2008, Octubre 19, 2007. Este trabajo fue financiado en parte por UNICAUCA en el marco de Desarrollo de la Maestría en Ingeniería. Área: Electrónica y Telecomunicaciones y el Grupo I+D GNTT.

** Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones- Grupo I+D en Nuevas Tecnologías de Telecomunicaciones Universidad del Cauca, Popayán-Colombia

KEY WORDS

QoS, cell, capacity, distance, outdoor.

RESUMEN

La convergencia de servicios como video, voz y datos sobre una infraestructura común con cierta calidad de servicio (QoS) llevaron al desarrollo del estándar 802.11e. que mejora el estándar original. En este trabajo se analiza el desarrollo de un sistema

802.11e multicelda, por medio de simulaciones, utilizando la herramienta NCTUNS versión 3.0 y el impacto en la capacidad del sistema en un entorno multicelda.

PALABRAS CLAVE

WLAN, 802.11e, QoS, Planificación inalámbrica, simulación.

Clasificación Colciencias: Tipo 1

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la integración de servicios de voz, video y datos sobre una misma infraestructura se ha convertido en una tendencia tecnológica que exige que los proveedores de red se adapten a los requerimientos de cada uno de estos servicios. En particular, la gran acogida de las Redes de Área Local Inalámbricas (*Wireless Local Area Network, WLAN*) ha generado la necesidad de proporcionar un tratamiento diferente al tráfico de voz y video, mediante la aplicación de técnicas que aseguren una determinada Calidad de Servicio (*Quality of Service, QoS*). Como solución a tal necesidad se creó el estándar IEEE 802.11e, el cual se basa en un conjunto de modificaciones al mecanismo original de Control de Acceso al Medio (*Medium Access Control, MAC*) del estándar IEEE 802.11.

Por otro lado, gran parte de los estudios relacionados con el estándar 802.11e y en general con las WLAN se desarrollan sobre escenarios que constan de una única celda cuyo rango de cobertura es limitado como se detalla en [1]. Sin embargo, pueden ampliarse para analizar el comportamiento de tales redes en entornos *outdoor* con múltiples celdas. Para este último caso es necesario considerar aspectos como la distancia entre celdas y la asignación de canales, además de una posible adaptación de esquemas de sectorización ampliamente utilizados por las tecnologías celulares, razón por la cual se propone a continuación un diseño basado en un conjunto de criterios clasificados en capacidad,

cobertura y calidad de servicio para su posterior evaluación mediante el simulador NCTUns 3.0.¹

2. VISIÓN GENERAL DE LOS ESTÁNDARES IEEE 802.11 Y 802.11e.

A. Estándar IEEE 802.11 Nivel MAC

El estándar IEEE 802.11 en su arquitectura básica a nivel MAC, define dos funciones de acceso al medio: la Función de Coordinación Distribuida (*Distribution Coordination Function, DCF*) y la Función de Coordinación Puntual (*Point Coordination Function, PCF*). La primera de ellas es la de mayor difusión y opera sobre un intervalo denominado Período de Contienda (*Contention Period, CP*) mientras que la segunda opera sobre un periodo denominado Libre de Contienda (*Contention Free Period, CFP*).

DCF se basa en el método de Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisión (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance, CSMA/CA*), cuyo funcionamiento, de forma general, se resume de la siguiente manera: una estación está en la capacidad de transmitir si ésta ha detectado que el medio está libre por al menos la duración de un tiempo denominado Espacio Inter-Trama DCF (*DCF Interframe Space, DIFS*). De lo contrario, la estación retrasa la transferencia de datos hasta que la transmisión que se encuentra en curso finalice.

Con el fin de proveer servicios con altas exigencias en tiempo tales como

1. NCTUns es un simulador y un emulador de la red extensible y de alta fidelidad capaz de simular diversos protocolos de redes IP cableadas e inalámbricas. <http://nsl.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html>

voz, audio y video se especificó la Función de Coordinación Puntual. PCF requiere de un AP que controle el acceso al medio y sondee las estaciones (*polling*), por lo tanto sólo se puede utilizar en las configuraciones de red en modo infraestructura y opera en el Período Libre de Contienda. Este método de acceso utiliza un Punto Coordinador (*Point Coordinator*, PC) el cual funciona en el AP y es empleado para determinar qué estación tiene permiso para transmitir. De hecho, PCF es un mecanismo de acceso de polling en donde el PC tiene el papel de sondeo maestro (*polling master*) y mantiene una lista de las estaciones registradas a las cuales autoriza una por una para dar inicio a la transmisión de su información. Ninguna estación está en capacidad de transmitir al menos que sea autorizada, y de la misma manera reciben información de un AP solamente cuando obtienen autorización del punto coordinador.

B. Limitaciones de QoS en DCF y PCF

Como ya es conocido, las aplicaciones de datos, video y audio tienen requerimientos de transmisión diferentes. Sin embargo, con DCF todas las estaciones y flujos de datos tienen la misma prioridad de acceso al medio, es decir, no hay manera de garantizar el cumplimiento de los parámetros de calidad para cada servicio debido a la ausencia de un mecanismo que brinde prioridad en el acceso al medio según el tipo de paquete. En otras palabras, una estación no tiene la capacidad

de diferenciar sus propios paquetes y por lo tanto carece de la capacidad de manejar QoS diferentes.

Aunque PCF se diseñó con el fin de proveer servicios con exigencias de tiempo, este método de acceso tiene ciertos problemas que llevan a un desempeño con una calidad de servicio pobre. Entre éstos se encuentran[2]:

1. La incapacidad de las estaciones de comunicar sus requerimientos de QoS al Punto Coordinador hace difícil optimizar el mecanismo de sondeo en el PC.
2. La provisión de QoS hace referencia a la transmisión de paquetes durante el Período Libre de Contienda, es decir, PCF es un procedimiento estático de provisión de QoS.
3. Los retrasos impredecibles en la trama Beacon² conducen a un CFP más corto.
4. PCF puede garantizar la transmisión de un paquete en cada período de supertrama (CFP+CP). Sin embargo, si un servicio necesita de una transmisión de paquetes con mayor frecuencia, la red no está en capacidad de soportarlo.

Teniendo en cuenta las anteriores limitaciones, el Grupo de Trabajo E (*Task Group E*, TGe) se encargó de mejorar el nivel MAC de 802.11 con el fin de soportar aplicaciones que tienen diferentes requerimientos de QoS. Como resultado de esto se aprobó en julio de 2005 el estándar 802.11e cuya operación a nivel MAC

2. Trama de gestión que contiene información relacionada con el SSID (Service Set ID), parámetros de configuración de Salto en Frecuencia (*Frequency Hopping*, FH), Secuencia Directa (*Direct Sequence*, DS), entre otros.

se explicará de manera concisa a continuación

C. Estándar IEEE 802.11e

El estándar 802.11e establece en su arquitectura una nueva función de acceso llamada Función de Coordinación Híbrida (*Hybrid Coordination Function, HCF*) la cual define dos funciones que se diferencian según el método de acceso que utilicen. En el método de Acceso al Canal Distribuido Mejorado (*Enhanced Distributed Channel Access, EDCA*) una de las funciones de 802.11e consiste en la modificación de la función DCF ya existente soportando QoS basada en prioridades. Por otra parte, la segunda función llamada Acceso al Canal Controlado HCF (*HCF Hybrid Controlled Channel Access, HCCA*) controla el acceso al canal con el fin de proveer una calidad de servicio basada en parámetros. El término híbrido hace referencia a la capacidad de operar tanto en el Período de Contienda como en el de Libre de Contienda. De la misma manera que en el estándar 802.11, el Grupo de Servicio Básico (*Basic Service Set, BSS*) es el bloque

constitutivo del estándar 802.11e con la diferencia de que éste soporta calidad de servicio y se denota como Grupo de Servicio Básico con Calidad de Servicio (*Quality of Service Basic Service Set, QBSS*). Además, las estaciones clientes que también soportan QoS se conocen como Estaciones con Calidad de Servicio (*Quality of Service Stations, QSTA*) [3].

1. Acceso al Canal Distribuido Mejorado (EDCA):

Esta función es una mejora de las funcionalidades básicas de DCF soportando adicionalmente las categorías de tráfico de QoS con prioridad descritas previamente e intenta determinar una transmisión justa para cada trama. Para el soporte de EDCA, 802.11e define cuatro Categorías de Acceso (*Access Categories, AC*) y cada TC se mapea en una de estas AC según se muestra en la Tabla 1.

Una QSTA opera de acuerdo con las mismas reglas generales definidas para DCF pero con la diferencia de que provee una cola (separada) para cada categoría de acceso. El tiempo de escucha de cada cola, previo a la

Tabla 1. Mapeo de las categorías de tráfico sobre las categorías de acceso.

Nivel de prioridad	Categoría de Tráfico (TC)	Categoría de Acceso (AC)	Tipo de Tráfico
Más baja	1	AC_BK	Background
	2	AC_BK	Background
	0	AC_BE	Best Effort
	3	AC_BE	Best Effort
	4	AC_VI	Video
	5	AC_VI	Video
Más alta	6	AC_VO	Voz
	7	AC_VO	Voz

transmisión, es diferente y recibe el nombre de Espacio Inter-Trama Arbitrario (*Arbitrary Interframe Space*, AIFS). Por ejemplo, si la categoría de acceso i tiene una prioridad menor que la categoría de acceso j ($AC_i < AC_j$) entonces el AIFS de la primera es mayor que el de la segunda ($AIFS_i > AIFS_j$). Es decir, que el tráfico de la categoría i debe esperar a que el medio esté libre por más tiempo que las de la categoría j . De esta manera EDCA provee prioridad de acceso al medio al tráfico con prioridad más alta. El Espacio Inter Trama Arbitrario de cada categoría de acceso se calcula mediante la expresión (1) en la cual el término AIFSN corresponde al Número Arbitrario de Espacio Inter-Trama (*Arbitration Interframe Space Number*, AIFSN) y cuyo valor es un número entero que depende de la categoría de acceso. La Tabla 2 contiene este valor para los diferentes estándares IEEE 802.11.

$$AIFS[AC] = AIFSN[AC] \times SlotTime + SIFS \quad (1)$$

Cada cola tiene sus propios valores de ventana de contienda máxima y mínima (CW_{min} CW_{max}), contadores de tiempo de *backoff* y la transmisión de paquetes se realiza de manera independiente una vez que su contador de *backoff*³ haya llegado a cero. Es así como el tráfico con la más alta prioridad tendrá, de una manera estadística, tiempos de *backoff* más cortos que el tráfico con una prioridad más baja. Dada la situación en que los contadores de *backoff* de dos colas en la misma QSTA llegan al valor de cero al mismo tiempo, la cola con la menor prioridad retrasa su transmisión y

cede el derecho a transmitir a la cola con prioridad más alta. En este caso, la cola con menor prioridad asume este hecho como la presencia de una colisión en el medio de transmisión (asume que el medio está ocupado) y en el estándar 802.11e, a esto se le conoce como Resolución de Colisión Interna.

Si una estación gana el acceso al medio durante el período de contienda, ésta puede transmitir una o más tramas (de la misma cola) durante una Oportunidad de Transmisión (*Transmission Opportunity*, TXOP), ya sea al mismo destino o a un destino diferente hasta que la TXOP alcance su valor límite (TXOPLimit). Las transmisiones que tienen lugar dentro de la TXOP se separan por un SIFS y se conocen como Ráfagas Libres de Contienda (*Contention Free Burst*, CFB).

El resto de estaciones fijan su Vector de Asignación de Red (*Network Allocation Vector*, NAV) de la misma manera que en DCF y así posponen la transmisión de su información. La información acerca de TXOP Limit, CW_{min} , CW_{max} , $AIFS$, se difunde a través de un nuevo campo en la trama Beacon llamado *QoS Parameter Set Element*. Los valores de parámetros de contienda según la categoría de acceso se encuentran en la Tabla 2 [4].

2) Acceso controlado al canal HCF (HCCA):

Como se mencionó anteriormente, 802.11e propone una nueva función llamada HCCA, la cual se utiliza para proveer calidad de servicio a

3 Período aleatorio generado por la estación después de verificar que el medio está libre

Tabla 2. Valores de AIFSN y AIFS para los estándares IEEE 802.11 a/b/g

	AIFS [VO] (μ s)	AIFS[VI] (μ s)	AIFS [BE] (μ s)	AIFS [BK] (μ s)
AIFSN	2	2	3	7
802.11 ^a	34	34	43	79
802.11b/g	50	50	70	150
802.11g ^d	28	28	37	73

las estaciones de un QBSS en modo infraestructura y su principal función es la de proveer oportunidades de transmisión (TXOP) a las QSTA de acuerdo con sus necesidades de tráfico. HCCA hace uso de un punto coordinador llamado Coordinador Híbrido (*Hybrid Coordinator, HC*), el cual se coloca por defecto en el AP del QBSS. A diferencia de PCF en el estándar IEEE 802.11, HCCA opera durante los períodos CFP y CP. Durante el CFP, las estaciones no pueden competir por el medio ya que su NAV no está activo y por lo tanto el HC tiene la ventaja de acceder al medio libremente. Durante el CP, el HC también puede tener acceso al medio cuando detecte que está libre, esto lo hace utilizando la prioridad EDCA más alta (AIFS= PIFS, CWmin = CWmax = 0) ya que el mínimo tiempo de escucha para acceder al medio del resto de estaciones es el DIFS, el cual es mayor que el PIFS.

El Coordinador Híbrido asigna oportunidades de transmisión a las estaciones, mediante un mecanismo de sondeo mejorado, las cuales pueden ser asignadas a intervalos que se adaptan a la tasa de transferencia y requerimientos de retardo de flujos de tráfico en particular. Para esto el HC de cada QBSS necesita tener un

amplio conocimiento de la cantidad de tráfico acumulado perteneciente a las diversas categorías de tráfico (con diferentes prioridades) y así poder asignar una TXOP adecuada. Esto aumenta la complejidad.

Cabe anotar que al ser aprobado el estándar 802.11e a mediados del año 2005 la Alianza Wi-Fi generó una especificación interna llamada Wi-Fi Multimedia (*Wi-Fi Multimedia, WMM*) adoptando únicamente el mecanismo EDCA con el propósito de facilitar la interoperabilidad y garantizar la QoS entre diferentes proveedores de equipos según el tipo de tráfico que exista en la red. Para la clasificación de los paquetes, WMM se basa en las cuatro categorías: voz, video, best effort, y background, es decir, WMM se basa en EDCA. De igual manera el grupo de estudio E tomó en consideración a HCCA como mecanismo de acceso generando un nuevo grupo conocido como Acceso Programado Wi-Fi Multimedia (*Wi-Fi Multimedia Scheduling Access, WMM-SA*). Sin embargo, en mayo de 2006, la junta directiva de la Alianza Wi-Fi decidió dar por terminado el grupo WMM-SA dejando así a WMM (EDCA) como único esquema de QoS que puede ser certificado en equipos de la Alianza Wi-Fi [5].

4 Sólo para redes completamente 802.11g

3. PROBLEMAS TÍPICOS EN EL DESPLIEGUE DE REDES WLAN EN ENTORNOS OUTDOOR

Ventajas de WLAN como la rapidez de despliegue, facilidad de instalación, su flexibilidad y escalabilidad han hecho que el diseño de estas redes se limite al simple uso de puntos de acceso con antenas omnidireccionales (Figura 1) sin tener en consideración problemas, como el de nodo oculto, nodo expuesto, distancia del trayecto de propagación, desvanecimiento por multitrayecto, problemas de LOS, o el manejo del handover. Tales problemas se explican a continuación.

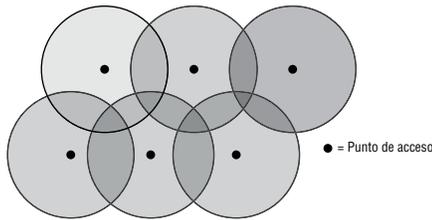


Figura 1. Uso de puntos de acceso en cada celda sin previa planeación.

A. Problema del nodo oculto: Este problema se presenta cuando dos o más estaciones no pueden escucharse entre sí, de tal manera que cuando alguna de éstas necesite transmitir información va a iniciar la contienda por el medio, pero al no detectar la presencia de una frecuencia portadora (energía a nivel PHY) asumirá que el medio se encuentra libre e iniciará la transmisión de datos. De igual manera, cuando las demás estaciones deseen transmitir (en el peor de los casos al mismo tiempo), éstas asumirán el compartimiento del primer caso e iniciarán la transmisión de su información. Esto se refleja en una pérdida de paquetes (colisiones en el AP) dada la incapacidad del punto de

acceso para establecer una sincronización simultánea y conllevando una desmejora en el desempeño del BSS. La Figura 2 ilustra de mejor manera este problema.

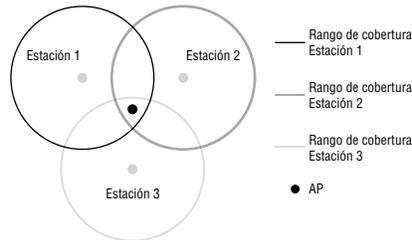


Figura 2. El punto de acceso se encuentra dentro del rango de cobertura de las tres estaciones clientes, sin embargo, éstas no se escuchan entre sí.

B. Problema del nodo expuesto: Este caso se presenta cuando se hace uso de la misma frecuencia (canal) en dos BSS adyacentes. En la Figura 3 las estaciones cliente 1 y 2 se encuentran conectadas a puntos de acceso diferentes, ambas en el mismo canal. Sin embargo, la estación 1 se inhibe de transmitir ya que asume que el canal se encuentra siempre ocupado por la transmisión de la segunda estación a pesar de que esta se halla asociada al AP 2.

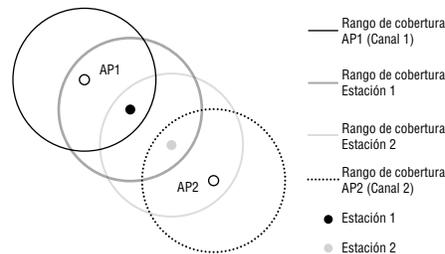


Figura 3. Problema del nodo expuesto

C. Distancia del trayecto de propagación: En despliegues outdoor la calidad de la señal se ve afectada debido a la separación física entre transmisores y receptores ya que ésta

disminuye a medida que la distancia de separación aumenta. Esta diferencia en la intensidad de la señal recibida conduce a una desmejora en el rendimiento del BSS ya que no existe una repartición equitativa de la capacidad del sistema, lo que perjudica a las estaciones más cercanas al punto de acceso.

En particular, en el caso de la tecnología 802.11e, la distancia juega un papel importante en el desempeño de los niveles PHY y MAC, ya que el estándar fue diseñado para operar correctamente en rangos no mayores a 200m[6], pero para distancias más largas entra en consideración el tiempo de propagación de la señal el cual aumenta a medida que incrementa la distancia de separación, siendo de gran importancia para aplicaciones que soportan bajos retardos. Este tema será tratado más adelante, en la sección relacionada con el cálculo del radio de una celda.

D. Desvanecimiento por multi-trayecto: En enlaces radio, usualmente la señal en el receptor es el resultado de múltiples señales que se han reflejado y refractado a lo largo del trayecto de propagación y la presencia de cambios en la amplitud, fase y polarización generan una distorsión de la señal original.

E. Obstrucciones a la línea de vista (LOS): Los obstáculos entre las antenas transmisoras y receptoras, impiden la adecuada propagación de señales RF de alta frecuencia y deben ser considerados en un enlace inalámbrico.

4. DISEÑO DE UNA RED WLAN MULTICELDA EN ENTORNOS OUTDOOR

Una vez identificados los problemas existentes en los entornos *outdoor*, se

propone a continuación el diseño de una Red WLAN Multicelda *Outdoor* que soporta 802.11e basado en un conjunto de criterios que se pueden resumir de la siguiente manera [4]:

1. *Criterios de capacidad:* con el fin de soportar el tráfico generado por el usuario con las mejores características de desempeño (*throughput*, *delay*, pérdida de paquetes). Entre los aspectos a considerar se encuentran el número de canales disponibles, distancia de re-uso de frecuencia, radio de cobertura de la celda y sectorización.
2. *Criterios de cobertura:* para asegurar la disponibilidad del servicio sobre toda el área haciendo énfasis sobre modelos bidimensionales como el de Okumura-Hata y Walfish-Bertoni, COST231-Walfish-Ikegami
3. *Criterios de calidad:* muy relacionado con los objetivos de capacidad y de cobertura para que en conjunto se logre proporcionar una buena QoS. Es de especial importancia la elección del códec y la activación de las funcionalidades de Solicitud de Envío (*Request to Send*, RTS) y Preparado para Enviar (*Clear to Send*, CTS)

Considerando que el objetivo principal es evaluar el estándar 802.11e cuyo desempeño se mide a nivel MAC el diseño propuesto se basa en un entorno que presenta condiciones ideales pero que consta de múltiples celdas sobre las que se analizan adicionalmente parámetros como la distancia entre puntos de acceso (radio de celda) y la sectorización aplicada a cada celda. Todo esto con el fin de intentar garantizar una QoS

en la transmisión de voz y datos enmarcada en la recomendación ITU-T G.1010 [7]. Sin embargo, se deben considerar las siguientes premisas:

1. Es necesario que el *backbone* del Proveedor de Servicios de Red (Network Service Provider, NSP) esté en capacidad de soportar un gran número de usuarios ya que la cantidad de estaciones que se conectan a cada AP del *hotspot* durante un determinado lapso es variable e impredecible. Lo anterior tiene implicaciones tanto en el diseño del *core* de una red, el cual debe atender de la mejor manera a los clientes de la red de acceso, así como en la configuración apropiada de los servidores de VoIP y pasarelas.
2. El NSP deber estar en capacidad de garantizar calidad de servicio extremo a extremo. Para el caso de la interconexión de varios AP que soportan 802.11e y que se encuentran en un sector o celda diferente se hace necesario que los dispositivos intermedios, tales como switches o enrutadores tengan la capacidad de soportar mecanismos de QoS de tal manera que se realice un tratamiento especial de la trama según el tipo de datos que se esté transmitiendo a través de la red. En particular, si en el *core* se trabaja con una arquitectura Diffserv, es necesario que los enrutadores de frontera tengan implementado un mapeo de la prioridad de los datos contenidos en la trama MAC 802.11e a las diferentes clases de servicio manejadas por esta arquitectura.

3. En escenarios reales es de vital importancia realizar un adecuado diseño a nivel radio para lo cual deben estudiarse detalladamente las posibles fuentes de interferencia, identificar la presencia de obstáculos, utilizar mecanismos que permitan la comprobación de línea de vista, realizar una estimación del radio de cobertura, y determinar tanto la potencia como el factor de ruido. Sin embargo, en el diseño propuesto sólo se consideran los efectos del radio de cobertura y de la sectorización en el desempeño del nivel MAC 802.11e.
4. Los clientes son estacionarios, es decir, no se analizará el efecto de movilidad sobre la transmisión de voz y datos.

Teniendo en cuenta las anteriores premisas, a continuación se presentan las características más relevantes del diseño para su posterior simulación.

Radio de cobertura por celda: según estudios realizados en [8] a nivel radio la elección de una distancia inferior a 3 km no tiene consecuencias considerables sobre el nivel MAC, por lo que para facilidad de cálculos el radio de cada celda será de 1 km.

Planeación de frecuencias y tamaño del cluster: la banda escogida es la de 2.4GHz, con lo que se tiene un número máximo de 13 canales disponibles. Se debe evitar la interferencia de canal adyacente asegurando un mínimo de 5 canales ($n=5$) como espaciamiento entre los canales elegidos.

Por lo tanto las únicas agrupaciones de canales (en pares o tripletas) que cumplen con lo mencionado anteriormente se definen de la siguiente manera:

$$\text{Canales disponibles} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Grupo } i: (Ch_i, Ch_{i+n}, Ch_{i+2n}) \text{ para } 1 \leq i \leq 3 \\ (Ch_i, Ch_{i+n}) \text{ para } 3 < i \leq 5 \end{array} \right. \quad (2)$$

O expresado de manera más sencilla, los canales disponibles son:

- Grupo 1: (1, 6, 11)
- Grupo 2: (2, 7, 12)
- Grupo 3: (3, 8, 13)
- Grupo 4: (4, 9)
- Grupo 5: (5, 10)

De lo anterior se deduce que si desea repartir equitativamente el número de canales por celda se pueden utilizar como máximo 9 canales por cluster⁵ repartidos en 3 grupos con 3 canales cada uno.

Una vez conocido el número efectivo de canales a utilizar se está en capacidad de establecer el tamaño del cluster y el número de sectores por celda. El tamaño del cluster (K) equivale al número de celdas que lo componen y si se analiza detalladamente la expresión 1 se encuentra que el número de grupos posibles es, en sí, el número de celdas por cluster y el número de canales por grupo conlleva determinar el número de sectores por celda. Es decir, K= 3 y cada celda está dividida en 3 sectores.

Por lo tanto cada cluster constará de un set o conjunto de frecuencias dado por:

$(Ch_i, Ch_{i+n}, Ch_{i+2n})$ para $1 \leq i \leq 3$,
donde Ch_i es el canal de cada sector.

Con lo que la asignación de canales por cluster será tal como se observa en la Figura 4.

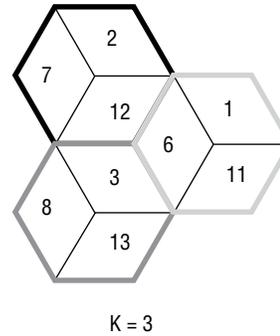


Figura 4. Asignación de canales en un (1) cluster.

Cálculo de la distancia de re-uso y localización espacial de las celdas co-canal: la localización de una celda de referencia A (color azul) se muestra en la Figura 5 [4].

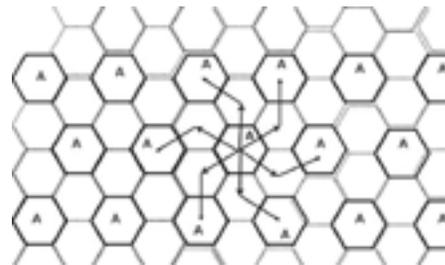


Figura 5. Ubicación de una celda co-canal de referencia A

Según la expresión $D = \sqrt{3K} \times R$ en la cual K = 3 y R = 1 km se obtiene que la distancia de re-uso (D) debe ser al menos 3 km.

⁵ Área conformada por un número determinado de celdas adyacentes que utilizan canales diferentes.

Potencias de transmisión: considerando los rangos típicos de transmisión de los AP y la situación legal en cuanto a la emisión de energía electromagnética en entornos urbanos mediante tecnologías Wi-Fi en territorio colombiano [9] se trabajará con 1 W como máxima potencia de transmisión.

Elección del códec: la elección de un códec adecuado está muy relacionada con la capacidad del sistema debido a la cantidad de ancho de banda que puede necesitar, éste mantiene una estrecha relación con la calidad de la voz humana percibida por parte de la fuente y el destino. En particular se estudiará el efecto de los códecs G.711 y G.729 de una celda y el efecto del códec G.711 multicelda.

Diagrama de red: La red WLAN outdoor a simular se presenta en la Figura 6.

5. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Debido al vertiginoso desarrollo de las tecnologías de telecomunicaciones y al auge de la competencia en el sector industrial, el uso de herramientas de simulación resulta imprescindible ya que permite la reducción de costos de diseño, mejora su calidad y en definitiva disminuye el tiempo que tardan en salir al mercado los productos o tecnologías simulados. En particular, el simulador y emulador de redes NCTUns se basa en una metodología de simulación de reingreso de kernel lo cual le permite proveer muchas ventajas que los simuladores tradicionales como Opnet y NS-2 simplemente no pueden proporcionar, ya que hace uso de las pilas de protocolos TCP/IP que utiliza Linux aprovechando sus características de emulador, por lo que le es posible generar datos de muy alta fidelidad como resultado de

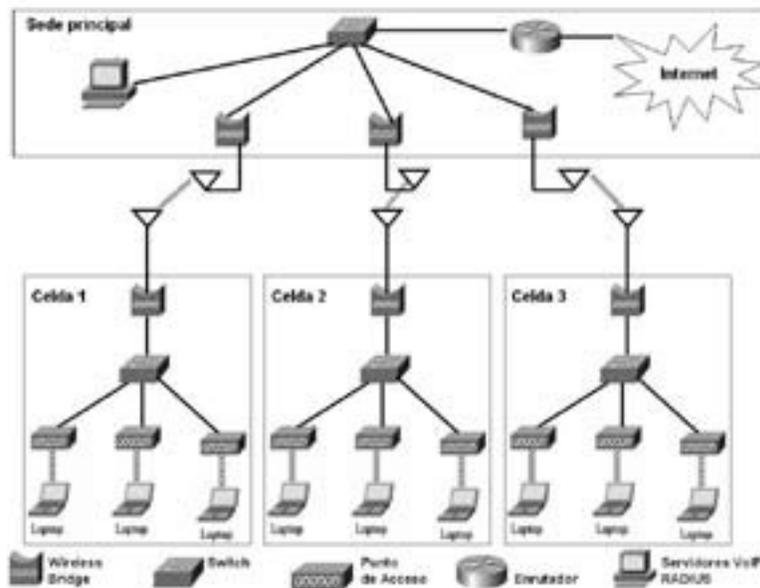


Figura 6. Ubicación de una celda co-canal de referencia A

su simulación. Entre los dispositivos que está en capacidad de simular se encuentran: hubs Ethernet, switches, enrutadores, hosts, APs IEEE 802.11b/e, antenas direccionales de 60°, 120° y 180° con patrones de ganancia reales, además de las antenas omnidireccionales tradicionales[10]. Considerando lo anterior, se eligió esta herramienta de simulación como base para el diseño de una red WLAN multicelda outdoor con soporte para IEEE 802.11e.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Análisis a nivel de una celda: Tráfico de Voz

La Figura 7 muestra el *throughput* medido de una llamada de 64Kbps a medida que se varía el número de estaciones. Se observa que cuando el número de estaciones supera a 18, el valor del *throughput* cae por debajo de los 60Kbps. Este comportamiento está relacionado con la disminución de la probabilidad de acceso al medio ya que el número de estaciones aumenta, es decir, la contienda por el medio se torna más difícil y los paquetes que se encuentran listos para ser transmitidos (en la cola de la categoría de acceso 6, AC[6]) deben esperar hasta que la estación gane el acceso al medio.

Este retardo hace que la tasa CONSTANTE de bits (CBR) generada por el *códec* (64Kbps) sea diferente de la que la estación en realidad transmite (VARIABLE), en otras palabras, si no existiera contienda por el medio, el número de paquetes por segundo que saldrían del nivel MAC (que se transmiten) serían 50, pero al existir un retardo adicional (tiempo de *backoff*, AIFS, conteo del NAV) el número

de paquetes transmitidos disminuye. Esto se ve reflejado en la Figura 8, en donde se observa que el retardo se mantiene relativamente constante cuando el número de estaciones es bajo, pero este comienza a aumentar a medida que la cantidad de usuarios se incrementa. Nótese que a pesar de que este parámetro presenta un comportamiento lineal creciente, la variación es muy lenta y los valores del retardo son muy bajos, del orden de los 5 ms como máximo. Estos valores tan pequeños llevan a pensar que si se desea proporcionar una QoS extremo a extremo, de tal manera que el retardo en un solo sentido sea inferior a 150 ms, el retardo obtenido en la Figura 8 se puede considerar muy bajo, pero su efecto a nivel MAC es muy profundo y se ve reflejado en el *throughput* de la estación cliente. El valor de 60Kbps se obtiene a partir de la Figura 9, en donde se observa cómo a partir de 4.500 paquetes transmitidos durante el período de simulación el número de paquetes que llegan al receptor varía, empezando desde 4.500 (dos estaciones transmitiendo) hasta llegar a valores cercanos a los 4.000 paquetes recibidos. De acuerdo con la recomendación G.1010 la pérdida debe ser inferior al 3% de los paquetes transmitidos, es decir, para un tiempo de simulación de 90 segundos, el máximo número de paquetes perdidos que se puede considerar es de $4.900 \times 3\% = 147$ o dicho de otra manera, durante cada segundo se puede perder únicamente el tres por ciento del número de paquetes transmitidos, esto es $50 \times 3\% = 1.6$ paquetes. Por lo tanto, el número de paquetes que se recibiría por segundo es de 49 y el *throughput* registrado en el destino sería de $49 \times 160 \text{ bytes/seg} = 7840 \text{ Bps} = 62720 \text{ bps}$. No obstante, se considera

que este es un valor de referencia muy alto puesto que según el análisis hecho previamente, sólo se perdería un paquete por segundo y este valor es lo suficientemente bajo como para afectar la inteligibilidad de la conversación [11]. Por otro lado, se encontró en [12] que la caída de la mayor parte de las llamadas VoIP se da cuando el *through-*

put cae por debajo del 10% de su valor ideal y aplicando esta consideración al escenario de simulación propuesto se obtiene un *throughput* mínimo de 64Kbps - 6.400bps = 57.600bps, por lo que si considera un margen de diferencia⁶ de 2.400 bps se tiene que el *throughput* de referencia es de 57.600bps+2.400bps= 60.000bps= 60Kbps.

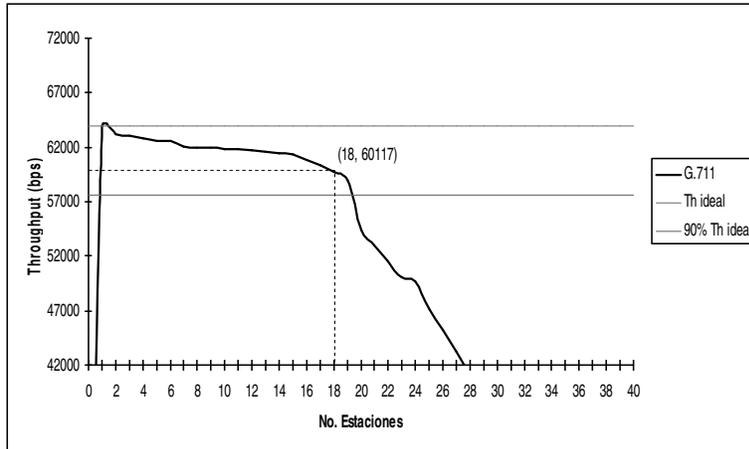


Figura 7. *Throughput* vs. No. de estaciones haciendo uso del Códec G.711

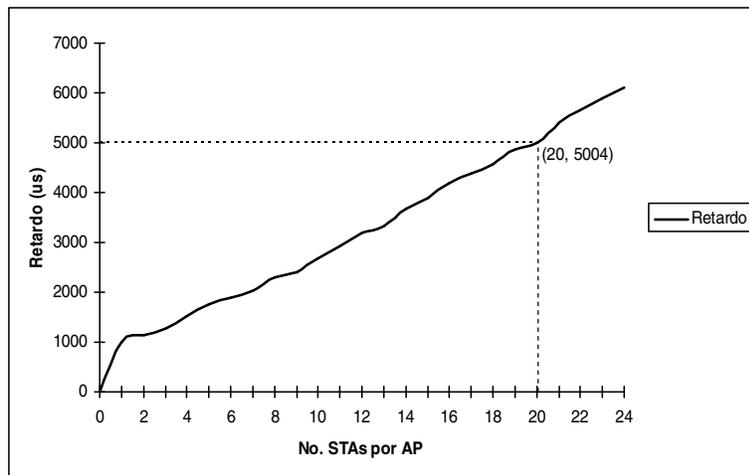


Figura 8. Retardo vs. No. de estaciones. Códec G.711.

⁶ Debido a que la fluctuación en el número de paquetes perdidos es variable, es deseable establecer un cierto margen de error cuyo valor mínimo sea equivalente al 90% del valor de *throughput* ideal. En este caso se considera un margen de diferencia aproximado de 0.3KBbps.

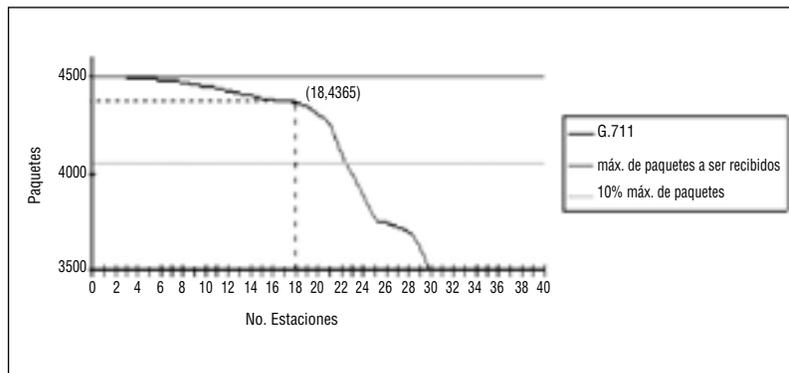


Figura 9. Paquetes recibidos vs. No. de estaciones haciendo uso del códec G.711.

Un análisis similar se obtiene para el códec G.729 en donde se observa que la diferencia en los niveles de *throughput* es notable debido a que el tamaño de la carga útil es muy bajo comparado con el de G.711. Sin embargo, el comportamiento de esta variable (Figura 10) demuestra que su variación es más lenta a medida que aumenta el número de estaciones. Esto se debe al NAV cuya función principal es la de notificar a su estación que el medio se encuentra virtualmente libre una vez este contador se haya actualizado y decrementado, de acuerdo con la información obtenida del campo *Duration* de la trama MAC. Este campo es mapeado por la estación que gana el acceso al medio y contiene el tiempo de transmisión estimado de acuerdo con el TAMAÑO del paquete de datos que está ingresando a la capa. A partir de lo anterior, es fácil deducir que, puesto que el tamaño de las muestras de este códec es menor que el del G.711, el tiempo de transmisión será menor y el valor del campo *Duration* será más bajo así como el valor del NAV del resto de estaciones. Todo esto se ve reflejado en la disminución del tiempo de espera, en el incremento de la probabilidad de acceso al medio

y en la posibilidad de transmitir los paquetes a la misma velocidad de generación de bits del códec, es decir, se reduce la probabilidad de que se pierdan paquetes y se puede mantener un nivel de *throughput* relativamente constante. De manera más sencilla, lo anterior demuestra cómo el bajo ancho de banda consumido por este códec influye sobre la capacidad del sistema. Sin embargo, a pesar de contar con tiempos del NAV muy bajos, en la misma Figura 10 se puede observar cómo a medida que el número de estaciones que transmiten se acerca a 30 el valor del *throughput* comienza a decrecer. En este caso el número de estaciones juega un papel importante ya que la competencia por el medio es cada vez más difícil y por lo tanto el retardo es cada vez mayor.

Para el caso de la Figura 11 se observa que los valores de retardo son más bajos, debido a lo mencionado en el párrafo anterior y su valor comienza a exceder los 4 ms cuando el número de estaciones se acerca a 28. Siguiendo el mismo análisis, en la Figura 12 se tiene que a medida que el número de estaciones aumenta el número de paquetes que llegan al destino disminuye.

Finalmente se concluye que a nivel de una celda (cuyo AP tiene un patrón omnidireccional) la capacidad de la celda se ve afectada según el tipo de *códec* utilizado presentando el *códec* G.729 un mejor desempeño debido al bajo consumo de ancho de banda. De la misma manera, se dedujo la importancia del efecto de los retardos a

nivel MAC a medida que se aumenta el número de estaciones y cómo estos tres parámetros están estrechamente relacionados.

Con el propósito de presentar uniformidad en los datos en todos los escenarios se trabajará de aquí en adelante con el supuesto de un radio de cobertura de 1 km y el *códec* G.711.⁷

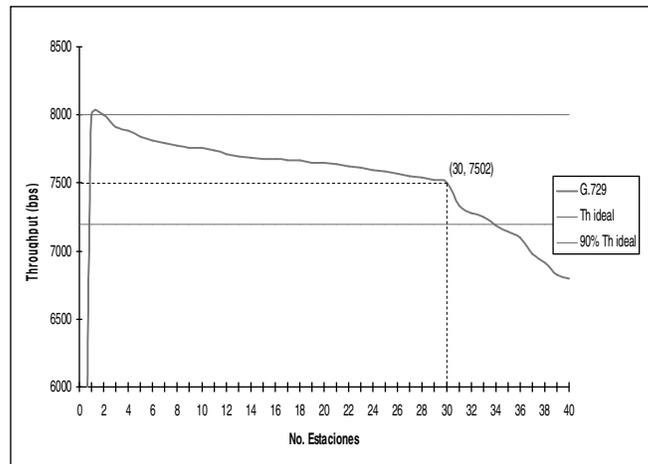


Figura 10. Throughput vs. Número de Estaciones con el *códec* G.729.

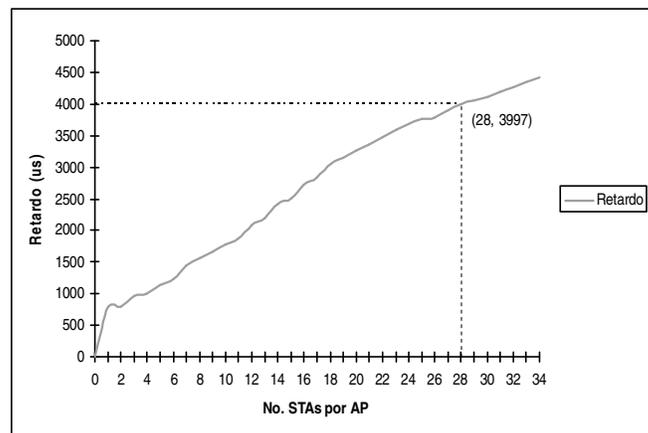


Figura 11. Retardo vs. Incremento en el número de estaciones. *Códec* G.729.

7. Se decidió escoger el *códec* G. 711 debido a su baja complejidad, menor consumo de potencia y notable presencia en los actuales teléfonos Wi-Fi, además, la herramienta y el equipo de simulación no presentan estabilidad a medida que se aumenta el número de estaciones al hacer uso del *códec* G.729 conllevando repetidas veces a la reanudación del sistema. El análisis del desempeño de los *códec*s al variar el radio de cobertura se encuentra con mayor detalle en [4].

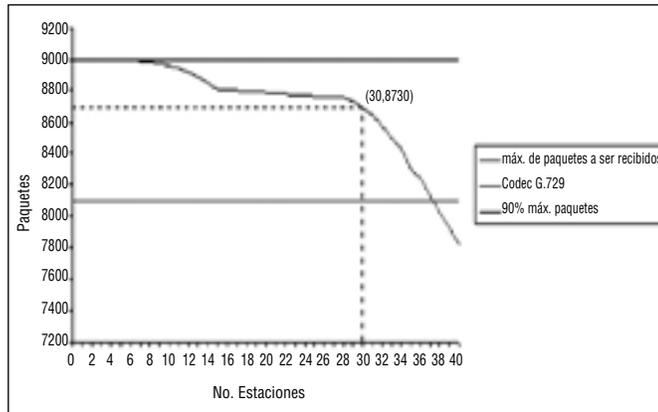


Figura 12. Paquetes recibidos vs. Número de estaciones. Códex G.729.

B. Análisis Multicelda:
Tráfico de voz

De acuerdo con la Figura 13, se observa un retardo adicional debido al aumento del número de saltos (3 switches) que el paquete de voz debe atravesar. No obstante, en este escenario es elemental reconocer la importancia del switch que hace parte de la infraestructura del proveedor de red ya que es el encargado de recibir todo el tráfico proveniente de cada una de las celdas que componen el cluster, lo cual puede ser causa de un aumento

en el retardo y de la pérdida de QoS si se toma en consideración otro tipo de tráfico (video o datos).

En cuanto al comportamiento del *throughput* se puede observar en la Figura 14 una desmejora debido principalmente a la presencia de celdas vecinas cuya interferencia afecta en cierta medida el desempeño de la red, y su efecto se ve reflejado en la disminución del número de paquetes por segundo que llegan al receptor (ver Figura 15). En este caso el número

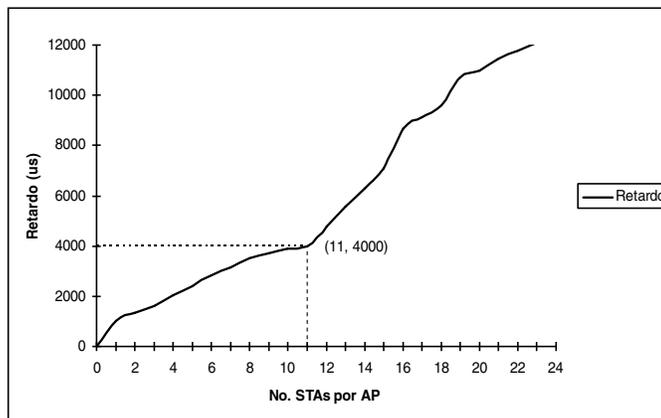


Figura 13. Retardo en un cluster con K=3.

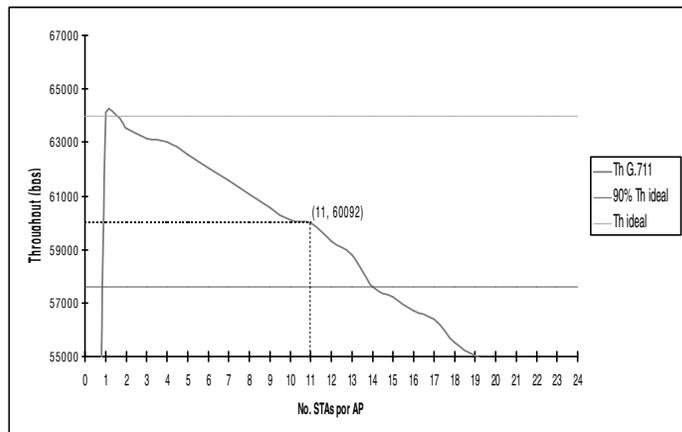


Figura 14. Throughput vs. Número de estaciones en un cluster con K=3.

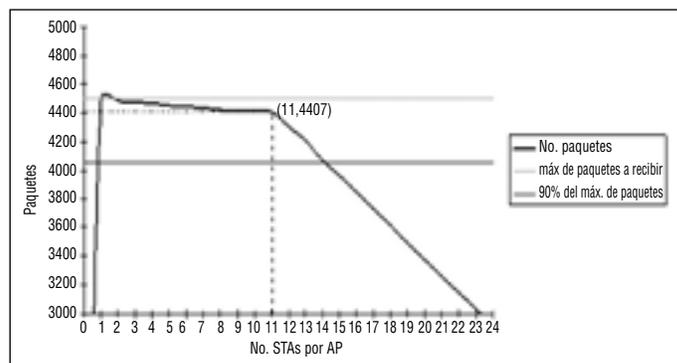


Figura 15. Paquetes recibidos vs. Número de estaciones en un cluster con K=3.

de estaciones de voz que cada AP está en capacidad de soportar se reduce aproximadamente a 11, manteniéndose por encima del *throughput* de referencia definido en el análisis en una celda omnidireccional.

De lo anterior se deduce que a medida que el número de celdas aumenta, la capacidad de cada AP se ve influenciada por el incremento en la congestión del switch que se encuentra en el proveedor de red. Para este caso, es importante hacer hincapié en los mecanismos de QoS que este nodo debe soportar, ya que en este escenario se ha

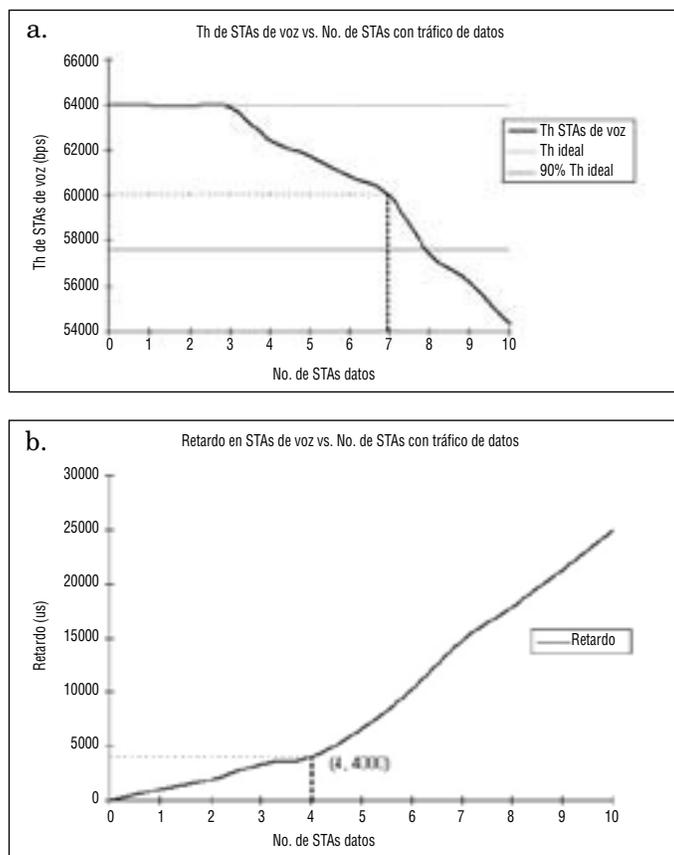
mostrado una disminución de la capacidad del sistema sin tener en cuenta un posible y probable caso de transporte de tráfico de datos o de video.

C. Análisis de una celda: Tráfico de voz y datos

Entre las características más notables del estándar 802.11e se encuentra la capacidad de proporcionar un tratamiento privilegiado a las aplicaciones como voz y video frente a las aplicaciones de datos. Esto se consigue mediante la asignación de un tiempo de espera adecuado (AIFS)

que incrementa la posibilidad de acceso al medio inalámbrico de una manera más rápida al retardar en cierta medida el acceso de las estaciones con tráfico de datos. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 16 en donde se observa que el número de estaciones con tráfico de voz soportado por un AP se ve afectado levemente a medida que el número de estaciones de datos incrementa, llegando a un valor de 14 estaciones que registran un nivel de *throughput* aceptable (superior al 90% de su valor ideal). Sin embargo, cuando existen

4 estaciones con tráfico de datos⁸ el *throughput* de las estaciones de voz comienza a deteriorarse lentamente puesto que el período de ocupación del medio por parte de una estación con AC[0] aumenta considerablemente al transmitir tramas de mayor tamaño (1.500 bytes). Este efecto comienza a ser más notorio y perjudicial cuando se llega a un número de 7 estaciones con tráfico de datos por lo que las conversaciones en curso pueden finalizar inesperadamente generando así un mal funcionamiento del sistema. En cuanto al retardo, éste aumenta con-



8. El tráfico generado por la estación de datos es de 2Mbps, con un tamaño de trama de 1.500 bytes.

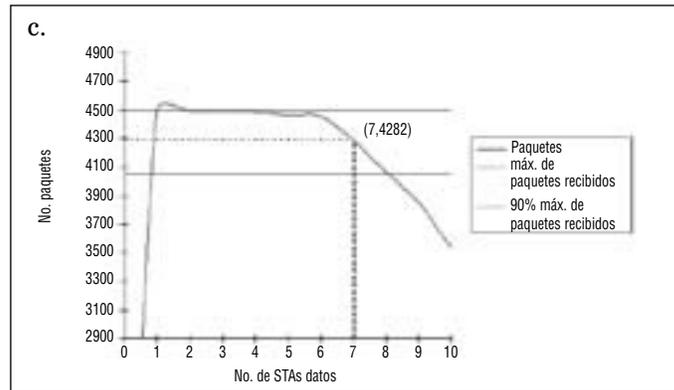


Figura 16 a, b, c. *Throughput*, retardo y pérdida de paquetes para tráfico de voz y datos

siderablemente y alcanza valores de 15ms debido al aumento en el tamaño de las tramas de datos que transmiten las estaciones involucradas. De igual manera, la pérdida de paquetes de voz se hace más notoria a medida que aumenta el número de estaciones de voz y datos por AP.

Hasta este punto se ha obtenido que el número de estaciones de voz y datos que pueden coexistir en un mismo AP es 21: 14 de voz y 7 de datos. Sin embargo, no se ha estudiado el efecto de las 14 estaciones de voz sobre las variables de *throughput*, retardo y

pérdida de paquetes de las estaciones con tráfico de datos. Tal efecto se ilustra en la Figura 17 en donde se observa que al existir 7 estaciones de datos, el valor del *throughput* alcanza valores muy bajos, inferiores al 50% de su valor ideal, lo cual se vería reflejado en la lentitud en la carga de una página web o en la descarga de un archivo de Internet por ejemplo. No obstante, a medida que el número de estaciones de datos disminuye, el *throughput* presenta un comportamiento creciente estabilizándose en un valor del 70% cuando el número de estaciones es inferior a

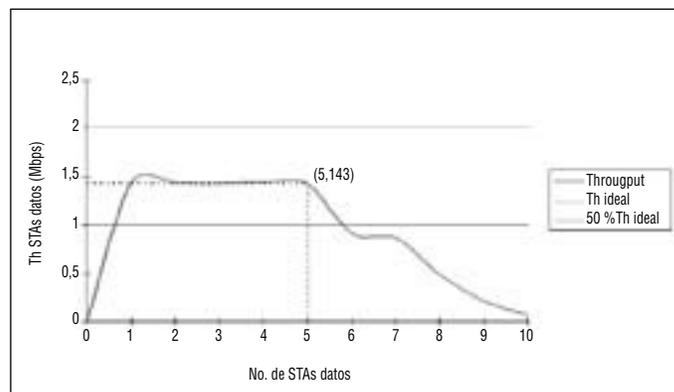


Figura 17. *Throughput* vs. No. STAs con tráfico de datos (con 14 STAs de voz fijas)

5. Lo anterior sugiere la posibilidad de disponer de 14 estaciones de voz junto con 5 estaciones con tráfico de datos, es decir, se da lugar a un factor de $5/14 \approx 0.3$ con el cual se procura garantizar una QoS extremo a extremo en cada AP asegurando niveles de *throughput*, retardo y pérdida de paquetes aceptables.

Sin embargo, entre las limitaciones del simulador se mencionó la incapacidad de garantizar una QoS extremo debido a la presencia de dispositivos intermedios que carecen de mecanismos de diferenciación de tráfico, por lo que la determinación del número de usuarios de voz y datos multicelda se limita al uso del factor anteriormente sugerido, la cantidad de usuarios de voz soportado por el AP y el número de APs requeridos.

En el caso de un clúster con $K=3$ se tiene:

- Número de APs por cluster: 9
- Cantidad de usuarios de voz soportado por AP: 11
- Número de usuarios de voz por cluster: $9 \times 11 = 99$
- Número de usuarios de datos por cluster: $9 \times 11 \times 0.3 \approx 29$
- Número de usuarios con tráfico de voz y datos por cluster: $99 + 29 \approx 128$

En cuanto a los valores de pérdida de paquetes y de retardo se observa un aumento considerable debido principalmente a la alta prioridad de acceso que tienen las aplicaciones de voz sobre las de datos como aparece en las Figuras 18 y 19 respectivamente.

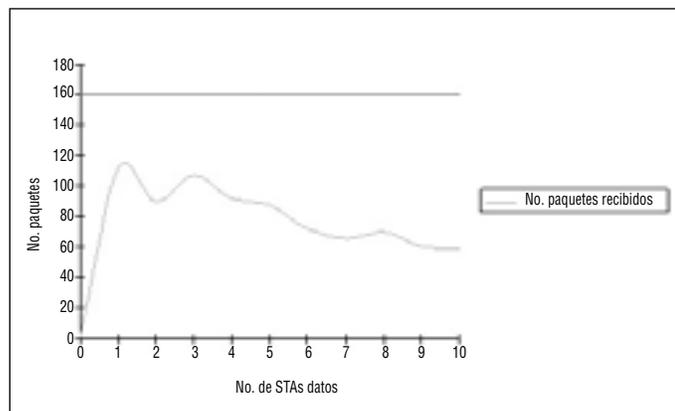


Figura 18. Paquetes recibidos vs. No. de STAs con tráfico de datos (con 14 STAs de voz fijas)

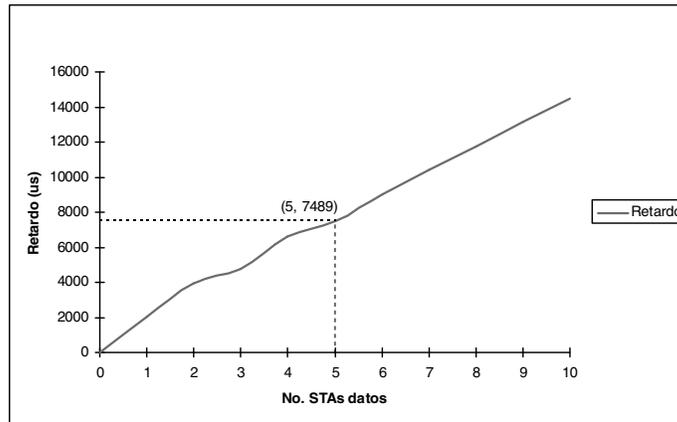


Figura 19. Retardo vs. No. STAs con tráfico de datos (con 14 STAs de voz fijas)

Tabla 3. Número de estaciones según el escenario

Escenario	Cantidad de APs	Número de estaciones	Rango de cobertura
Voz			
Una celda omnidireccional	1	18	3 km ²
Multicelda (Un cluster con K=3)	9	≈100	9 km ²
Voz y Datos			
Celda omnidireccional	1	19	3 km ²
Multicelda (Un cluster con K=3)	9	128	9 km ²

En la Tabla 3 se encuentran consignados los resultados expuestos anteriormente [4].

7. CONCLUSIONES

1. Es de especial interés considerar el ancho de banda requerido por un *códec* determinado puesto que éste influye en la capacidad de cada AP en un entorno multicelda.
2. El hecho de realizar un análisis de resultados y estimar la capacidad de cada AP desde un punto de vista orientado hacia el cumplimiento de los requerimientos de QoS sugeridos por la recomendación ITU-T G.1010 sirve de soporte para garantizar la prestación de servicios de voz y datos de tal manera que se cumplan las expectativas del cliente.
3. Es importante aplicar técnicas como el re-uso de frecuencias y la sectorización dado que su utilización influye en el incremento de la capacidad del sistema.
4. Al proporcionar servicios de voz y datos en redes 802.11e se debe

garantizar que ambos tráficos cumplan de manera simultánea con las recomendaciones de QoS mínimas, de esta manera se intenta brindar una QoS relativamente justa a los diferentes usuarios de un *hotspot*.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agredo Guefry, "Selección de Valores de Parámetros EDCA en un QBSS de VoWlan", Tesis de Maestría, Universidad del Cauca, 2007.
- [2] Intel White Paper, "Providing QoS in WLANs: How the IEEE 802.11e Standard QoS Enhancements Will Affect the Performance of WLANs", 2004.
- [3] Estándar IEEE 802.11e, "IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. Amendment 8: Medium Access Control (MAC) - Quality of Service Enhancements", 2005
- [4] Agredo Guefry, Benavides Christian, Gómez Javier, "Diseño y Simulación de una red WLAN Multicelda con soporte para 802.11e", Universidad del Cauca, 2007.
- [5] Gil Epshtein, "How to assure QoS over WLAN for consumer electronics", 2006.
- [6] Global Knowledge, "Wireless Bandwidth-Not Necessarily as Advertised", 2006.
- [7] ITU-T Rec G.1010, "Quality of Service Performance- End user Multimedia QoS Categories", 2001.
- [8] Kin K. Leung, Bruce McNair, Leonard J. Cimini, Jr., y Jack H. Winters, "Outdoor IEEE 802.11 Cellular Networks: MAC Protocol Design and Performance".
- [9] Ministerio de Comunicaciones, Resolución Número 000689, 2004.
- [10] Shie-Yuan Wang y Yi-Bing Lin, "NCTUns network simulation and emulation for wireless resource management", 2005.
- [11] T. Braskish, N. Esmavatkul, S. Emeott, T. Wilsont. "Link Adaptation Evaluation for WLAN Using a voice Quality Metric".
- [12] Dangerfield Ian, Malone David y Douglas J. Leith, "Experimental Evaluation of 802.11e EDCA for Enhanced Voice over WLAN Performance", 2005.

CURRÍCULOS

Javier Andrés Gómez Ordóñez.
IEEE Student Member. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Áreas de interés: Comunicaciones Móviles e Inalámbricas, Redes de Nueva Generación. Ingeniero de Implementación ANDCOM LTDA.

Christian Benavides Martínez.
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Áreas de interés: Comunicaciones Inalámbricas, Internetworking, Regulación de Telecomunicaciones. Huawei Technologies Engineer.

Guefry Agredo Méndez. IEEE Student Member. Docente de Planta de la Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones - Universidad del Cauca. Investigador del Grupo de I+D en Nuevas Tec-

nologías en Telecomunicaciones (GNTT). Candidato a Magíster en Ingeniería Área: Electrónica y Telecomunicaciones. Áreas de interés: Comunicaciones Inalámbricas, Voz sobre IP, Servicios de Internet. 