

Implementación de IEEE 802.11 en enlaces largos para zonas rurales aisladas

**Francisco Javier Simó Reigadas y
Andrés Martínez Fernández**

Dept. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad Rey Juan Carlos
Fuenlabrada, Madrid, España
{javier.simo,andres.martinez}@urjc.es

**M^a Fernanda Dulcey Morán y
Álvaro Rendón Gallón**

Grupo de Ingeniería Telemática
Universidad del Cauca
Popayán, Cauca, Colombia
{mafe,arendon}@unicauca.edu.co

Resumen

El estándar IEEE 802.11, ideado con el propósito de posibilitar las redes locales inalámbricas, se ha empleado en ocasiones realizar enlaces de varios kilómetros y construir redes de cierta extensión, aunque no se adapta bien a esas distancias. No obstante, los estudios formales del MAC de IEEE 802.11 (también llamado WiFi) incluyen simplificaciones que los hacen inaplicables a las largas distancias; poco se sabe del comportamiento que se puede esperar en una determinada instalación con enlaces de ese rango. En este trabajo se va a estudiar el estándar IEEE 802.11 desde la perspectiva de su aplicabilidad a zonas rurales aisladas, y se presentan unas pruebas realizadas con el objeto de conocer el comportamiento de WiFi en enlaces con distancias entre 3 y 88Km.

Palabras Clave

WiFi, IEEE 802.11, Comunicaciones inalámbricas, radioenlaces, microondas, zonas rurales aisladas.

I. INTRODUCCIÓN

Más de la mitad de la población mundial vive en zonas rurales que carecen completamente de infraestructuras de telecomunicación terrestres. Esta situación, además, no tiene visos de cambiar ya que en muchas de esas regiones no resulta viable desplegar redes de operador debido al bajo poder adquisitivo de sus habitantes, la baja densidad de la población, la disponibilidad limitada de alimentación eléctrica, y multitud de otros problemas relacionados con la accesibilidad, la seguridad, etc. Hay por lo tanto un importante desafío en encontrar tecnologías apropiadas de bajo costo para la conexión a Internet y a la red telefónica desde lugares de estas características [1,2,3,4].

Nuestro grupo, EHAS (Enlace Hispano-Americano de Salud) [18,19,20], ofrece soluciones tecnológicas de bajo costo para acceder a Internet y/o al correo electrónico desde establecimientos de salud rurales en zonas aisladas mediante enlaces inalámbricos, utilizando diferentes tipos de tecnologías en función de la distancia y de las condiciones topográficas y geográficas. Se han empleado enlaces radio en bandas VHF y HF tanto para conmutación de voz como

para correo electrónico, y más modernamente enlaces de microondas, tanto por satélite como terrestres, estos últimos empleando sistemas IEEE 802.11b, también llamados WiFi (ver Fig. 1). Las tecnologías de VHF y HF, solo permiten alcanzar velocidades de aproximadamente 9.6 y 1.2 Kbps respectivamente, que aunque son suficientes para soportar correo electrónico ligero, no brindan la posibilidad de soportar adecuadamente otros servicios como la navegación por Internet; también es restrictivo en estas tecnologías el funcionamiento semidúplex con altos tiempos de conmutación entre recepción y transmisión, lo cual hace difícil el uso de servicios de telefonía.

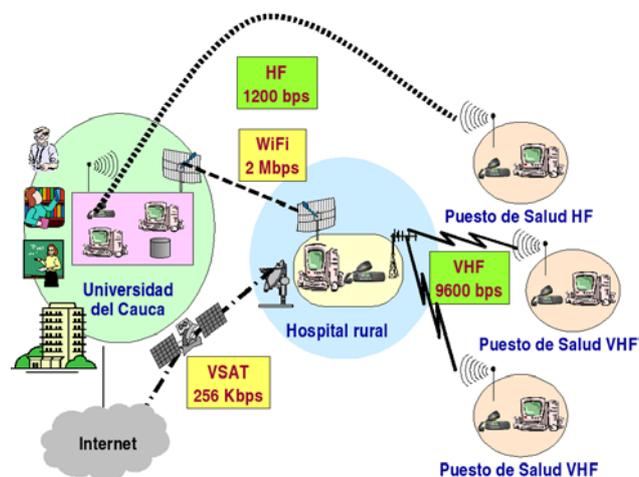


Figura 1. Tecnologías de acceso inalámbrico utilizadas en EHAS

Las tecnologías de microondas (WiFi y satélite), en cambio, hacen posibles los enlaces de banda ancha permanentes, con posibilidad de usar redes de datos a velocidades superiores a 1 Mbps y redes de telefonía empleando VoIP (voz sobre IP), lo que las convierte en la mejor alternativa entre las opciones que hay para conectar los establecimientos de salud. Sin embargo, el uso de estaciones satelitales es algo que implica costos fijos elevados, algo insostenible para la comunicación de grupos humanos poco densos y de bajo poder adquisitivo.

En los últimos tiempos ha aparecido una alternativa más que reviste un interés indudable por ofrecer de forma nativa comunicaciones de banda ancha con calidad de servicio en distancias largas; se trata de IEEE 802.16-2004, conocida popularmente como WiMAX. Hace muy pocos meses se han certificado los primeros equipos comerciales que cumplen con el estándar, aunque hay otros que, no certificados aún, prometen compatibilidad o, en todo caso, posibilidad de actualización por firmware a WiMAX en el corto plazo. La gran pega de WiMAX para nuestros escenarios sigue siendo el coste, ya que los equipos son caros, y aparentemente lo seguirán siendo aún a medio plazo, y el material estandarizado es de para la banda de 3.5GHz, que no es libre y para la que las licencias son costosas y difíciles de obtener en la mayor parte de los países. Así pues, aunque WiMAX será sin duda objeto de vigilancia tecnológica para quienes buscamos tecnologías apropiadas para zonas en vías de desarrollo, WiFi ofrece por el momento indudables ventajas prácticas que la hacen la única solución sostenible de esas características, ya que sólo requiere de una inversión inicial en equipos bastante económicos y no necesita licencias por uso del espectro, pues funciona en la banda libre ISM de 2.4 Ghz.

La utilización de WiFi para enlaces largos es en realidad un uso “anómalo” de una tecnología cuyo diseño obedece a los requerimientos de las redes de área local inalámbricas. Para su uso en enlaces que cubren distancias de decenas de kilómetros no se cuenta casi con precedentes documentados en publicaciones formales (casi el único es [4], y por debajo de los 6 Km también [5]), no es inmediato saber qué prestaciones pueden obtenerse y además el comportamiento de los distintos productos que se encuentran en el mercado es completamente distinto.

Los trabajos de EHAS con WiFi se iniciaron en Colombia en el año 2002. Por esa época, no existía evidencia (al menos publicada) sobre radioenlaces WiFi estables del alcance de decenas de kilómetros. La elección de tarjetas WiFi con las que se construirían los equipos de red se basó en parámetros tales como la potencia de transmisión, sensibilidad de recepción, temperatura y humedad soportadas en operación y *chipset*. Este último parámetro era muy importante, ya que se necesitaba disponer de soporte en Linux para todos los modos (*Master, Managed, Ad-hoc, Monitor*) para poder construir puntos de acceso, puentes, repetidores y routers. El primer chipset que soportó dicha funcionalidad fue el PrismII, al cual le sucedió el Prism2.5 y luego apareció el Hermes, que fue el último que se utilizó antes del que se usa actualmente.

El primer enlace permanente que se implementó, fue entre la ciudad de Popayán y los hospitales de la población de Silvia, zona rural del departamento de Cauca, con un repetidor en el Cerro Nueva Guambía, a una distancia punto a punto de 36 Km de Popayán; entró en funcionamiento en septiembre de 2002, siendo el primero de larga distancia de que se tiene registro en Colombia (ver Fig. 2). Durante esta

primera experiencia, se aprendió mucho acerca del comportamiento de WiFi en largas distancias, y dio pie a dos líneas de investigación actualmente vigentes en marcha dentro del grupo: una sobre el modelado y optimización de WiFi para largas distancias, y otra sobre redes *mesh* estáticas con WiFi. Actualmente se está instalando una red WiFi de 5 puntos en el departamento, con enlaces punto a punto de entre 22 y 88Km.

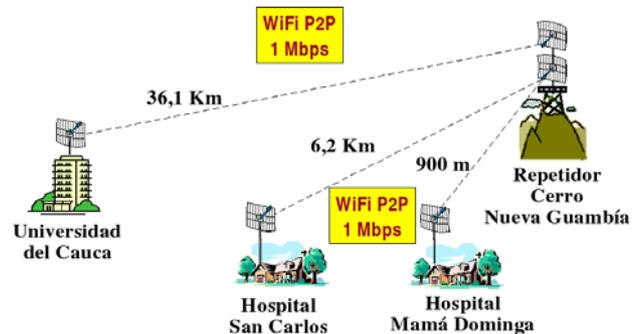


Figura 2. Enlace Universidad - Cerro Nueva Guambía – Hospitales

En este artículo se va a introducir el tema del uso de WiFi en las largas distancias, explicando sus peculiaridades y los resultados experimentales que se han obtenido.

II. PRESTACIONES DE IEEE 802.11 EN LAS LARGAS DISTANCIAS

Cuando se quiere usar WiFi para enlaces más largos de los previstos, cabe preguntarse donde están las limitaciones de distancia y prestaciones. Vamos a hacer este estudio a dos niveles: el PHY (capa física de 802.11) y el MAC (capa de enlace y control de acceso al medio de 802.11).

2.1 Aspectos relacionados con la capa PHY

Nominalmente 802.11a usa frecuencias sobre los 5GHz y 802.11b/g usan la banda de 2.4GHz. La legislación permite usar esas bandas de frecuencias sin necesidad de licencia en la mayor parte de los países, pero limitando el nivel de potencia que se puede transmitir. Ese nivel de potencia máximo, que dependerá del país, del tipo de enlace, y a veces incluso del tipo de zona, es el que impone límites a la distancia.

IEEE 802.11 [6] define diferentes velocidades de comunicación, lo cual se consigue empleando distintos tipos de modulación y codificación. En 802.11b [7] se tienen cuatro velocidades distintas: 1Mbps (modulación DBPSK), 2Mbps (modulación DQPSK), y 5.5Mbps y 11Mbps (CCK). A los distintos tipos de modulación y codificación corresponden distintos BER (*bit error rate*) para una misma relación señal/ruido. Básicamente, cuanto mayor es la velocidad, más potencia hay que recibir para tener una tasa de error de bits suficientemente baja. La diferencia en la sensibilidad de recepción entre 1 y 11Mbps, aunque depende de equipos, suele ser de más de 10 dB, lo cual equivale

prácticamente a cuadruplicar con 1Mbps el alcance que se tiene con 11Mbps. Si además tenemos en cuenta que la banda ISM 2.4 GHz impone limitaciones en cuanto al nivel de potencia que es legal transmitir, se puede probar que para enlaces muy largos normalmente debemos limitarnos a las velocidades más bajas de 802.11 para tener estabilidad y buena calidad. En concreto, para distancias de decenas de kilómetros nos vamos a restringir a 802.11b por esta razón. Aunque hemos llegado a establecer enlaces de más de 40 Km con 802.11g a 6 Mbps de forma experimental, la experiencia nos ha enseñado a ser conservadores para soportar una cierta pérdida de prestaciones que sin duda se va a dar con el tiempo por pérdida de alineación de las antenas, cambios climáticos y otros factores.

Según lo anterior, el problema de IEEE 802.11 en enlaces muy largos se reduce a lograr un balance de enlace en que la potencia recibida sea suficientemente superior a la sensibilidad del receptor, teniendo en cuenta la potencia transmitida, las ganancias y las pérdidas del enlace:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} - L_{ccTx} - L_{ccRx} - L_p + G_{Rx} \quad (1)$$

siendo P_{Rx} la potencia recibida por el receptor, P_{Tx} la potencia transmitida por el transmisor, G_{Tx} la ganancia de la antena del transmisor en la dirección del enlace, L_{ccTx} las pérdidas de cable y conectores en el sistema transmisor, L_{ccRx} las pérdidas de cable y conectores en el receptor, L_p las pérdidas de propagación y G_{Rx} la ganancia de la antena del receptor en la dirección del enlace.

Cuando la propagación es en el espacio libre, las pérdidas de propagación se pueden calcular en función de la distancia empleando la ecuación:

$$L_p \text{ [dB]} \cong 92,45 + 20 \log f \text{ [GHz]} + 20 \log d \text{ [Km]} \quad (2)$$

que en la banda ISM 2.4 Ghz se reduce a la siguiente:

$$L_p \text{ [dB]} \cong 100 + 20 \log d \text{ [Km]} \quad (3)$$

Esa expresión teórica se puede usar siempre que se tenga asegurada la línea de vista “despejada” (primera zona de fresnel libre en un 60% en todo el trayecto) y que no se tengan que tener en cuenta efectos tales como el multitrajecto. La experiencia demuestra que los efectos del entorno geográfico y las condiciones climáticas [8,9] pueden causar un resultado real sensiblemente peor que el teórico, teniendo en enlaces muy largos pérdidas de propagación muy superiores a las calculadas. Se puede tener una mejor aproximación a la realidad empleando el modelo Longley-Rice combinado con mapas digitales de elevaciones y con un cuidadoso ajuste de sus parámetros.

En Colombia, en zonas rurales, la normativa vigente usa las restricciones de la FCC para la banda de 2.4 GHz:

transmisión máxima a 30 dBm con una antena de 6 dBi PIRE, y 1 dBm menos en el transmisor por cada 3 dBi más en la antena. Haciendo unos cálculos sencillos de balance de enlaces con antenas reales, directivas de 24 dBi y omnidireccional de 12 dBi, con unas pérdidas de 1dB por conector en cada sistema, con transmisores de 25 dBm, y con un margen de 25 dB sobre -92 dBm de sensibilidad (la habitual en muchas tarjetas para 2 Mbps), podemos calcular que la distancia aproximada que se podría conseguir para enlaces punto a punto de 2 Mbps puede alcanzar casi los 90 Km.

En enlaces punto a multipunto tenemos normalmente menos ganancia en uno de los extremos, lo cual limita el alcance. El caso peor sería si necesitamos una antena omnidireccional en la estación base, lo cual nos restringiría a poco más de 25 Km. De cualquier modo, la legislación en la mayoría de los países es más restrictiva para enlaces PtMP.

Para lograr enlaces de 11 Mbps, teniendo en cuenta la diferencia de sensibilidad, nos veríamos restringidos a no más de 40 Km y 10 Km respectivamente. Por último, huelga añadir que todo esto es válido sólo si se garantiza la línea de vista. Otras consideraciones sobre la factibilidad o la conveniencia de hacer enlaces de uno u otro tipo dependerán del estudio de la capa MAC.

Señalamos también que los canales disponibles en banda ISM 2.4 GHz varían entre países; los canales comunes a todo el mundo son 11 canales, en saltos de 5 MHz, en la banda 2.4000-2.4835 GHz, si bien cada canal tiene en realidad un ancho de 22 MHz. Se recomienda usar canales separados 25 MHz cuando se necesita que sean mutuamente no interferentes por trabajarse dentro de un mismo dominio de colisión, lo cual nos deja un total de tres canales usables en esas condiciones (canales 1, 6 y 11).

2.2 Aspectos relacionados con la capa MAC

En la capa MAC de 802.11 (Fig. 3) se han descrito dos modos de funcionamiento, uno distribuido (DCF) y otro centralizado (PCF); ambos pueden usarse alternativamente, de manera que a cada periodo de contienda con DCF siga un periodo de *polling* con PCF, y así sucesivamente. El PCF es opcional y ha sido raramente implementado en equipos disponibles en el mercado. Para saber lo que el MAC puede dar de sí, es preciso estudiarlo a fondo. Vamos a proceder a una descripción pormenorizada de los aspectos que tienen importancia en el cálculo de prestaciones y en la dependencia de la distancia.

Aunque el MAC de 802.11 no es completamente ranurado, se define una “duración de slot” (*aSlotTime*) que depende del nivel físico (PHY), y de esta forma los otros tiempos definidos en la capa MAC se definirán en función de la duración de slot que corresponda al PHY subyacente. En DSSS (el PHY de 802.11b), la duración de slot es de 20 μ s.

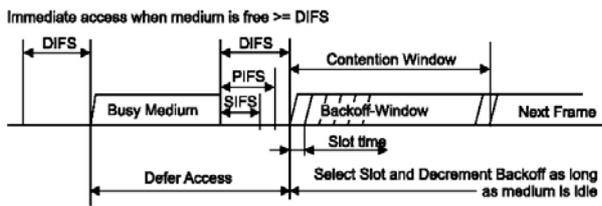


Figura 3. MAC de 802.11

El estándar define 4 tipos de “espacios” (en realidad tiempos) de separación entre tramas, que se usan para conseguir 4 niveles de prioridad para el acceso al medio en función del tipo de paquete y del modo de coordinación; no se debe entender la palabra “prioridad” aquí en términos de QoS, pues es tan sólo un mecanismo para habilitar el arbitraje distribuido del acceso al medio:

- SIFS (*Short Inter Frame Space*): Es el mínimo espacio entre tramas. Se usa para separar transmisiones pertenecientes al mismo diálogo. Se usa para separar una trama y su ACK, una trama CTS o fragmentos de una misma MPDU. Su valor lo fija la capa física de tal manera que a la estación transmisora le sea posible conmutar a modo receptor y sea capaz de decodificar el paquete entrante. Al ser el espacio entre tramas más corto, se usa cuando una estación ha ganado el medio y necesita mantenerlo durante el intercambio de tramas a desarrollar. En DSSS, SIFS = 10 μ s.
- PIFS (*Point Coordination IFS*): Sólo debe usarse bajo PCF. Lo usa el punto de acceso para ganar acceso al medio antes que cualquier otra estación en el comienzo del CFP (*Contention Free Period*). Su valor es SIFS + $aSlotTime$.
- DIFS (*Distributed IFS*): Se usa bajo DCF. Lo usa una estación que quiere empezar una nueva transmisión, y se calcula como el PIFS más un $aSlotTime$. Una estación que usa DCF podrá transmitir si su mecanismo de detección de portadora determina que el medio está libre tras un tiempo igual al DIFS después de la recepción correcta de una trama, y que su ventana de contención haya expirado. Una estación que usa DCF no debería transmitir dentro del tiempo que marca el EIFS después de determinar que el medio está libre tras la recepción de una trama que contenía un error. La estación puede transmitir después de la recepción de la siguiente trama correcta, permitiendo que la estación se resincronice, usándose el DIFS que sigue a la recepción de esa trama. Su valor es PIFS + $aSlotTime$.
- EIFS (*Extended IFS*): Es el IFS más largo. Lo usa una estación que ha recibido un paquete que no puede entender. Se necesita para prevenir que la estación (que no puede entender la información de duración para el mecanismo de *Virtual Carrier Sense*) colisione con un paquete futuro perteneciente al diálogo actual.

El modo DCF usa un sistema de acceso al medio llamado CSMA/CA (acceso múltiple con detección de portadora, evitando colisiones), cuyo funcionamiento se describe a continuación. Cuando una estación tiene un paquete para transmitir, primero escucha en el canal, y cuando detecta que el canal está libre deja pasar un tiempo DIFS y luego un tiempo que se llama ventana de contención, tras lo cual si el canal sigue libre transmite. Si se escucha otra transmisión durante la cuenta atrás de la ventana de contención, se congela la cuenta y no se transmite, y cuando el canal queda libre se espera DIFS y se continúa con la cuenta atrás donde se dejó. Cuando el paquete se transmite, si se trata de un paquete unicast (es decir, ni broadcast ni multicast), el transmisor queda a la espera de recibir la confirmación. El receptor recibe el paquete, comprueba su CRC mientras espera un tiempo SIFS y envía un ACK.

Cuando una trama es muy larga y la estación tiene configurado un umbral de fragmentación, la estación puede fragmentar la trama, y en ese caso envía los fragmentos en ráfaga, separados por SIFS, de forma que ninguna otra estación puede ganar el acceso al canal.

La detección de portadora puede ser real o virtual. La detección real se produce cuando se escucha realmente en el medio la portadora. La virtual emplea un contador llamado NAV (*Network Allocator Vector*) en cada sistema, de forma que cuando se recoge una trama se inicializa ese vector a un valor que tiene en cuenta la duración de ésta y el tiempo necesario para que se produzca su confirmación, y durante ese tiempo la estación no considerará libre el canal. En el modo DCF se prevé la posibilidad de que se dé el problema del nodo oculto: dos nodos pueden estar demasiado alejados para verse entre sí, pero tener a la vista a un nodo intermedio, de forma que uno no puede saber si el otro está transmitiendo al nodo común simplemente escuchando el medio físico. Para evitar la colisión de paquetes grandes por esta causa, se define un mecanismo de envío en cuatro pasos llamado RTS/CTS. De esta forma, el sistema que quiere enviar, primero manda un pequeño paquete llamado RTS, y el receptor contesta con un CTS. Tanto el RTS como el CTS incluyen la información de la duración prevista para la transmisión, con lo que todo equipo que pueda interferir en ella puede oír uno u otro e inicializar su NAV para considerar el canal ocupado durante todo ese tiempo. El modo DCF se puede utilizar en redes ad-hoc o en redes infraestructura, y en cualquiera de los casos todas las estaciones tienen los mismos privilegios, incluyendo puntos de acceso.

Es importante hablar de un parámetro que se menciona vagamente en el estándar pero cuyo valor no se define: el *ACKTimeout*. Dicho parámetro está descrito como el tiempo que un equipo tiene para esperar el ACK de un paquete transmitido previamente; tras ese tiempo, el ACK se da por perdido (no se puede distinguir si se ha perdido el paquete enviado o el ACK por recibir) y aunque llegue se descarta, tras lo cual se incrementa el tamaño de la ventana de con-

tención y se emprende una nueva retransmisión. El estándar no define la duración del *ACKTimeout*, ni da ninguna pista que condicione a los implementadores. Igual sucede con *CTSTimeout* cuando se usa el mecanismo RTS/CTS.

Por su parte, el modo PCF sólo puede utilizarse en redes con infraestructura. Es una función de coordinación opcional que se preveía para implementar servicios con retardo acotado, como voz o video, pero apenas se ha implementado. El mecanismo PCF proporciona transferencia de tramas libre de contención. Este método de acceso usa un Punto Coordinador (PC), que operará en el punto de acceso de la BSS, para determinar qué estación tiene derecho a transmitir en cada momento. El funcionamiento se basa en sondeo, siendo el PC el que desempeña el papel de “maestro”. El PCF está planteado para alternar periodos libres de contención (CFP) con periodos de contención, o dicho de otra manera, DCF y PCF pueden funcionar alternativamente. El PCF inaugura un periodo libre de contención distribuyendo cierta información dentro de tramas de gestión para ganar el control del medio con el objeto de fijar el NAV (*Network Allocation Vector*) en las estaciones por un valor equivalente a todo el periodo libre de contención. Todas las estaciones fijarán su NAV al comienzo del CFP, lo cual supone que ninguna se considerará con derecho a ocupar el canal en ese periodo. Al final de un periodo DCF el maestro puede generar un nuevo periodo libre de contención ganando el canal de forma determinista gracias a que $PIFS < DIFS$.

En un CFP, todas las estaciones de la BSS (exceptuando el PC) fijan su NAV al valor del parámetro *CFPMaxDuration* en el comienzo de cada CFP. Esto evita la mayor parte de las contiendas impidiendo las transmisiones no sondeadas por parte de las estaciones independientemente de que éstas sean o no sondeables (CF-Pollable).

Las transferencias durante el periodo libre de contienda están formadas por tramas enviadas alternativamente desde y hacia el PC. Durante el CFP, el PC controlará el orden de estas transmisiones y el permiso de las estaciones para transmitir en todo momento. La Fig. 4 representa un intercambio típico de tramas durante el periodo libre de contienda.

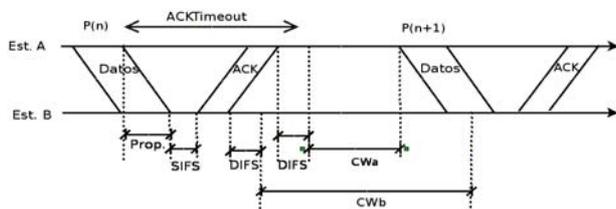


Figura 4. Funcionamiento de DCF teniendo en cuenta tiempo de propagación

Con lo explicado hasta aquí ya hay suficiente información para valorar los límites de distancia de ambos métodos. Tanto los distintos IFS como el MAC en sí mismo han sido concebidos para redes de área local, donde el tiempo de

propagación de trama entre transmisor y receptor es poco significativo. De hecho, en los gráficos del estándar (Fig. 3), así como en la investigación disponible (la mayoría de los trabajos se basan en el modelo de Bianchi publicado en el año 2000 [10]) no se toma en cuenta un tiempo de propagación (ver Fig. 4 que sí lo toma en cuenta), se presupone que es en todo caso menor que *aSlotTime*. En este trabajo nos interesa la posibilidad de usar WiFi para distancias de varias decenas de kilómetros, y aproximadamente cada 6 Km (cada 3 Km si es ida y vuelta) se incrementa en un *aSlotTime* el tiempo de propagación, lo cual no es nada despreciable.

EL PCF, como el resto del estándar, hace la presuposición implícita de que el tiempo de transmisión es menor que *aSlotTime*, ya que si eso no se cumple no hay manera de asegurar el funcionamiento del protocolo descrito. El PC espera rigurosamente un tiempo PIFS después de sondear a una estación y, si no obtiene respuesta, sondea a la siguiente o termina el CFP.

Por consiguiente, las respuestas a los CF-Poll tienen que llegar en $PIFS-SIFS = aSlotTime$. Esto quiere decir que PCF no funcionará en absoluto cuando el tiempo de propagación es superior a $aSlotTime/2$ ya que en ese tiempo límite tiene que llegar el sondeo y hacer el camino de regreso la respuesta de la estación, lo cual como ya se ha visto corresponde a una distancia de casi 3 Km.

En cuanto al DCF, veamos qué sucede cuando el tiempo de propagación (TP) no es despreciable. Podemos distinguir dos clases de restricciones de tiempo para que un paquete reciba un ACK. De una parte está la estación transmisora, que según el estándar debe recibir su respuesta en *ACKTimeout*, parámetro para el que no se fija el valor en el estándar. De otra parte, las demás estaciones que comparten el medio esperan un tiempo DIFS después del final de la transmisión y, si no reciben signos de ocupación del medio, inician el proceso de cuenta atrás de la ventana de contención. Lo primero no impone ninguna limitación en particular, simplemente habrá que asegurar que el *ACKTimeout* tiene un valor tal que los ACKs pueden llegar a tiempo para la distancia de que se trate. El límite, de haberlo, lo impondrán por lo tanto las demás estaciones.

Cuando el tiempo de propagación es inferior a *aSlotTime* el protocolo funciona más o menos bien, como se explica en [5]. Aunque con pequeñas anomalías, se cumple el planteamiento general. En caso contrario, a medida que el tiempo de propagación supera la duración de un slot aumenta la probabilidad de que otra estación de por libre el canal cuando aún no lo está y, tras esperar DIFS más su ventana de contención, transmita. En este caso, a medida que aumenta la distancia aumenta también la probabilidad de que, habiendo realizado una transmisión, otra estación logre transmitir antes de que se reciba el ACK. Esto no quiere decir que la red no funcione, pero se observará un nivel de colisiones anormalmente alto que será proporcional al ex-

ceso de distancia por encima de 6 Km, al número de estaciones y la intensidad del tráfico que se esté cursando. Dicho de otra forma, tendremos enlaces cuyas prestaciones decaen sensiblemente a medida que el tráfico se hace más intenso, y muy especialmente en enlaces punto a multipunto.

El modo RTS/CTS tiene su sentido para enlaces punto a multipunto, para evitar que los paquetes que sobrepasen un determinado umbral de tamaño sufran colisiones. No obstante, lo que se gana es que los nodos que no escuchan al transmisor oyen anunciar el tiempo previsto de ocupación del canal al receptor, permitiéndoles fijar su NAV; ese tiempo previsto de ocupación da por hecho que el paquete (o fragmentos) a transmitir estará seguido de un ACK separado SIFS. Esto será verdad sólo para el receptor, ya que el transmisor no recibirá el ACK hasta mucho después (un tiempo adicional igual a 2TP). La solución será por tanto válida para nodos ocultos, pero inválida para nodos visibles cuando el receptor está a más de 6 Km del transmisor, ya que estos podrán acceder al canal pasado el NAV+DIFS y aún así colisionar con el ACK en el aire de la interfaz que debe recibirlo. En enlaces punto a punto no tiene demasiado sentido usar RTS/CTS ya que se pierde más en el doble saludo de lo que se gana al evitar hipotéticas colisiones de paquetes largos.

Queda claro que para enlaces largos nos interesa utilizar DCF, y que RTS/CTS no parece aportar gran cosa. Pese a que muchos trabajos de investigación han desarrollado modelos del MAC de 802.11 para analizar sus prestaciones, la mayoría basados en el modelo de Bianchi [10], todos estos modelos asumen implícitamente que la distancia es pequeña y en consecuencia el tiempo de propagación es despreciable. Aunque alguno de los modelos anteriores y otros que los amplían tienen como variable el tiempo de propagación, los análisis parten de premisas que no son válidas en largas distancias. La experiencia práctica parece indicar que, incluso en enlaces punto a punto, cuando la distancia es muy grande las prestaciones decrecen mucho. Retomando por separado los casos de enlaces punto a punto y enlaces punto a multipunto:

- PtP: Cuando la distancia es mayor de 6 Km, se incrementa proporcionalmente con la distancia, en saltos de 6 Km, el número de slots en que una estación puede empezar a transmitir y colisionar con un paquete cuya transmisión se inició en un slot determinado; esto tiene relativamente poco impacto cuando la carga ofrecida es baja, pero es importante cuando el enlace está próximo a la saturación, ya que en ese caso casi siempre hay un paquete listo para ser transmitido tan pronto como se considere libre el canal, y para ventanas de contención pequeñas la probabilidad de colisión será significativa. También hay que tener en cuenta el tiempo directamente invertido en la propagación.

- PtMP: Además de darse las mismas anomalías de comportamiento del MAC entre la estación transmisora y receptora de un paquete que se han comentado para PtP, las otras estaciones que observan pasivamente el canal esperando que se desocupe tomarán decisiones equivocadas al considerar el canal libre cuando no lo está. Por ejemplo, si la distancia hace que los ACK se reciban más tarde que DIFS, la estación transmisora todavía podrá esperar por el ACK si el ACKTimeout es lo suficientemente grande, pero las otras estaciones cercanas a ésta que esperan a que el canal se libere optarán a ocupar el canal de inmediato, pudiendo colisionar con cierta probabilidad con el ACK que está en camino.

III. PRUEBAS EXPERIMENTALES Y SIMULACIÓN

Las pruebas realizadas en el año 2002 con el primer enlace de larga distancia en funcionamiento aportaron una importante experiencia en el tema, pero sus resultados no pueden recogerse en este estudio porque los equipos utilizados no ofrecieron un comportamiento adecuado para ese tipo de aplicación, requiriendo un esfuerzo permanente de mantenimiento. Los resultados que se presentan aquí, fueron obtenidos en pruebas realizadas posteriormente con los siguientes propósitos:

1. Preparación para la implementación de un enlace de 88 Km entre la Universidad y el Hospital rural de Timbiquí. Las pruebas se llevaron a cabo en el año 2005, utilizando equipos más nuevos y más flexibles, y con mejores prestaciones para dar soporte a enlaces WiFi de largas distancias.
2. Reestablecimiento exitoso del enlace de 36 Km Universidad – Cerro Nueva Guambía, el cual había quedado fuera de servicio luego de varios meses de funcionamiento inestable.

3.1 Análisis de antecedentes

En el enlace Popayán – Cerro Nueva Guambía, ilustrado en la Fig. 2, se sufrió una primera etapa de gran inestabilidad, con prestaciones muy fluctuantes y caídas completas y de larga duración del enlace, para las que no se lograba dar un diagnóstico y mucho menos una solución. Además, en pruebas realizadas en enlaces muy largos (>80 Km) se habían obtenido unas prestaciones muy bajas, con caudales menores de 250 Kbps. Todo ello llevó a elaborar una batería de pruebas en enlaces de distintas distancias, con el objeto de determinar de forma más rigurosa las condiciones en que se podían instalar estos enlaces y qué prestaciones podían esperarse de ellos.

3.2 Elección de herramientas de trabajo

En términos de circuitos, resultaba interesante utilizar tarjetas WiFi con un *chipset* de *Atheros*, los cuales tienen mayor sensibilidad que los demás (-95 dBm, frente a los otros que tienen -85 dBm o más), soportan los estándares 802.11b/g

(que trabajan a la misma frecuencia), y sobre todo permiten ajustar varios parámetros del MAC tales como el *ACKTimeout* e incluso el *SlotTime*. Se escogieron las tarjetas *Proxim Orinoco Gold Card* [11], las cuales además son la nueva generación de las tarjetas que se venían utilizando anteriormente, las *Avaya Orinoco Gold Card*, que utilizan el chip *Hermes*. Otras tarjetas que interesaba probar eran las *Senao SL-2501CD Ext 2* [12], que manejan un alto nivel de potencia (200 mW) por lo que su uso permite prescindir en muchos casos de amplificadores, que representan un sobre costo adicional considerable a la hora de implementar un enlace.

Para la construcción de sistemas de encaminamiento, se propuso emplear las placas madre *Soekris Net4521* [13], con el sistema operativo *Pebble-Linux-EHAS* [14], que aunque no se habían utilizado antes, según sus especificaciones técnicas, parecían tener mejores prestaciones que las ya probadas.

Las pruebas se realizaron con un computador portátil conectado por el puerto *Ethernet* a la placa *Soekris* en un extremo, y dos computadores portátiles en el otro. La placa incorporaba dos tarjetas WiFi, que a veces fueron las *Proxim* y otras veces una *Proxim* y una *Senao*. Los portátiles incorporaban una tarjeta WiFi cada uno, de los mismos modelos mencionados. En ambos extremos se usaron dos antenas de rejilla de 24dBi, con los *pigtails* y cables necesarios, y amplificadores de 1W y 2W bidireccionales marca *Hyperlink* [15].

Tras explorar varias herramientas informáticas de inyección de tráfico y de medición de prestaciones, que están bastante bien clasificadas¹, se optó por emplear las 4 siguientes:

- *TCPSpray*: Permite inyectar paquetes TCP contra el otro extremo de un enlace, tanto unidireccionalmente (al puerto *discard*) como bidireccionalmente (al puerto *echo*), ajustando tamaño y número de paquetes. Esta herramienta permite obtener una idea del caudal del enlace para tráfico eminentemente unidireccional o bidireccional.
- *Bing*: Permite inyectar tráfico heterogéneo ICMP a un enlace que se encuentra más adelante en la cadena de encaminamiento, con el objeto de realizar cálculos a partir de los RTT de los paquetes de diferentes tamaños, para averiguar el caudal y el retardo en ese enlace.
- *Iperf*: Herramienta cliente/servidor que permite inyectar tráfico tanto TCP como UDP, definiendo el tamaño, la tasa de datos, la duración, etc., de forma que en el servidor se puede obtener registros (*logs*) de lo recibido, trazando en particular caudal y *jitter*.

- *Mgen*: herramienta cliente/servidor que permite inyectar tráfico UDP siguiendo patrones muy configurables y usar variables aleatorias para modelar los tiempos de envío de los paquetes.

3.3 Diseño de las pruebas

Una vez claros los objetivos y las herramientas a usar, se diseñaron algunos *scripts* que permiten ejecutar las pruebas lo más automáticamente posible en los lugares de prueba.

- Se diseñaron media docena de pruebas, que se verificaron en laboratorio antes de salir al campo.
- Prueba con *TCPSpray*: se hizo un *script* que realizaba primero una inyección de tráfico TCP unidireccional y luego otra bidireccional.
- Prueba con *Bing*: se ejecutaba manualmente, y una vez estabilizada la medida, se interrumpía la ejecución para obtener el resultado final de caudal y retardo.
- Prueba con *Iperf*: Se escribió un *script* relativamente complejo, que realizaba una batería de cuatro pruebas: tráfico TCP unidireccional, tráfico UDP unidireccional, tráfico UDP bidireccional y tráfico mixto bidireccional.
- Prueba con *Mgen*: Se inyectaba en cada enlace un tráfico a una tasa creciente de forma lineal con el tiempo, para observar cual era la respuesta del enlace a la carga ofrecida. El tráfico se inyectaba según una distribución periódica primero, y luego de *Poisson*.
- Prueba *TCPSpray* en punto a multipunto: Desde una tarjeta WiFi en modo *Master* en un extremo, se hacía una prueba *TCPSpray* simultánea sobre dos portátiles configurados en modo *Managed* en el otro extremo, para evaluar el comportamiento del enlace PtMP.

3.4 Desarrollo de las pruebas

Cada prueba se ejecutó para:

- *Senao* en modo *Ad-Hoc* normal
- *Senao* en modo *pseudo_ibss* (*Ad-Hoc* modificado sin ACKs)
- *Senao* en modo *Infraestructura*
- *Proxim* en modo *Ad-Hoc*
- *Proxim* en modo infraestructura normal
- *Proxim* con *ACKTimeout* y *SlotTime* modificados según la distancia.

El modo *Ad-Hoc* de las *Proxim* resultó no funcionar; luego se ha comprobado que la implementación del controlador para Linux tenía ese defecto, que ya está siendo subsanado en las últimas versiones. El modo *Infraestructura* de las *Senao* mostró un resultado similar al modo *Ad-Hoc* de las mismas hasta distancias medias, pero en las largas distan-

¹ http://www.hn.edu.cn/book/NetWork/NetworkingBookshelf_2ndEd/tshoot/

cias el modo Ad-Hoc mostraba una clara inestabilidad, perdiéndose a veces la asociación y no habiendo más forma de recuperarla que reiniciando las tarjetas.

Las pruebas se hicieron en tres enlaces de diferentes distancias: El primero de 6 Km entre la Universidad y un punto ubicado en las afueras de la ciudad, denominado “El Tablazo”, el segundo de 36 Km entre la Universidad y el Cerro de Nueva Guambía y el tercero de 88 Km entre la Universidad y el municipio de Balboa (Cauca). En cada ocasión el procedimiento fue: montar los equipos, apuntar las antenas con ayuda de un alineador (probando polarización horizontal y vertical), y luego empezar con las pruebas.

Se utilizaron amplificadores de 1W y 2W cuando fue necesario para mantener un enlace de la calidad suficiente, aunque esto no debe considerarse definitivo para esas distancias, ya que hubo bastantes problemas con el material de sujeción de las antenas que dificultó el apuntamiento. En cuanto a la polarización, para no entrar en detalles repetitivos en cada prueba, se probó en todas ellas con antenas polarizadas horizontal y verticalmente, sin que ninguna fuera concluyentemente mejor. Si bien la teoría dice que siempre es mejor la polarización vertical en este tipo de enlaces, no se obtuvo evidencia visible de ello.

- Prueba 1 (Enlace de 3.7 Km, ver Fig. 5): Debido a la corta distancia todas las pruebas se hicieron sin amplificadores, pese a lo que $SNR = 35dB$. Aunque teóricamente las *Senao* y las *Proxim* están igualadas en alcance, ya que las unas ganan en potencia lo que las otras ganan en sensibilidad, el comportamiento de las *Senao* fue mejor en estas condiciones. Las *Proxim*, por defecto, sólo daban 200 Kbps, lo cual es normal porque su *ACKTimeout* por defecto es de 48 μs (insuficiente para 3.7 Km, por lo que cada paquete se retransmite 7 veces, cada vez con una ventana de contención más grande, ya que los ACKs nunca llegan a tiempo). Una vez que se ajustó el *ACKTimeout* a un valor apropiado ($>100 \mu s$), se obtuvo un enlace de unos 5 Mbps según *TCPSpray*, tanto para tráfico direccional como bidireccional; fijando la velocidad del enlace a 2 Mbps se obtuvo un caudal de 1.5Mbps. Con las *Senao*, se obtuvo un enlace estable de 6.4 Mbps según *TCPSpray*, igual para todos los modos de funcionamiento (infraestructura, *IBSS*, *Pseudo-IBSS*). El resultado para tráfico intenso bidireccional fue algo mejor (poco menos de un 10%) para modo *Pseudo-IBSS*. Ambas tarjetas dieron un resultado prácticamente idéntico en las pruebas con *Iperf*: unos 4.5 Mbps unidireccionales (TCP o UDP conformado) y unos 3 Mbps con tráfico bidireccional saturando el enlace. El retardo de los paquetes quedaba entre 2 y 3 ms en todos los casos. En esta ubicación no se hicieron pruebas con *Mgen*, ni punto a multipunto.



Figura 5. Perfil de enlace PtP El Tablazo – Popayán, de 3.7Km

- Prueba 2 (Enlace de 36 Km, ver Fig. 6): El apuntamiento de las antenas resultó complicado, y se tenía un nivel de señal en el equipo de orientación de antenas del 70% por la mañana y de tan sólo el 39% al final de la tarde. En ese momento resultaba difícil decir si se trataba de pérdida de apuntamiento por movimientos de las antenas, o de empeoramiento de las condiciones climatológicas. Se pusieron de partida amplificadores de 1W o 2W en cada extremo para las *Proxim*. Las *Senao* se probaron primero sin amplificadores, y luego con ellos, aunque tenían un comportamiento extraño con los amplificadores, probablemente porque al no saber aún ajustar el nivel de potencia de las *Senao*, éstas en algunos momentos saturaban los amplificadores y se producía distorsión de la señal (los amplificadores están diseñados para trabajar con una señal de entrada de 1 a 100 mW). En las pruebas sin amplificadores se tenía $SNR=16dB$, y con amplificadores $SNR=23dB$. Como se comprobó más tarde en la prueba 3, se habrían obtenido mejores resultados fijando la tasa de transmisión de las tarjetas, es decir, sin permitir que se fije automáticamente. Con *Proxim* y con *ACKTimeout* pequeño se obtuvieron 170 Kbps. Una vez ajustado el *ACKTimeout*, las pruebas *TCPSpray* dieron entre 600 Kbps y 2.5 Mbps, fluctuando por la mala calidad del enlace (debido a las estructuras de soporte). Con las *Senao* (sin amplificadores) se obtuvo un enlace de entre 200 y 280 Kbps con *TCPSpray*. Con *Iperf* las *Proxim* lograron entre 1.8 y 2.2 Mbps, con retardos de 2 - 3 ms, y las *Senao* unos 150 Kbps. Cabe destacar que, a diferencia del enlace de la prueba 1, al saturar el enlace, las prestaciones caen mucho: en las *Senao* la comunicación se interrumpe, y en *Proxim* decrece hasta los 200 Kbps. El comportamiento para *Senao* fue atribuido a problemas de *ACKTimeout*, pero en la prueba 3 se comprobó que esa interpretación era errónea, probablemente el problema era la falta de potencia sin amplificadores o la distorsión con ellos.



Figura 6. Perfil de enlace PtP Silvia – Popayán, de 36Km

- Prueba 3 (Enlace de 88 Km, ver Fig. 7): Antes de realizar esta prueba fue necesario aprender a controlar el nivel de potencia de las *Senao*. A lo largo del día fue posible mantener en todo momento sin problemas dos enlaces simultáneos. Hay que decir que se pasó por momentos de línea de vista despejada y por otros de nubosidad prácticamente total en todo el trayecto, hasta estar dentro de la nube misma. El hecho de no usar los elementos de sujeción de las antenas a las torres, sino colocándolas directamente en un mástil plantado en tierra de apenas 1.5 m, el cual se sostenía firmemente, fue el principal elemento diferenciador respecto de la prueba 2, y en esta ocasión el nivel de señal permaneció estable durante todo el tiempo. Lo primero que se probó, tras alinear las antenas, fue un enlace con dos *Senao*, puestas a máxima potencia (~200 mW) y sin amplificador en ninguno de los dos extremos. El enlace se estableció sin problemas, si bien con poca calidad y muy baja velocidad. Probablemente si en el extremo de la Universidad no hubiera sido necesario un cable coaxial de 30 m (unos 4.8 dB de atenuación) el enlace habría sido bastante estable. Tras ello, se probaron enlaces con amplificadores en ambos lados con *Senao* y con *Proxim*. Usando amplificadores se obtuvo SNR=20dB. Las *Proxim* con *ACKTimeout* corto daban 160 Kbps. Con *ACKTimeout* suficientemente grande, con *TCPsSpray* se obtuvo un enlace de entre 900 Kbps y 1.4 Mbps. Cabe destacar que, cuando el tráfico era igualmente intenso en los dos sentidos, el caudal total disminuía hasta 360 Kbps, pero ello se debió a un problema soslayable: por alguna razón, en uno de los portátiles la instalación del controlador *madwifi* presentaba un problema y no permitía reconfigurar los parámetros de la *Proxim* ampliando el *ACKTimeout*, por lo que sólo uno de los extremos transmitía con buen rendimiento. Las *Senao* tenían un comportamiento bastante distinto con tráfico TCP producido con *TCPsSpray*: no pasando de los 450 – 650 Kbps en unidireccional, daban 450 Kbps (casi el mismo resultado) para un tráfico bidireccional intenso. Cuando finalmente se fijó la velocidad del enlace con *Senao* a 11 Mbps, el rendimiento mejoró, obteniéndose 1.4 Mbps en unidireccional y 350 Kbps en bidireccional. En esta ocasión se pudo probar con *Mgen*, consistente en incrementar gradualmente el tráfico UDP inyectado, y se comprobó que cuando se satura el enlace las prestaciones decrecen y prácticamente se interrumpen las comunicaciones. Con las *Senao*, el modo *pseudo_IBSS* no funcionó, al igual que en la Prueba 2.

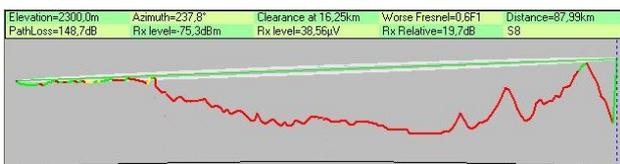


Figura 7. Perfil de enlace PtP Balboa – Popayán, de 88 Km

3.5 Simulaciones con NS-2

Para reinterpretar los resultados de las pruebas realizadas, realizamos unas simulaciones de un enlace punto a punto IEEE 802.11b a 2 Mbps entre dos nodos a distancias entre 100 m y 100 Km.

Lo primero que se constató es que NS-2 [16] tiene algunos errores significativos y carencias en la implementación del MAC y el PHY de 802.11, siendo particularmente relevantes para este trabajo el hecho de que *ACKTimeout* no es configurable y la presuposición de que no hay errores de bit mientras la señal llega por encima del umbral de sensibilidad del receptor. Finalmente empleamos TeNs, una versión mejorada desarrollada por un grupo del Instituto Tecnológico de Kampur en India [17], que corrige las deficiencias anteriores y alguna más.

La forma de la curva (Fig. 8) se altera significativamente según sea el valor del nivel de ruido que tiene configurado el simulador. Para un valor de -95 dBm la simulación coincidía con los resultados obtenidos para velocidad de enlace de 2Mbps en los enlaces con un extremo en la Universidad de Popayán, y para un valor de -100 dBm se obtenía el resultado obtenido en la Prueba 3, en que ambos extremos estaban fuera de la ciudad. La caída brusca corresponde a la distancia a la cual el tiempo de propagación de ida y vuelta supera el valor de *ACKTimeout*.

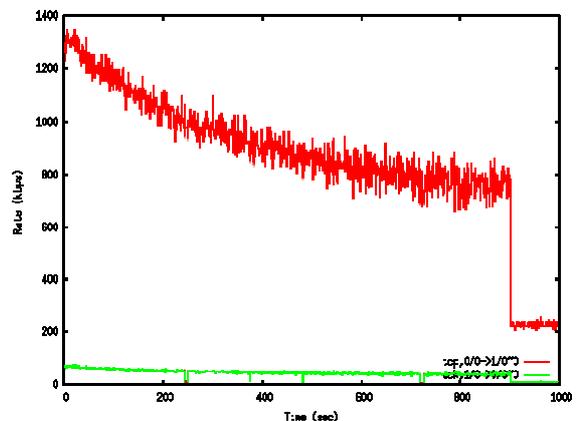


Figura 8. Caudal en enlace PtP cuya distancia aumenta linealmente con el tiempo (100 m/s)

IV. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

- La primera conclusión obtenida fue algo aparentemente trivial: la importancia del apuntamiento y la buena sujeción de las antenas. Es importante conseguir un nivel de señal lo más estable posible para poder sacar lo máximo del enlace y que el enlace perdure en el tiempo y no termine cayendo por efecto de las condiciones climatológicas y el propio peso de las antenas. Se comprobó que las inestabilidades sufridas durante me-

ses en el enlace presentado en la introducción eran atribuibles en gran parte a esta causa.

- Las pruebas han demostrado que tanto las *Senao* como las *Proxim* son aptas para enlaces largos, pero que el comportamiento de las *Proxim* es mejor (más estable, mejores prestaciones) para los enlaces más largos. En ambos casos, el mejor comportamiento se produce cuando, tras obtener el mejor enlace posible en el apuntamiento y fijación de las antenas, se amplifica si es necesario para obtener una relación SNR de al menos 20 dB y se fija el enlace a una velocidad conservadora (orientativamente 11 Mbps para enlaces de pocos kilómetros, 2 Mbps para enlaces de varias decenas de kilómetros). En otros términos, es fundamental mantener en un nivel muy bajo la tasa de error de bit, pues si a las ya muy significativas pérdidas de prestaciones por colisiones, se suma la pérdida de transmisiones exitosas por otras causas, el enlace se vuelve prácticamente inutilizable.
- Se comprobó que el *ACKTimeout* era el obstáculo que había evitado obtener rendimientos superiores a los 250 Kbps en pruebas anteriores, y es superable con tarjetas *Proxim*, u otras que permitan ajustar dicho parámetro.
- Se obtuvo un mal resultado en todos los intentos por usar modo *pseudo_ibss* con *Senao*, y en los de usar *Ad-Hoc* con *Proxim*, para las distancias más largas.
- Se comprueba en distancias de decenas de kilómetros que el mejor comportamiento del enlace se obtiene cuando no se llega a saturar, ya que el enlace saturado da lugar a retardos muy altos y caudales bajos, además de la pérdida de muchos paquetes (descartados por *buffer* llenos en las interfaces inalámbricas). Esto hace muy recomendable el conformado del tráfico IP para impedir que se inyecte en el enlace más tráfico del máximo caudal que se obtiene en condiciones normales.
- Se ha comprobado que en los enlaces muy largos el modo *Ad-Hoc* da más problemas de inestabilidad por particiones de red cuando el nivel de señal no es muy bueno en ambos extremos.
- Se realizaron varias simulaciones con NS-2 y TeNs, siendo válidas para respaldar de forma cualitativa la evolución de prestaciones a medida que aumenta la distancia, pero poco exactas, particularmente en NS-2. Para respaldar resultados futuros de modelos analíticos, o para obtener previsiones de prestaciones en enlaces largos, hay que ser prudentes a la hora de utilizar herramientas de simulación de redes, pues no tienen en cuenta muchos factores que se vuelven muy significativos en estos escenarios.

V. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Se ha propuesto la tecnología IEEE 802.11 para la realización de enlaces de comunicación digital de banda ancha en zonas rurales aisladas. Se ha analizado el MAC de WiFi desde la perspectiva de su uso en estos escenarios, y se han realizado pruebas y simulaciones que ayudan a saber qué prestaciones cabe esperar cuando se usa WiFi en enlaces punto a punto o punto a multipunto de decenas de kilómetros.

Actualmente estamos trabajando en dos líneas de investigación relacionadas con esta comunicación: por una parte, la realización de un modelo del MAC de WiFi válido para largas distancias, y por otra la propuesta de una arquitectura de red *mesh* estática autónoma que facilite el despliegue de redes de voz y datos en zonas rurales. También, y como soporte de lo anterior, estamos trabajando en la evaluación de los diferentes útiles de simulación por su implementación del MAC de WiFi.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el esfuerzo de Edwin Alfaro Campo, Luís Miguel Zambrano y Euler Adrián Trejo, que colaboraron en la realización de las pruebas de campo, y a Guillermo Alberdi por su apoyo con el simulador NS-2.

REFERENCIAS

- [1] A. Martínez, V. Villarroel, J. Seoane, F. del Pozo. *Rural Telemedicine for Primary Healthcare in Developing Countries*. IEEE Technology & Society Magazine, Vol. 23, N° 2. Summer 2004.
- [2] A. Rendón, A. Martínez, M. F. Dulcey, J. Seoane, R. G. Shoemaker, V. Villarroel, D. M. López, J. Simó. *Rural Telemedicine Infrastructure and Services in the Department of Cauca, Colombia*. Telemedicine Journal and e-Health. Vol. 11, N° 4, Pags. 451-459. August 2005.
- [3] A. Martínez, V. Villarroel, J. Seoane, F. del Pozo. *Analysis of information and communication needs in rural primary healthcare in developing countries*. IEEE transactions on Information Technology in Biomedicine, Vol. 9, N°1. March 2005.
- [4] P. Bhagwat et al., *Turning 802.11 Inside-Out*, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 34, N° 1, January 2004.
- [5] K.K. Leung et al., *Outdoor IEEE 802.11 Cellular Networks: MAC Protocol Design and Performance*, Proc. of IEEE ICC 2002, New York, April 2002.
- [6] IEEE 802.11-1999 Standard: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE Computer Society, September 1999.
- [7] IEEE 802.11b-1999 Standard: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)*

- Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band*. IEEE Computer Society, September 1999.
- [8] T.L. Frey, Jr., *The Effects of the Atmosphere and Weather on the Performance of a mm-Wave Communication Link*, Applied Microwave and Wireless Magazine, February, 1999.
- [9] B. Fong et al., *Polarization of Received Signals for Wideband Wireless Communications in a Heavy Rain-fall Region*, Communications Letters IEEE Vol. 7 N° 1, January 2003.
- [10] G. Bianchi, *Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordinated Function*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 18, N° 3, March 2000.
- [11] Proxim: WiFi and Broadband Wireless Networking. <http://www.proxim.com/>. 2006.
- [12] Senao International CO., LTD. <http://www.senao.com/english/co/home.asp>. 2006.
- [13] Soekris Engineering. <http://www.soekris.com/>. 2006.
- [14] Pebble-Linux. <http://www.nycwireless.net/pebble/>. 2006.
- [15] Hyperlink Technologies.: Innovative Solutions For Wireless Com. <http://www.hyperlinktech.com>. 2006.
- [16] The Network Simulator - NS-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. 2006.
- [17] Instituto tecnológico de Kampur - <http://www.cse.iitk.ac.in/~bhaskar/tens/>
- [18] Programa EHAS – <http://www.ehas.org>
- [19] A. Martínez, V. Villarroel, J. Seoane, F. del Pozo, Analysis of information and communication needs in rural primary healthcare in developing countries, *IEEE transactions on Information Technology in Biomedicine*, Vol. 9, N. 1, March 2005.
- [20] A. Martínez, V. Villarroel, J. Seoane, F. del Pozo, Rural Telemedicine for Primary Healthcare in Developing Countries, *IEEE Technology and Society Magazine*, Vol. 23, N. 2, Summer 2004.