

8. Las redes de telecomunicación basadas en WiLD (IEEE 802.11 modificado para largas distancias)

Javier Simó Reigadas¹, Pablo Belzarena García² y Patricia Ludeña González³

8.1. De las comunicaciones de banda estrecha al WiLD (Wi-Fi para Largas Distancias)

Cuando en 1999 se estandarizaron IEEE 802.11a e IEEE 802.11b [123, 124], las primeras versiones de éxito de Wi-Fi, tanto el estándar como la industria y los usuarios en general asumían que se trataba, y siempre se trataría, de una tecnología de redes inalámbricas de área local (WLAN, por *Wireless Local Area Networks*).

No obstante, varios factores hicieron que pocos años más tarde Wi-Fi se empezara a ver como una tecnología con muchas posibilidades para el rango de las redes inalámbricas de área metropolitana y para redes rurales de cierta extensión. Por una parte, el gran éxito de Wi-Fi trajo consigo una gran oferta de productos a precios cada vez más reducidos; y por otra, en EE.UU. y otros países que acogen las reglamentaciones de la FCC (*Federal Communications Commission*), la normativa aplicable a las bandas de frecuencias empleadas por Wi-Fi hacen que esta tecnología sea, desde el punto de vista radioeléctrico, aplicable a largas distancias. Sin embargo, el obstáculo más claro para su aplicación a largas distancias era su protocolo MAC (*Medium Access Control*), el CSMA/CA (*Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance*).

El protocolo CSMA/CA es un protocolo de acceso múltiple por contienda, es decir, permite que varias estaciones compartan el medio de transmisión y se organicen para alternarse en su uso de forma justa y evitando al máximo las colisiones. Esta clase de

¹Universidad Rey Juan Carlos, España

²Universidad de la República, Uruguay

³Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador

protocolo es muy sensible a los tiempos de propagación, que es lo mismo que decir que tiene un comportamiento peor cuanto mayor es la distancia entre las estaciones. Por esta razón, casi todo el mundo asumió desde el principio que Wi-Fi nunca sería otra cosa que una tecnología de WLAN.

No obstante, en esos años había muchos escenarios en miles de regiones del planeta en que Wi-Fi podía ser potencialmente la mejor solución para ciertas carencias de comunicaciones. Por ejemplo, ese fue el caso con los WISP (*Wireless Internet Service Providers*) en países en vías de desarrollo en la primera década del siglo XXI. Multitud de ciudades tenían una demanda alta e insatisfecha de acceso a Internet, pero la red telefónica cableada no alcanzaba a esa demanda o no tenía la calidad suficiente para canalizar el acceso a banda ancha, lo que hizo a algunos proveedores de servicios de Internet ofertar la conexión por Wi-Fi en áreas de cobertura con un radio de varios kilómetros. Otro caso fue el de las zonas aisladas en el mundo rural; en sectores donde no se disponía de ninguna infraestructura terrestre de telecomunicaciones, de pronto tenían con Wi-Fi la posibilidad de contar con enlaces de datos a bajo coste.

Para estos escenarios deficitarios, la tecnología disponible en el momento se reducía a los sistemas de comunicaciones radiofónicas en bandas de VHF/UHF, con canalizaciones de unos cuantos kHz que eran suficientes para la transmisión de voz, pero con muy poca utilidad para transmisión de datos. Ante esto, la posibilidad de usar Wi-Fi multiplicaba de forma impresionante la capacidad de transmisión de datos, reducía el coste, y reducía también el consumo de potencia. La principal desventaja era sólo una: las comunicaciones de voz son, en la mayoría de los casos, el servicio prioritario. Ofrecer comunicaciones sobre una red IP basada en Wi-Fi suponía que la telefonía fuera un servicio más sobre una red de datos, lo que resulta menos estable que una red analógica convencional de voz. No obstante, las ventajas eran muchas y en esta última década se ha dado también el nacimiento y madurez de la voz sobre IP (VoIP).

Ante esta realidad, el propio IEEE, al recopilar todas las versiones y enmiendas del estándar IEEE 802.11 en el año 2007 [125], rebautizó al estándar como de redes inalámbricas locales y metropolitanas. Además, en estos últimos 6 años se han producido experiencias significativas que permiten decir que Wi-Fi adaptado a largas distancias (WiLD) es una opción más que ventajosa para comunicar zonas carentes de otras infraestructuras terrestres de comunicación. En este capítulo vamos a revisar los detalles más relevantes de esta tecnología, así como las consecuencias, ventajas e inconvenientes de su aplicación.

8.2. La familia de estándares IEEE 802.11

Aunque el primer estándar de la familia Wi-Fi nació en 1997, fue en 1999 cuando aparecieron las dos primeras versiones ampliamente producidas por la industria: IEEE 802.11b e IEEE 802.11a [123, 124]. El primero opera en la banda de 2,4 GHz y tiene distintos tipos de capa física, de entre los cuales sólo uno ha triunfado: DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). El segundo opera en las bandas libres de 5 GHz y emplea como capa física OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Mientras que

802.11b se popularizó en todo el mundo muy deprisa porque la banda de 2,4 GHz era no licenciada en todas partes, no sucedió lo mismo con 802.11a, que no fue ampliamente permitido hasta más de 4 años después. Entre tanto, para superar el problema de las bandas de frecuencia y aprovechar en un mismo equipo lo mejor de los dos mundos, en 2003 se estandarizó IEEE 802.11g [126], que incluye compatibilidad con 802.11b pero también una versión de la capa física OFDM de 802.11a trasladada a la banda de 2,4 GHz.

Las bandas de frecuencias a que nos estamos refiriendo son bandas no licenciadas, pero eso no quiere decir que sean bandas libres; los usuarios tienen restricciones en su uso que dependen del país. Es más, en todos los países hay alguna clase de restricción relacionada con el nivel de potencia máximo a que se puede transmitir, y a veces también sobre la ganancia de las antenas. Mientras que en Europa y en Japón las restricciones son tales que apenas se pueden concebir aplicaciones de larga distancia, en Estados Unidos y en otros muchos países que inspiran sus reglamentaciones de radiofrecuencia en las de la FCC se tienen unos márgenes muy amplios de operación. Según la FCC, en la banda de 2,4 GHz se pueden transmitir hasta 30 dBm de potencia con una ganancia de hasta 6 dBi en antenas omnidireccionales; si se necesitan antenas direccionales con más ganancia, por cada 3 dBi extra es preciso reducir en 1 dBm la potencia de transmisión. Con esto se puede llegar, por ejemplo, a los 24 dBm de potencia con una ganancia de 24 dBi, más que suficiente para alcanzar distancias del orden del centenar de kilómetros. En la banda de 5 GHz las restricciones son menores, pudiéndose aumentar la ganancia manteniendo la potencia de transmisión en 30 dBm. En Europa las restricciones impuestas por el ETSI son muchísimo más limitantes, sobre todo en la banda de 2,4 GHz, en la que la potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE, que acumula la potencia transmitida y la ganancia de la antena) no puede sobrepasar los 20 dBm. Por otro lado, desgraciadamente también hay no pocos países con vacíos legales o con reglamentaciones que requieren pago de licencias.

En 2004 ya se podía emplear 802.11a, así como 802.11g, con velocidades nominales de hasta 54 Mbps en muchos países del mundo, lo que permitía escoger entre las dos bandas mencionadas. Sin embargo, seguían encontrándose dos carencias importantes en esta tecnología. La primera, la falta de mecanismos de diferenciación y priorización de tráfico; esto hacía que, en condiciones de saturación, los flujos de tráfico que deberían ser respetados con cierta prioridad (telefonía, videoconferencia, etc.) eran tratados igual que flujos mucho más elásticos y menos prioritarios (navegación web, P2P, etc.). La segunda, que pese a esas velocidades nominales, las velocidades que realmente se obtenían (compartidas para todas las estaciones de una celda) no sobrepasaban los 30 Mbps, cuando ya las redes locales cableadas estaban migrando a Gigabit Ethernet; esto hacía deseable un salto en capacidad en las redes locales inalámbricas de un orden de magnitud. Estas dos carencias se resuelven en los siguientes años: en 2005 aparece 802.11e, que incorpora diferenciación y priorización de tráfico, y en 2010 aparece 802.11n, que obtiene capacidades de hasta 300 Mbps reales en condiciones óptimas.

Entre tanto, como ya se ha dicho, se produce otra mutación de Wi-Fi mucho más discreta: se recalifica como tecnología de redes inalámbricas de banda ancha locales y metropolitanas; es decir, se admite que, con determinados ajustes, esta tecnología puede llenar un hueco en la cobertura del orden de kilómetros.

El planteamiento común a todas las variedades de Wi-Fi es la existencia de dos clases de dispositivos: puntos de acceso (AP) y estaciones (STA). Se definen dos formas en que éstas se interrelacionan entre sí:

- Modo infraestructura: el punto de acceso es el único con el que cualquier estación se puede comunicar, tanto si el destinatario final de la comunicación es otra estación Wi-Fi (esté o no dentro del alcance de la transmisora) como si es un sistema que se encuentra en otra red. El punto de acceso ejerce de estación base en toda su zona de cobertura y también de portal para las comunicaciones hacia el exterior.
- Modo *ad-hoc*: las estaciones se relacionan directamente entre sí, si pueden verse, sin mediación de un punto de acceso.

En los siguientes apartados vamos a comentar primeramente lo esencial del funcionamiento de las distintas versiones clásicas de 802.11, para luego comentar su ajuste a distancias largas. Dejamos para un apartado posterior el comentario sobre 802.11e y 802.11n, por la simple razón de que su adaptación a distancias largas es, a la fecha de publicación de este libro, un tema aún abierto en el ámbito de la investigación y sobre el que aún no se pueden hacer grandes afirmaciones.

8.2.1. IEEE 802.11b

En 11b hay varias capas físicas elegibles distintas y una sólo capa de control de acceso al medio que tiene que funcionar sobre cualquiera de las alternativas de capa física. Por eso, aunque de manera general las capas implementadas en Wi-Fi son dos, la física (PHY) y la de control de acceso al medio (MAC), en realidad la capa física tiene dos subcapas: una específica del medio escogido (PMD, *Physical Medium Dependent*) y otra de convergencia para adaptarla a la capa MAC única (PLCP, *Physical Layer Convergence Protocol*).

8.2.1.1. Los PHY de IEEE 802.11b

Las capas físicas previstas en 802.11b son:

- IR (infrarrojos): Tendría la ventaja teórica de facilitar las redes inalámbricas totalmente confinadas a un espacio físico, pero no prosperó; nunca se ha utilizado.
- FHSS (espectro ensanchado por salto de frecuencia): se basa en ir cambiando de forma síncrona la frecuencia de comunicación tanto en transmisión como en recepción siguiendo un patrón pseudoaleatorio, de manera que aunque la transmisión realmente se produce sobre 1 MHz, se ocupa todo el ancho de la banda. Diferentes estaciones pueden transmitir simultáneamente sin interferirse, siempre que sigan secuencias de salto ortogonales. Esta tecnología es muy interesante para la protección contra el ruido de banda estrecha y para compartir el canal, pero tiene limitado el crecimiento en capacidad por transmisión, por lo que fue usada durante los primeros años y luego abandonada.

- DSSS: realiza un ensanchamiento artificial del espectro que requiere una señal digital, combinándola lógicamente con una secuencia de *chipping* que es conocida tanto por el transmisor como por el receptor y que tiene unas propiedades de autocorrelación que facilitan la recuperación de la señal en recepción aunque llegue muy atenuada. Esta ha sido la técnica de capa física triunfante en 11b, y su implementación fue masiva a partir del 2000.

Para FHSS y DSSS se prevé el uso de la banda no licenciada de 2,4 GHz. En DSSS los canales empleados tienen un ancho de 22 MHz; como los sucesivos canales definidos están centrados en portadoras que distan entre sí tan sólo 5 MHz a partir de 2.412 MHz (canal 1), eso supone que canales consecutivos tienen un fuerte solapamiento y no pueden utilizarse en la proximidad sin interferirse. En realidad, para que dos canales en DSSS no se solapen desde el punto de vista teórico, tienen que tener una distancia relativa de 5 canales, es decir, el primero que no interfiere con el canal 1 es el canal 6, y con éste el canal 11. Mientras que la FCC de los Estados Unidos sólo reconoce 11 canales en esta banda, otros países reconocen 13 y hasta 14 canales. En cualquier caso, no se pueden identificar nunca más de 3 canales sin solapamiento. Sobre esto, sin embargo, es preciso hacer una precisión; las radiotransmisiones tienen dos características que hacen las cosas más complicadas en esto de que los canales no se interfieran: siempre se emite algo de potencia, aunque sea ínfima, fuera del ancho de canal, y la atenuación de la señal con la distancia es enorme. Por ejemplo, la potencia residual de un transmisor en el canal 1 que afecta a un receptor contiguo en el canal 6 puede ser del mismo orden de magnitud o mayor que lo que a ese receptor le llega de un transmisor lejano en el canal 6. Esto siempre debe tenerse en cuenta cuando se planifica una red.

8.2.1.2. La MAC de 802.11b

Sobre cualquiera de estas capas físicas, funciona la misma capa MAC. El acceso al medio en Wi-Fi se produce por contienda, de la manera más cauta posible, para evitar al máximo las colisiones; el mecanismo que logra esto recibe el nombre de CSMA/CA. Sobre este mecanismo (que explicaremos en seguida) el estándar define dos funciones de coordinación distintas, es decir, dos formas diferentes de que las estaciones se organicen para transmitir sin excesivas colisiones: una centralizada (PCF, *Point Coordination Function*), en que cada estación es interpelada secuencialmente por un coordinador y sólo entonces transmite y recibe, y otra distribuida (DCF, *Distributed Coordination Function*), en la que todas las estaciones son iguales en su mecanismo de acceso al canal, incluyendo al punto de acceso. PCF no tuvo éxito y no fue implementada hasta donde estos autores tienen conocimiento, por lo que en adelante toda mención a la MAC de 802.11a/b/g se refiere a DCF.

La operación básica de CSMA/CA se explica a continuación:

- En primer lugar, las estaciones siempre que quieren transmitir algo escuchan primero. Por eso el protocolo MAC se llama CSMA, porque se comprueba antes que nada si hay presencia de una portadora transmitida por otra estación en el canal, para evitar colisionar con transmisiones en curso. Incluso si no se oye

ninguna transmisión, si se tiene constancia de que hay una transmisión en curso, igualmente se considera que el canal está ocupado; esto sucede mediante un mecanismo que se llama detección de portadora virtual, y se materializa en un contador llamado NAV (*Network Allocation Vector*) que se actualiza con la información que se va recibiendo en las cabeceras de las sucesivas tramas sobre la duración prevista de la transacción en curso. De esta forma, incluso si se oye una transmisión pero no la respuesta a la misma, se reconoce la ocupación del canal para ambas. Siempre que el canal esté ocupado, la estación se queda a la espera para transmitir tan pronto se libere.

- Cuando el canal se reconoce libre (no se detecta portadora y el NAV está a cero), se espera un tiempo llamado DIFS (*Distributed Inter-frame Space*) durante el cual el canal tiene que seguir estando libre. Si el canal se ocupa en ese tiempo, la estación se queda a la espera de nuevo. Esto permite que determinadas transacciones puedan ocurrir siempre sin interrupción; es el caso de las confirmaciones de tramas y de la transmisión de los distintos trozos de tramas fragmentadas; el estándar especifica que en esos casos transmisiones y confirmaciones, así como los fragmentos sucesivos, van separados por un tiempo mucho más corto llamado SIFS (*Simple IFS*) de manera que nunca el canal está libre durante un tiempo DIFS si alguna de estas transacciones está en marcha.
- Si el canal quedó libre y lo sigue estando tras un tiempo DIFS, se dan dos posibles situaciones; si el canal estaba libre cuando llegó a la MAC un paquete para ser transmitido, simplemente se transmite; si el canal estaba ocupado y se tuvo que esperar a que se desocupara, se abre una ventana de contienda (*CW*), es decir, un tiempo de duración aleatoria durante el cual la estación en espera hace una cuenta atrás antes de transmitir. Que la duración de la *CW* sea aleatoria es fundamental para que dos o más estaciones que se encontraban a la espera de que el canal se desocupara no intenten transmitir a la vez. La duración de la ventana de contienda es múltiplo de un tiempo definido en el estándar como SlotTime (ranura de tiempo) y que en 802.11b DSSS vale $20 \mu\text{s}$. El número de ranuras que debe esperar una estación tras DIFS para transmitir depende del valor obtenido en una variable aleatoria de distribución uniforme en el intervalo $[0, CW_{min} - 1]$. Obtener un 0 supondría transmitir inmediatamente, mientras que obtener cualquier otro valor indica el número de ranuras que hay que esperar. Mientras el canal siga libre, la estación irá contando ranuras hacia atrás hasta llegar a cero para transmitir, pero si el canal se ocupa en cualquier momento, la cuenta atrás se congela y no se reanuda hasta detectar de nuevo el canal libre durante un tiempo DIFS; cuando esto sucede, la cuenta atrás se reanuda en el mismo número en que se detuvo al detectar el canal ocupado.
- En caso de llegarse a transmitir, hay dos posibilidades; si la transmisión estaba destinada a varias estaciones a la vez (transmisiones *broadcast* o *multicast*), la transacción termina con dicha transmisión, tenga o no éxito. Si por el contrario, se trataba de una transmisión a un único destinatario (*unicast*), entonces la trama tiene que ser confirmada. Para ello, la estación receptora espera un tiempo SIFS (durante el cual comprueba que la trama se recibió bien y conmuta a transmisión) y transmite una trama corta de confirmación llamada ACK. La estación

transmisora espera la recepción de esa trama ACK durante un tiempo máximo llamado ACKTimeout; si el ACK llega, la transacción se da por finalizada, pero si no llega, se programa una retransmisión.

- Si se da la necesidad de retransmitir, todo se hace como en la primera transmisión salvo que el límite superior del intervalo de valores posibles para la ventana de contienda se va duplicando a cada retransmisión. Si para la primera transmisión DSSS estipula que ese valor máximo es $CW_{min} - 1 = 31$, en una retransmisión n -ésima ese valor sería $CW_{min}^n - 1$ hasta llegar a un valor máximo llamado CW_{max} que ya se mantiene en retransmisiones sucesivas; ese valor es por defecto de 1.023 en DSSS. Si el número de retransmisiones llega a un máximo (7 por defecto en DSSS), la trama se descarta y se comienza de nuevo todo con la siguiente trama en espera para ser transmitida.

En la Figura 8.1 se refleja el funcionamiento normal de DCF. Este mecanismo de ventanas de contienda con cuenta atrás cuyo rango de valores va aumentando a medida que se producen colisiones, se denomina comúnmente retroceso binario exponencial o, simplemente, *backoff*. Este sistema logra coordinar el acceso al canal de muchas estaciones sin que la probabilidad de colisión crezca excesivamente, siempre y cuando las estaciones se escuchen entre sí. Si por el contrario, una estación no es capaz de saber que otra está ocupando el canal con una transmisión, la probabilidad de colisión se dispara; para esa eventualidad de existencia de nodos ocultos, el estándar prevé un mecanismo de aviso llamado RTS/CTS (*Ready-to-Send, Clear-to-Send*), que consiste en que la estación que va a transmitir envía primero una trama de control muy corta para avisar de sus intenciones e informar de la duración prevista de la transmisión (incluido todo lo que debe suceder hasta el final de la confirmación), y el receptor responde mediante una trama igualmente corta confirmando que el canal está disponible y replicando igualmente la duración prevista total de ocupación del canal. Esto permite que, en un tiempo muy breve, tanto las estaciones que escuchan al transmisor como las que escuchan al receptor puedan actualizar su NAV y dar el canal por ocupado durante todo el intercambio, independientemente de que sólo oigan a uno de los dos interlocutores. El uso de RTS/CTS es voluntario y se puede incluso establecer un umbral de tamaño de paquete (*RTSThreshold*) por encima del cual activar el mecanismo y por debajo del cual desactivarlo.

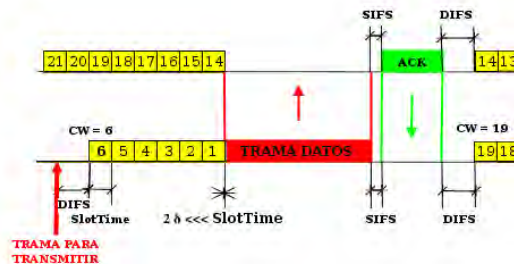


Figura 8.1.: Ejemplo de operación de dos estaciones en DCF.

IEEE 802.11b contempla velocidades nominales de 1, 2, 5,5 y 11 Mbps, pero dado todo este mecanismo de contienda explicado, confirmaciones y retransmisiones, se puede suponer que el caudal (*throughput*) no es tan alto. En realidad ese caudal depende del número de estaciones, pero incluso en las condiciones más favorables no se pueden superar los 7,5 Mbps reales cuando se funciona a 11 Mbps.

8.2.2. IEEE 802.11a

Aunque esta versión del estándar apareció en 1999, y a pesar de que define velocidades 5 veces superiores a las de su hermano 11b, ha tardado mucho en llegarse a su masiva implementación. La razón es que 11a se definió para operar en la banda de 5 GHz, que fuera de los Estados Unidos no era libre de manera general. No ha sido hasta 2004, con la introducción de algunas medidas de ajuste, que se ha podido aplicar en Europa y, por extensión, en una gran parte de los demás países del mundo.

11a no difiere de 11b en la capa MAC más que por el valor de algunos parámetros (tamaño de ranura de $9 \mu\text{s}$, SIFS= $16 \mu\text{s}$, $CW_{min} = 16$); la gran diferencia estriba en la capa física. En cada canal 11a se transmiten no una portadora modulada sino 52 subportadoras equiespaciadas, empleando la técnica denominada OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales). Esta técnica tiene una enorme proyección en radiocomunicaciones digitales de banda ancha por sus propiedades de resistencia al multitrayecto y a la selectividad en frecuencia del canal, capacidad de estimación del canal gracias a las subportadoras piloto, y enorme eficiencia espectral. Donde 11b llega a 11 Mbps, 11a llega, en canal de 20 MHz, a 54 Mbps. Bien es cierto que, por la misma ineficiencia de la capa MAC que se comentaba hace unos párrafos, no se logran en ningún caso velocidades reales de más de 30 Mbps.

Las velocidades nominales definidas en 11a son 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps. Los canales en la banda de 5,6-5,8 GHz, usados habitualmente, están separados 20 MHz, por lo que en este caso son todos no solapados. Hay que comentar que su más reciente implementación, la mayor cantidad de canales no solapados y el menor uso de esta banda, son razones para ver con muy buenos ojos el uso de 11a para desplegar infraestructuras inalámbricas. La única dificultad es, en realidad, la mayor escasez de material y de controladores estables.

8.2.3. IEEE 802.11g

Esta versión del estándar se explica rápido: consistió en tomar todo lo que aportaba 11a (OFDM, las mismas modulaciones, etc.) y portarlo a la banda de 2,4 GHz adicionalmente a todo lo que ya se tenía en 802.11b. Se definieron además otro par de PHY híbridos, pero no tuvieron éxito. Así que, básicamente, 11g = 11a + 11b pero todo en la banda de 2,4 GHz.

11g se diseñó con especial cuidado en la compatibilidad hacia atrás con 11b, para facilitar la transición. Siempre pueden funcionar dispositivos 11g y 11b en la misma red, pero eso supone que entonces quedan deshabilitadas ciertas mejoras de 11g como

son el menor tiempo de ranura o la menor ventana de contienda, que en 11g puro son como en 11a, pero en caso de redes híbridas son como en 11b.

Además, siempre que hay estaciones 11b presentes, las 11g tienen que transmitir los paquetes de *broadcast* y los de control en 11b, y además se recomienda el uso de algún mecanismo de autoprotección para que las estaciones que no entienden OFDM sepan cuándo y cuánto se va a ocupar el canal; para eso puede ser útil el RTS/CTS, o si no hay nodos ocultos simplemente la transmisión de un CTS (técnica denominada CTS-to-self).

8.3. Wi-Fi con soporte de calidad de servicio: IEEE 802.11e

8.3.1. Introducción

Con la creciente demanda por parte de los usuarios de aplicaciones con requerimientos de tiempo real, se planteó un fuerte desafío para las redes 802.11. Por ejemplo, una conversación entre dos personas es altamente sensible al retardo y al *jitter* que sufren los paquetes en la red; y el video en tiempo real es, en general, sensible a las pérdidas de paquetes. Sin embargo, la descarga de archivos o la lectura de correo son mucho menos sensibles a estos parámetros de calidad de servicio. El problema de las redes 802.11 para ofrecer calidad de servicio es que el mecanismo DCF estándar en 802.11 no permite diferenciar ni priorizar el acceso para diferentes clases de tráfico.

En ese contexto, el Grupo de Trabajo IEEE 802.11 desarrolló el estándar IEEE 802.11e [127]. En esta extensión del estándar se distinguen las estaciones con calidad de servicio (QSTA) y las que no tienen calidad de servicio (STA). A su vez se distinguen los puntos de acceso básicos (AP) de aquellos que tienen incorporadas los mecanismos de calidad de servicio (QAP), y se propone una nueva función de coordinación HCF (*Hybrid Coordination Function*) en la cual se definen dos mecanismos para el control de acceso al medio: uno basado en la contienda por el canal, denominado *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA), y otro basado en sondeo, que se denomina *HCF Controlled Channel Access* (HCCA). Estas funciones de control de acceso al medio extienden las originales del estándar IEEE 802.11 DCF y PCF.

Un concepto básico introducido en esta extensión de la norma es el de la oportunidad de transmisión (TXOP), que es un intervalo de tiempo acotado durante el cual la QSTA está habilitada para transmitir una sucesión de tramas. También se definen parámetros del mecanismo EDCA diferentes para cada tipo de tráfico, como se verá más adelante. Otro aspecto interesante es el siguiente: la norma IEEE 802.11 manda al receptor a enviar tramas de reconocimiento para las tramas de datos recibidas correctamente; en 802.11e, en cambio, estas tramas de reconocimiento de la capa MAC son opcionales. Esto significa que además de la política estándar en 802.11 se pueden configurar otras dos políticas de reconocimiento: Block-ACK y No-ACK. Si se configura la política Block-ACK, el generador de tráfico puede enviar varias tramas y luego

solicitar un reconocimiento por el conjunto. El destinatario reconocerá aquellas que llegaron correctamente y el originador reenviará luego las que no fueron reconocidas. Este mecanismo aumenta la eficiencia del uso del medio físico. Si se configura una política No-ACK, la capa MAC no enviará tramas de reconocimiento cuando reciba una trama de datos correctamente. Esto, si bien disminuye la confiabilidad de las transmisiones en capa MAC, se justifica por diferentes motivos; por un lado, para servicios de tiempo real pueden no tener sentido las retransmisiones porque los datos tienen un ciclo de vida muy corto; y por otro lado, las tramas de ACK ocupan el medio físico generando colisiones entre el transmisor y el receptor.

Debido a que los dispositivos que se encuentran en su gran mayoría implementan sólo el mecanismo EDCA, esta sección se centrará principalmente en el análisis de éste.

8.3.2. El mecanismo EDCA

802.11e plantea brindar prioridad en el acceso al medio a las diferentes clases de tráfico, denominadas categorías de acceso (AC). En la especificación se introducen 4 categorías de acceso: Voice, Video, Best Effort y Background. Cada AC tendrá una cola de transmisión, un tiempo de oportunidad de transmisión TXOP, y un conjunto de parámetros del mecanismo DCF propios. La diferenciación se logra variando las siguientes características:

- La cantidad de tiempo que una estación debe sentir el canal libre antes de abrir la ventana de contienda o de comenzar una transmisión. Esto se consigue haciendo variable el tiempo que se denomina AIFS[AC] y que reemplaza al DIFS del estándar clásico.
- El número de ranuras de la ventana de contienda. Se definen para cada clase dos parámetros: el valor mínimo del rango de valores de la ventana de contienda $CW_{min}[AC]$, y el valor máximo de la misma $CW_{max}[AC]$.
- El tiempo durante el cual una estación puede transmitir luego de obtener el acceso al canal. Se logra definiendo para cada clase un valor de TXOP propio.

En ese sentido, cada cola de las cuatro AC funciona como un mecanismo DCF independiente con sus propios parámetros, y compite por el medio. Si hay colisión entre dos AC de una misma QSTA, existe un mecanismo de resolución de colisiones virtuales que le da prioridad a la trama con mayor AC.

Un esquema del mecanismo EDCA se muestra en la Figura 8.2.

Este mecanismo, además de priorizar el tráfico, mejora la eficiencia, ya que el tiempo "perdido" por el mecanismo de *backoff* en este caso es compartido por todas las tramas enviadas en un TXOP.

8.3.3. Control de admisión

Más allá de los mecanismos descritos de priorización en 802.11e, el mecanismo EDCA no soporta requerimientos estrictos de QoS para aplicaciones de tiempo real como voz

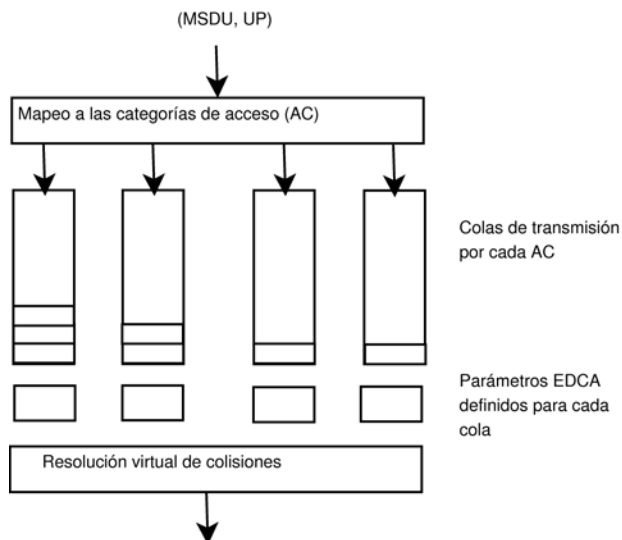


Figura 8.2.: Modelo del mecanismo EDCA.

o video interactivo. Por este motivo, los mecanismos de control de admisión juegan un rol fundamental para poder brindar calidad de servicio en redes 802.11e cuando el volumen de tráfico de la red aumenta. El estándar 802.11e prevé la existencia de mecanismos de control de admisión pero deja a los fabricantes o implementadores la definición de los algoritmos específicos. La función del control de admisión es aceptar o rechazar la conexión de nuevos flujos de acuerdo a los requerimientos de calidad de servicio del nuevo flujo y de los flujos existentes. Para tomar esta decisión, tendrá en cuenta las características del nuevo flujo y la disponibilidad de recursos.

En el estándar 802.11e se establece que cuando un nuevo flujo quiere ingresar a la red, la estación QSTA envíe una trama de requerimiento para agregar un flujo (denominada ADDTS) al QAP, a los efectos de que este último decida si se admite o no. De acuerdo con los algoritmos de control de admisión el QAP decide e informa a la QSTA si admite o rechaza la nueva petición.

Existen diferentes propuestas para implementar mecanismos de control de admisión en 802.11e. Un buen análisis de las principales propuestas se puede encontrar en [128, 129] y las referencias que se encuentran en ellos. Las diferentes propuestas se pueden agrupar en tres clases: las basadas en modelos, las basadas en mediciones y las híbridas. Las basadas en modelos buscan, a partir de la especificación de las características de una nueva conexión (por ejemplo, ancho de banda medio y de pico requerido, tamaño de los MSTU, etc.), estimar mediante un modelo el "tiempo en el aire" que se requiere para garantizarle cierto caudal y retardo. Posteriormente, teniendo en cuenta la utilización del aire actual con los flujos en curso, evalúa si es posible o no cumplir con los requerimientos. Estos métodos tienen como defecto que en algunos casos dan cotas muy pesimistas y en otros hacen simplificaciones que son necesarias para llegar a tener

modelos tratables pero que en la práctica difícilmente se cumplen.

Por otro lado, las propuestas basadas en mediciones tratan de estimar la utilización actual del aire. Se definen para cada clase porcentajes o umbrales de utilización del aire, decidiendo con ellos si se acepta un nuevo flujo o no, de acuerdo al estado actual de la red. Estos modelos son más simples de aplicar pero son difíciles de sintonizar, por ejemplo en cuanto al nivel en el que deben definirse esos umbrales por clase.

Las propuestas híbridas se basan en medir y estimar la utilización o la probabilidad de contención actual en la red. Ante el pedido de una nueva conexión, mediante un modelo analítico deciden para cada clase si los parámetros máximos admisibles (como la tasa de colisiones o la máxima cantidad de retransmisiones) se superan o no. Estas últimas propuestas tratan de mejorar las debilidades de las anteriores pero aún no hay un acuerdo sobre un método que tenga la simplicidad y la precisión suficiente para ser ampliamente utilizado.

A los problemas anteriores se debe sumar que si la red es multisalto, la admisión de un nuevo flujo tiene dos consecuencias adicionales que debe contemplar un mecanismo de control de admisión. Por un lado, el nuevo flujo interferirá y será interferido por otros flujos que no están en su camino pero sí dentro de su zona de interferencia. Esto lleva a que ante una solicitud de acceso de un nuevo flujo se deban controlar dos cosas. Por un lado, que no perjudica la calidad de servicio de los flujos existentes en los nodos por los que pasa. Pero también, que no perjudica a los flujos de otros nodos que están en la zona de interferencia de los nodos del camino. Otro problema en este caso es que el flujo se "autointerfiere". Por lo tanto, el tiempo en el aire de un flujo no es el tiempo de transmitir sus paquetes en un nodo sino que puede ser varias veces mayor si el flujo pasa por varios nodos y todos están dentro de la misma zona de interferencia. Estos últimos dos problemas hacen que el diseño de mecanismos de control de admisión para redes inalámbricas y en particular 802.11e sea un tema muy relevante y aún en desarrollo.

8.3.4. Ajuste de los parámetros EDCA para cada AC

El estándar 802.11e define valores recomendados de los parámetros AIFS, CW_{min} , CW_{max} y TXOP para cada una de las cuatro AC. Sin embargo, el uso de estos parámetros recomendados para cualquier escenario sin tener en cuenta el número de estaciones, las características del tráfico, la topología de la red, etc. conduce a resultados subóptimos [130]. Por este motivo, en los últimos años ha habido múltiples propuestas sobre cómo optimizar estos parámetros. En varias de esas propuestas se tiene como objetivo también mitigar el problema de asimetría que se da en las redes 802.11 debido a que la mayoría del tráfico tiene dirección desde Internet hacia los usuarios. Esto genera que en el QAP en una red WLAN con 802.11e se creen colas mayores que en los QSTA, debido a que todos los nodos de una WLAN ven la misma probabilidad de colisión, y como el QAP tiene más intensidad de tráfico, la cola de tramas en él crece y se tiene un retardo mucho mayor en las tramas que van del QAP al QSTA que en las tramas que van en sentido contrario.

Las propuestas de adaptación de los parámetros EDCA de cada AC y del parámetro TXOP de cada AC se pueden clasificar en tres grandes grupos. En el primer grupo se encuentran las propuestas basadas solamente en reglas heurísticas para ajustar algunos de estos parámetros. En estos trabajos (ver por ejemplo el trabajo de Freitag *et al.* [131]) la idea es que a partir de estimar ciertas características del medio y del tráfico de cada clase (como pueden ser la cantidad de retransmisiones o el tamaño de la cola para cada clase) se ajustan los parámetros de cada AC para mejorar el problema de la asimetría o disminuir la probabilidad de colisiones.

En un segundo grupo se encuentran diferentes trabajos que buscan optimizar los parámetros de EDCA utilizando modelos analíticos (ver por ejemplo el trabajo de Serrano *et al.* [130]). La idea de estos trabajos es construir un modelo para los diferentes objetivos a optimizar (como caudal, retardo, *jitter*, etc.) en función de los parámetros EDCA y TXOP. Luego, sobre estos modelos analíticos plantean algún algoritmo para encontrar o aproximarse al óptimo. Estos trabajos para llegar a modelos tratables utilizan una serie de hipótesis simplificadoras, algunas de las cuales se analizarán más adelante, y en la mayoría de los casos se basan en las mismas ideas del modelo germinal para 802.11 planteado por Bianchi [132].

En un tercer grupo se pueden identificar trabajos con una óptica mixta (ver por ejemplo el trabajo de Liu *et al.* [133]). A diferencia de los trabajos que se basan principalmente en modelos, estos últimos tienen un enfoque donde integran modelos analíticos y heurísticas. En algunos casos también plantean algoritmos conjuntos para control de admisión y ajuste de los parámetros de EDCA.

Las propuestas basadas puramente en heurísticas tienen como debilidad que no se puede asegurar que lleguen a una configuración óptima. Las propuestas basadas en modelos analíticos no presentan esa debilidad pero la mayoría de los trabajos se basan en una serie de hipótesis que en algunos casos se señalan explícitamente y en otros están subyacentes de forma implícita. Algunas de estas hipótesis ya se encontraban en el trabajo germinal de Bianchi ya citado, y otras se han ido agregando en modelos posteriores. Estas hipótesis son analizadas en detalle en el trabajo de Huang *et al.* [134] donde se estudia experimentalmente en qué casos estas hipótesis son razonablemente ciertas y en qué casos no. Estas hipótesis asumen, por ejemplo, que la secuencia de intentos de transmisión son eventos independientes, equidistribuidos e independientes de la historia de colisiones. En otros casos se asume independencia del evento de que el almacén de transmisión está vacío o no, respecto del estado de *backoff*, etc. Como se puede ver en [134], estas hipótesis no son siempre ciertas en cualquier escenario, lo cual plantea serias dudas sobre la aplicabilidad de estos modelos. Por último, hay una hipótesis subyacente en la gran mayoría de los modelos, que explícitamente los autores del trabajo anterior dejan fuera de su estudio pero que para los escenarios que interesan para este libro es importante. Esta hipótesis es que todos los nodos de la red ven la misma ocupación del medio. Esto quiere decir que todos los nodos se ven con todos y que la interferencia vista en todas las zonas de la red es la misma. En el caso de redes en zonas rurales escasamente pobladas, esta hipótesis en general no es cierta ya que al tener enlaces de larga distancia hay nodos que no se ven entre sí. Además, en un enlace de larga distancia, si un extremo está en una pequeña ciudad verá niveles de interferencia diferentes que el otro extremo si éste se encuentra en

una zona prácticamente despoblada. En este sentido, por ejemplo en [135] se estudian mediante simulaciones diversos problemas que aparecen en 802.11e cuando hay nodos ocultos y que no aparecen cuando se asume la hipótesis referida.

Todas las consideraciones anteriores llevan a concluir que tanto el control de admisión como la optimización de parámetros EDCA son problemas aún abiertos, particularmente para entornos rurales. Se deben buscar soluciones que integren la optimización en EDCA con el control de admisión ya que el ajuste de parámetros modifica el estado de la red y eso repercute sobre cuánto tráfico de cada clase es posible admitir. Si se van a utilizar modelos analíticos hay que buscar modelos que permitan prescindir de varias de las hipótesis que no se cumplen en escenarios reales, y a nuestro juicio, el camino más adecuado es utilizar técnicas de medición sobre la red que permitan tener esquemas adaptivos y también ajustar modelos para que se adapten más a las situaciones reales.

8.3.5. Aplicación de las mejoras de EDCA en sistemas reales

Al establecer enlaces con 802.11e es necesario tener en cuenta la clasificación del tráfico, particularmente cuando éste llega al nodo desde capas superiores. En estos casos, lo habitual es que los paquetes IP sean marcados por la aplicación que los genera o que los marque algún clasificador posterior de acuerdo al modelo DiffServ (un valor de 6 bits en el octeto de *Type of Service* de IP denominado DSCP). Posteriormente, en la interfaz de la tarjeta de 802.11e se hace la correspondencia de esos bits a las prioridades definidas en el EDCA de 802.11e. El problema, como señalan Bolla *et al.* [136], es que no hay un acuerdo generalizado sobre esta correspondencia, y diferentes tipos de dispositivos y sistemas operativos deciden una correspondencia particular por defecto. Esto hace que cuando se va a establecer el enlace sea importante leer detalladamente la documentación del equipo, del controlador y del sistema operativo específico.

Un segundo problema es la relación entre la calidad de servicio en capa 3 y en capa 2. Como mencionan varios autores (ver por ejemplo [137]), a los efectos de manejar la calidad de servicio de extremo a extremo la mejor arquitectura implica utilizar calidad de servicio en capa 3 y en capa 2 simultáneamente. Esto conlleva definir colas en capa 3 que se correspondan con las colas que se implementan en capa 2 y manejar la priorización del tráfico en los dos niveles. Es más, esto es un requerimiento en algunos sistemas operativos como Linux, que hasta versiones del núcleo relativamente recientes no estaban preparados para soportar dispositivos con múltiples colas de transmisión/recepción (ver por ejemplo [138]). En las versiones actuales sí se contempla este tipo de dispositivos, pero requiere la configuración de colas en capa 3 en correspondencia con las colas del dispositivo [139].

Resumiendo, el uso de 802.11e habilita a mejorar la calidad de servicio pero es necesario analizar con cuidado diferentes problemas para dar una solución efectiva. En particular, es necesario analizar el algoritmo de control de admisión a utilizar, la optimización de los parámetros de cada clase y la implementación que se requiere en el sistema operativo que se esté utilizando.

8.4. Wi-Fi con diversidad espacial: IEEE 802.11n

8.4.1. Introducción

Los estándares que permiten obtener una comunicación inalámbrica, brindan en la actualidad velocidades de transmisión que llegan a 54 Mbps teóricos (50 al 70 % de esta velocidad es el caudal neto [140]), y por ello se han planteado diferentes estrategias para transmitir mayor cantidad de información en el menor tiempo posible [141, 142].

Así, en septiembre de 2009 el IEEE aprobó el estándar 802.11n [143] que determina la transmisión de datos a velocidades elevadas que pueden llegar hasta los 600 Mbps teóricos y hasta 300 metros de cobertura. En esta extensión se incorpora el concepto de estaciones de alto caudal HT-STA (*High Throughput STAtion*) y se las diferencia de las non-HT-STA, a través del cumplimiento de las siguientes características:

- Para MAC: agregación de tramas, ACK de bloque, operación PSMP (*Power Save Multi-Poll*), protocolo de dirección inversa, reducción de tiempos de espera, y mecanismos de protección para coexistencia con non-HT-STA.
- Para PHY: incorporación de la tecnología MIMO, multiplexación espacial, transmisión *Beamforming*, codificación espacio-temporal por bloques (STBC, *Space-Time Block Coding*) y selección de antenas.

Las características de alto caudal (HT, *High Throughput*) son ampliamente aprovechadas en una estructura punto de acceso-estación (AP-STA), mientras que se ven reducidas en redes *ad-hoc* IBSS (*Independent Basic Service Set*).

8.4.2. Principales mejoras incorporadas en 802.11n 2009

Este apartado se centra en características definidas en 802.11-2007 que han sido modificadas para lograr niveles HT.

La primera modificación sustancial es la **ampliación del ancho de banda** de 20 MHz a 40 MHz. Con esto se consigue incrementar el tráfico cursado, puesto que para lograr este espacio en frecuencia se agrupan dos canales consecutivos de 20 MHz combinados, con bandas de guarda de 1 MHz, lo que permite aprovechar 38 MHz por cada canal, más de dos veces lo obtenido con el esquema anterior; esto implica haber duplicado la capacidad de la información que cursa por un canal.

Por otro lado, la **reducción del intervalo de guarda (GI)** de 800 ns a 400 ns permite reducir el retardo entre envíos del mismo transmisor, previa negociación entre el transmisor y el receptor, y siempre y cuando se tengan condiciones óptimas en el canal de propagación, es decir, que la diferencia de tiempo entre el camino más rápido y el más lento de radiopropagación sea menor que el valor dado.

Otra consideración importante es la **dualidad de canales**, es decir, el trabajo en dos bandas de frecuencias: 2,4 GHz, que emplean 802.11b y 802.11g, y 5 GHz, que usa 802.11a. Esto determina que los equipos 802.11n sean completamente compatibles con las versiones Wi-Fi anteriores. Sin embargo, funciona con sólo un esquema de frecuencia a la vez.

Por condiciones de interoperabilidad, 802.11n cumple con las especificaciones de PHY para sus predecesores. Sin embargo, en este nuevo esquema se considera el **incremento del número de sub-portadoras OFDM**, de 52 a 56 y 114 para 20 MHz y 40 MHz respectivamente, en un esquema HT.

Finalmente, se modifica el concepto de **ACK de bloque** (Block-ACK), el cual aparece en 802.11e para dar acuse de recibo de una serie de tramas. Para 802.11n se añade el criterio de acuses para agregación de tramas, ya sea por petición implícita o explícita y con las mismas políticas en espera y conformación; adicionalmente se sigue considerando la carencia de ACK para comunicaciones sin QoS. El número de tramas en el bloque es limitado y la cantidad de estados que puede mantener el destino es restringida; sin embargo, este esquema puede resultar interesante para aplicaciones de alta velocidad que permiten un nivel de retransmisiones bajo.

8.4.3. Técnicas nuevas incorporadas en 802.11n 2009

8.4.3.1. Espacio Inter-Trama Reducido (RIFS)

Esta característica se incorpora considerando que cuando una estación logra acceder al canal para transmitir sus tramas, no es necesario esperar un tiempo considerablemente mayor para que ésta realice múltiples transmisiones; entonces RIFS (*Reduced InterFrame Space*) puede ser utilizado en lugar de SIFS, con lo cual se reduce el gasto de tiempo innecesario y así se incrementa la eficiencia de la red. RIFS sólo se utiliza para separar tramas con igual dirección de recepción, y sólo en el modo HT; y como en un intercambio normal, su ACK llega con SIFS.

8.4.3.2. Agregación de tramas

Las estaciones compiten por el acceso al medio en cada ventana de contienda; el éxito de tal operación dependerá del número de *backoff* que obtenga cada una de ellas. Esto determina que cada periodo de contienda podría generar un evento de colisión y con ello producir retransmisiones e incremento del tiempo de demora por *backoff*, que se traduce en un bajo caudal de la red. Entonces, cuando una estación tiene acceso al medio, 802.11n arma tramas globales con tramas normales, que es lo que se conoce como agregación de tramas.

La agregación de tramas comprende dos técnicas:

- **A-MSDU (Aggregate MAC Service Data Unit):** Contiene múltiples MSDU (MAC Service Data Unit) de diferentes subtipos, que se tratan como una simple MPDU (MAC Protocol Data Unit), incluso cuando se desea cifrar la información. Esta característica es mandatoria dentro de 802.11n. El tamaño máximo de una MSDU es 2.304 octetos, mientras que para una A-MSDU es 3.839 ó 7.935 octetos dependiendo de las capacidades de la estación. Sin embargo, el tamaño del campo *frame body* puede ser limitado por la longitud máxima del PSDU (Protocolo Service Data Unit) de PHY, o, si la agregación A-MPDU es usada, por la longitud máxima de MPDU de 4.095 octetos incluidos los añadidos para el servicio de QoS (Figura 8.3).

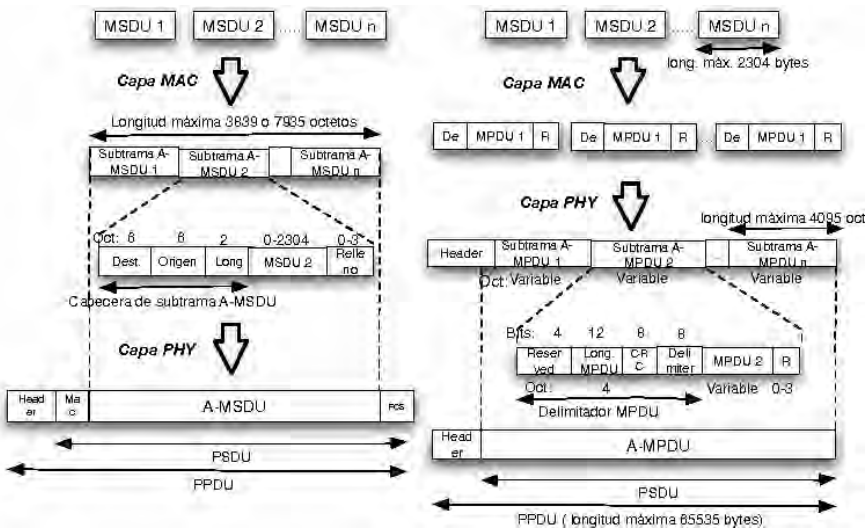


Figura 8.3.: Formato de A-MSDU y A-MPDU.

- **A-MPDU (Aggregate MAC Protocol Data Unit):** Contiene múltiples MPDU transportadas como una simple PSDU por la capa PHY. La máxima longitud de MPDU que puede ser transportada utilizando A-MPDU es 4.095 octetos, así que una A-MSDU que exceda los 4.065 octetos (4.095 menos los datos de QoS) no puede ser transportada en una A-MPDU cuando se utilicen dos niveles de agregación [144] (Figura 8.3).

8.4.3.3. Multiple Input Multiple Output (MIMO)

El medio inalámbrico constituye un canal de comunicación que tiene un comportamiento muy complicado, pues en él se producen fenómenos que afectan directamente a las ondas electromagnéticas, incluyendo reflexión, refracción, dispersión y absorción, y por ello es muy común hablar de multitrayecto. La técnica MIMO utiliza M antenas en transmisión y N en recepción, lo que determina diferentes caminos de propagación,

con el fin de darle un uso constructivo al multitrayecto. Los datos se organizan convenientemente en flujos espaciales (*spatial streams*) que se transmiten por cada antena. Las altas velocidades de transmisión de los sistemas MIMO obedecen a diversos factores que, bien mejoran los esquemas de transmisión, o bien incrementan la fiabilidad del enlace; por ejemplo, la transmisión *Beamforming* incrementa el nivel SNR y con ello aumenta la cobertura, la codificación espacio-temporal por bloques (STBC) evade el efecto negativo del desvanecimiento al enviar flujos repetitivos por varias antenas, y el multiplexado espacial reparte la señal deseada en varios flujos espaciales que serán transmitidos simultáneamente por cada antena ocupando el mismo ancho de banda.

8.4.3.4. Esquema de Modulación y Codificación (MCS)

Se define MCS (*Modulation and Coding Schema*) como el esquema que tienen los equipos para comunicarse en cuanto a modulación, codificación y número de canales espaciales, con el fin de crear diferentes tipos de inmunidad y con la misma tasa de transmisión. Se establecen 127 MCS para el estándar 802.11n, así:

- 0-7 y 32 tienen un solo flujo espacial.
- 8-31 tienen múltiples flujos espaciales y utilizan modulación igual EQM (equal modulation) en todos los flujos.
- 33-76 tienen múltiples flujos espaciales, pero utilizan diferentes modulaciones UEQM (unequal modulation).
- 77-127 están reservados.

Para 802.11n 2009, los MCS del 0-15 (20 MHz de ancho de banda y 800 ns de GI) son mandatorios para los puntos de acceso; en cambio para las estaciones se consideran mandatorios los esquemas 0-7. Todos los demás esquemas 16-76 son opcionales; esto determina que las características de 400 ns en GI y 40 MHz de ancho de banda no serían requisitos para cumplir el estándar, sin embargo en esquemas HT se deben incorporar estas características.

8.4.4. Los supuestos de distancia implícitos en Wi-Fi

8.4.4.1. Límites de la capa física

Las diferentes versiones de Wi-Fi ofrecen todas ellas un rango relativamente grande de velocidades nominales; esto se consigue de alguna forma variando el tipo de modulación y el tipo de codificación de canal. Las velocidades más lentas se consiguen codificando pocos bits por símbolo, lo que hace poco eficiente la comunicación pero, en compensación, aumenta el alcance porque se requiere menos potencia recibida para interpretar correctamente la señal. Por el contrario, las velocidades más altas se logran con modulaciones más potentes y codificaciones menos redundantes, logrando

codificar más bits por símbolo pero requiriendo a cambio mucho mayor nivel de señal en recepción para interpretar correctamente la señal.

Todo sistema Wi-Fi tiene un mecanismo adaptativo (que depende del fabricante) para escoger en cada momento el perfil de transmisión más adecuado.

La cobertura en Wi-Fi es, por lo tanto, una cuestión relativa al perfil de transmisión al que nos refiramos. La cobertura de un punto de acceso a 1 Mbps puede ser grande, a 2 Mbps ya sería menor, y así hasta que a 54 Mbps sería de muy corto alcance. Es importante tener esto en cuenta; a menudo se lee o se oye en foros poco informados que un enlace de tal versión de Wi-Fi puede alcanzar una determinada capacidad, creyéndose que eso mismo se puede tener a largas distancias. Pero no es así. Las condiciones que tienen que cumplirse para obtener las máximas prestaciones se suelen dar en un entorno de decenas de metros del transmisor. A medida que nos apartamos más, es preciso no contar con las modulaciones y las codificaciones más eficientes porque ya no funcionarán, y así hasta llegar al extremo en que sólo funcionen las modulaciones y codificaciones más robustas y lentas.

Teniendo en cuenta lo anterior, podemos distinguir tres casos:

- Cuando queremos un enlace punto a punto, normalmente emplearemos radios con una potencia de transmisión cercana al máximo permitido y antenas de una ganancia relativamente alta. Una ganancia innecesariamente alta no suele ser buena idea porque hace que las antenas sean más difíciles de apuntar y menos estables (los movimientos debidos al viento, a la torsión de las torres, al propio peso, etc. varían sensiblemente la ganancia de la antena en la dirección del enlace). Una ganancia demasiado baja puede limitar en exceso el alcance, o el margen de señal en recepción sobre la sensibilidad. Conviene pues optar por la máxima potencia de transmisión posible y optimizar según esos dos criterios la ganancia de las antenas. En enlaces punto a punto, tanto para 2,4 GHz como para 5 GHz, se pueden alcanzar de forma estable más de 100 Km por lo que respecta al balance de enlace y a la normativa, siempre que se cuente con línea de vista (LOS) óptica garantizada entre ambos extremos.
- Cuando queremos un enlace punto a multipunto, un punto de acceso debe servir a estaciones repartidas por todo o parte de su perímetro, lo que hace necesario el uso de antenas menos directivas. Por cada 6 dBi menos de ganancia (sumando la de las dos antenas involucradas en un enlace) se divide aproximadamente por la mitad el alcance. Típicamente el punto de acceso en esta clase de enlaces lleva una antena omnidireccional, si no es muy crítica su ganancia, o un arreglo de antenas sectoriales, si sí lo es. Podemos contar en este caso con alcances de más de 30 km de radio, siempre que haya línea de vista.
- Cuando queremos una red *mesh* de nodos en que cada nodo puede necesitar enganchar con vecinos en cualquier dirección, entonces las antenas de todos los nodos han de ser omnidireccionales, por lo que el alcance se reduce mucho. En este caso, incluso con línea de vista, los alcances máximos no llegan a 10 km.

En la Figura 8.4 se puede observar, en función de la sensibilidad, el alcance para enlaces punto a punto, punto a multipunto y redes *mesh*. Cuando queremos cubrir una zona

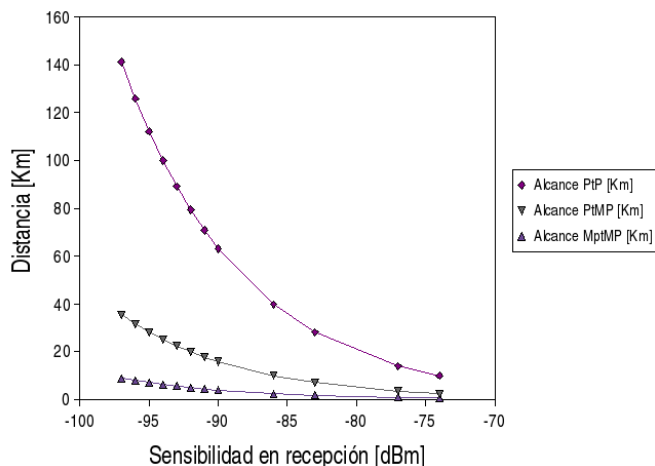


Figura 8.4.: Curvas de alcance de redes en función de la sensibilidad de las distintas modulaciones.

rural con una red Wi-Fi en banda no licenciada, o bien queremos desplegar un enlace punto a punto, primero tratamos de ajustarnos al máximo de potencia permitida en transmisión y estimamos el nivel de señal recibida en una ubicación determinada; eso puede hacerse mediante una aproximación muy burda con el balance de enlace en que las pérdidas de propagación se calculen con un modelo sencillo para terreno irregular, o bien se puede usar un programa como Radio Mobile para obtener una estimación lo mejor posible que tenga en cuenta el perfil particular del terreno y otras características ambientales. Como las señales radioeléctricas sufren desvanecimientos y fluctuaciones por distintas razones, es preciso presuponer que ese nivel de señal recibida puede tener oscilaciones de hasta 15 dBm a la baja. Cualquier sensibilidad de receptor que sea aún inferior que el valor de señal recibida resultante, será teóricamente viable.

Los algoritmos de adaptatividad de los sistemas Wi-Fi suelen ser muy específicos de cada fabricante; el estándar da por hecho su existencia pero no entra en detalles de cómo deben hacerse. La experiencia demuestra que a veces no funcionan bien; si tenemos suficiente señal de forma estable como para alcanzar una velocidad que resulta netamente suficiente para las necesidades de la red, puede ser buena idea desactivar la adaptatividad para evitar que los sistemas escojan erróneamente una velocidad superior pero más inestable que la que necesitamos.

En todo caso, queda claro que se puede enlazar con Wi-Fi a muy largas distancias siempre que:

- Se trabaje al máximo de las potencias y ganancias permitidas.
- Se disponga de línea de vista garantizada entre extremos de la comunicación.
- No se tengan unos requisitos de capacidad muy elevados.

Dependiendo de normativas, puede suceder que se consigan alcances superiores en

5 GHz que en 2,4 GHz. Esto depende casi solamente de la normativa; aunque en la banda de 5 GHz la atenuación de la señal es mayor, la ganancia de las antenas que pueden conseguirse es mayor y ambas diferencias prácticamente se compensan.

8.4.4.2. Límites de la capa MAC

Lo primero que se puede decir, y que ha sido dicho recurrentemente por muchos expertos, es que un protocolo de acceso múltiple por contienda como CSMA/CA es intrínsecamente inapropiado para operar sobre largas distancias. Al producirse muchos intercambios y tener dependencia de la escucha de la portadora para la correcta operación del protocolo, las cosas van peor cuanto más alejadas están las estaciones entre sí. A pesar de esta verdad incontestable, las cosas pueden ser sólo un poco peores con la distancia o mucho peores en función de qué equipo usemos y cómo lo configuremos.

En la capa MAC hay básicamente una cosa que varía con la distancia y que afecta a varios parámetros: el tiempo de propagación. Muchos supuestos del estándar tienen detrás la consideración de que el tiempo de propagación no supera $1 \mu s$, supuesto que lleva implícito un alcance máximo de 300 m. A medida que estiramos la distancia entre estaciones, la violación de esa presuposición empieza a impactar en el funcionamiento.

Las perturbaciones importantes que impone la distancia a las prestaciones por causa de la MAC son:

- El **ACKTimeout**: si no se aumenta su valor proporcionalmente al doble del tiempo de propagación, las transmisiones pueden llegar bien y ser confirmadas pero llega un momento (una distancia) a la que los ACK llegan tarde y para cuando lo hacen la estación transmisora ya ha programado una retransmisión. En estas condiciones, un enlace aparentemente funciona, pero lo hace con una capacidad diezmada porque en realidad cada trama se retransmite un gran número de veces hasta que se descarta en origen, pese a que probablemente el primer intento tuvo éxito. Véase la Figura 8.5.

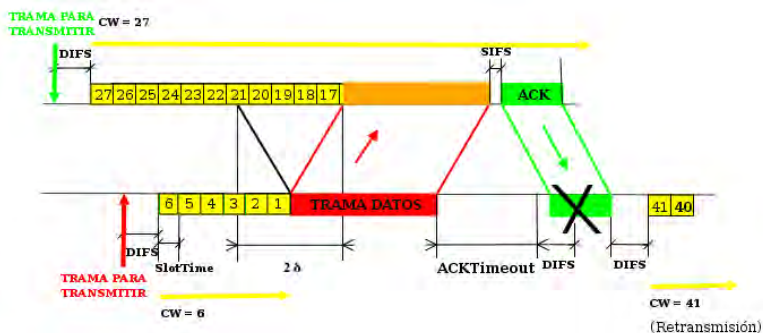


Figura 8.5.: Fenómeno de la caducidad del ACKTimeout por exceso de tiempo de propagación.

- El SlotTime: toda la operación de DCF se basa en la hipótesis de que la portadora física de cualquier transmisión producida por otra estación, de poderse escuchar, se oye en menos tiempo de lo que dura una ranura de la ventana de contienda. Si esa hipótesis no se cumple todo va mal, la probabilidad de colisión crece desmesuradamente y las prestaciones se reducen de forma desmedida con la distancia. En las Figuras 8.6 y 8.7 se aprecia cómo, a medida que la distancia provoca tiempos de propagación mayores que el SlotTime, eso se convierte en un problema.

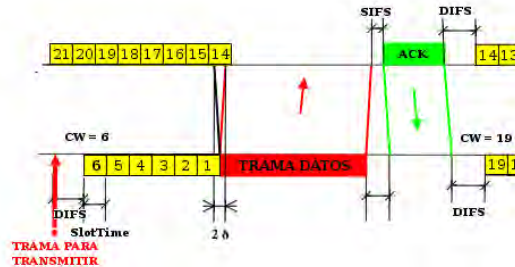


Figura 8.6.: Funcionamiento de DCF cuando las distancias son significativas pero suficientemente cortas.

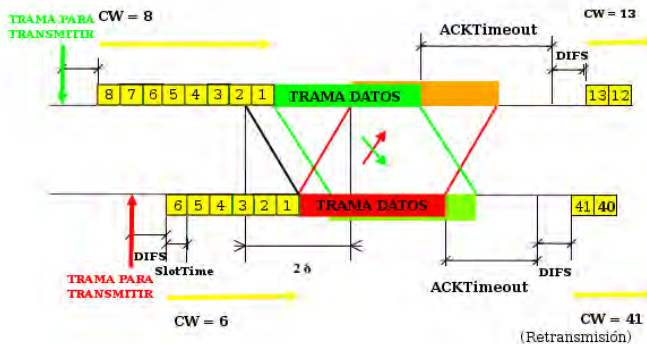


Figura 8.7.: Funcionamiento de DCF cuando las distancias son muy grandes.

- El NAV: como se ha explicado, existe un mecanismo de detección de portadora virtual que permite a las estaciones inhibirse de transmitir aunque físicamente no perciban ocupación de canal si tienen información previa de que el canal ha de estar ocupado, obtenida a partir de las cabeceras de tramas previamente recibidas. Esto es especialmente relevante cuando se opera con el modo RTS/CTS. Sin embargo, los cálculos de duración de transmisiones que maneja este sistema no tienen en cuenta el tiempo de propagación, por lo que falla estrepitosamente en sus predicciones si dichos tiempos se hacen grandes por la distancia.

Por lo anterior, si intentamos emplear Wi-Fi para comunicaciones de larga distancia sin

hacer nada, lo más probable es que no funcione aunque el balance de enlace nos diga que el enlace debería funcionar. En el lugar, que no funcione en absoluto o que lo haga con capacidad marginal depende del equipo. En las primeras versiones del estándar no estaba claro cuánto debía valer el parámetro `ACKTimeout`, y cada fabricante lo interpretaba de una forma. Por ejemplo, un enlace a 2 Mbps con tarjetas basadas en los juegos de circuitos (*chipsets*) Prism 2.5 podía cubrir una distancia de hasta 23 km con resultados regulares, pero a partir de esa distancia se dieztaba la capacidad ya de por sí pobre debido al problema del `ACKTimeout`. Con los juegos de circuitos de Atheros Semiconductors AR5xxx esa caída de las prestaciones se producía a partir de poco menos de 6 km.

Además del problema de que la capacidad se vea drásticamente reducida con la distancia, en enlaces punto a multipunto la distancia al punto de acceso es habitualmente distinta para cada estación, y eso produce por defecto un comportamiento desigual para las distintas estaciones. El resultado suele ser que las distintas estaciones experimentan probabilidades de colisión diferentes y, por lo tanto, prestaciones de la red totalmente distintas.

8.4.5. Adaptación de Wi-Fi a largas distancias

Aunque muchos expertos que valoraron Wi-Fi como tecnología para redes rurales pronto decidieron que los problemas arriba indicados eran insoslayables, lo cierto es que eso no es verdad. El protocolo CSMA/CA es inherentemente malo para distancias largas, pero las enormes ventajas de precio, robustez, sencillez, bajo consumo, etc. que tiene Wi-Fi hacen que merezca la pena pagar un pequeño precio en términos de ineficiencia a largas distancias si pese a todo se tiene un comportamiento estable y unas prestaciones mínimas que nos resulten suficientes.

En los siguientes subapartados se va a explicar cómo se puede ajustar Wi-Fi para sacar lo mejor de ella para distancias largas.

8.4.5.1. Adaptación estándar y sus límites

En 2007, el IEEE puso junto todo lo estandarizado en la familia 802.11 desde 1997 hasta la fecha, pues había mucha dispersión del estándar entre varias enmiendas. Para ello hizo un único documento que pretendidamente no era más que un compendio y reorganización, pero de hecho se aprovechó para arreglar algunas cosas. Por ejemplo, ya se ha dicho que en el estándar original no estaba claro cuánto debía valer el `ACKTimeout`; aquí se aprovecha para esclarecer ese punto.

Pero la mayor novedad fue que Wi-Fi se rebautizó como una tecnología que no sólo era apta para redes inalámbricas de área local, sino que también se proponía para redes inalámbricas de área metropolitana.

Para dar soporte técnico a un uso normal de Wi-Fi con distancias de kilómetros, se introduce el concepto de clase de cobertura (parámetro `CoverageClass`) [127]. Se trata de un valor numérico que se debería poder modificar en todo sistema Wi-Fi compatible

con 802.11-2007 y que influye directamente en la estimación del tiempo de propagación. Esto supone que, para un valor del CoverageClass alto, todos los parámetros de la MAC se reajustan para funcionar coherentemente a una distancia mayor. El límite máximo estipulado permitiría operar correctamente a distancias menores o iguales a 15 km, lo que efectivamente cubre las necesidades de redes metropolitanas y de no pocas celdas en redes rurales.

La modificación de CoverageClass es totalmente estándar, pero tiene la pega de que no todos los productos que hay en el mercado lo implementan. Tampoco soluciona el problema de operación a distancias mayores, pero es, desde luego, la mejor forma de resolver los problemas de distancia cuando se puede utilizar, pues hace un ajuste integral y coherente de todos los mecanismos y parámetros de la MAC.

8.4.5.2. Adaptación para enlaces punto a multipunto WILD

Cuando lo anterior no es posible, a veces sí lo es la modificación de tres parámetros de la MAC solamente: el ACKTimeout, el CTSTimeout y el SlotTime [145]. Muchas veces los productos no permiten modificar estos parámetros (entre otras cosas porque no se supone que sean variables), pero una gran familia de sistemas Wi-Fi basados en los juegos de circuitos AR5xxx de Atheros Semiconductors sí permiten modificarlos. Si además trabajamos en Linux con el controlador MadWiFi o alguno similar (Ath5k o Ath9k), el ajuste de estos parámetros es inmediato. Con ello se logra un comportamiento prácticamente correcto en el enlace.

A la hora de ajustar estos parámetros, los criterios son los siguientes:

- El ACKTimeout y el CTSTimeout deben aumentar su valor en el doble del tiempo de propagación. El tiempo a considerar aquí, en enlaces punto a multipunto, es el de la estación al punto de acceso para las STA, y el del punto de acceso a la estación más lejana para el AP. Estos parámetros se deben ajustar en la instalación y asegurarse de que siempre se mantienen en su valor correcto. En caso de añadir en la celda una nueva estación más lejana que las precedentes, hay que recordar que se tienen que modificar estos parámetros en el punto de acceso además de en la nueva estación.
- El SlotTime tiene que incluir el doble del tiempo de propagación más largo de la celda, además del tiempo suficiente para la conmutación de las radios de transmisión a recepción y para la detección de portadora. Normalmente estos tiempos de reacción física del equipo no son conocidos, por lo que la regla más sencilla es, para distancias superiores al kilómetro, añadir al valor por defecto el doble del tiempo de propagación entre el AP y la estación más lejana. En este caso, todas las estaciones de la celda deben tener la misma duración de ranura, pues esto hace que todas experimenten el mismo derecho para acceder al canal, la misma probabilidad de colisión y, por consiguiente, las mismas prestaciones.

Con estos ajustes, la operación en medias y largas distancias se aproxima sensiblemente a lo que se logra en área local.

8.4.5.3. Adaptación para enlaces punto a punto WiLD

Cuando el enlace de larga distancia es punto a punto, uno de los ajustes anteriormente descritos cambia; se trata de la ranura de tiempo (SlotTime). Al haber sólo dos estaciones que compiten por el canal y cuyas transmisiones y recepciones tienen una alta correlación, se puede reducir sensiblemente con respecto del valor propuesto en el apartado anterior. Aunque el óptimo no sigue una relación lineal con la distancia, puede aproximarse burdamente proponiendo que el tamaño de ranura se incremente en una vez el tiempo de propagación.

El controlador MadWiFi para Linux, del que ya se ha hablado anteriormente, incorpora una herramienta de usuario llamada `athctrl` que justamente permite adecuar en función de la distancia tanto `ACKTimeout` y `CTSTimeout` como el `SlotTime` para enlaces punto a punto de larga distancia.

Muchas redes rurales reales ya desplegadas en los últimos años se basan en un planteamiento como el reflejado en la Figura 8.8, donde unos sistemas se comunican por enlaces punto a punto y otros por punto a multipunto, formando redes multisalto en las que cada nodo frecuentemente tiene dos o más radios Wi-Fi.

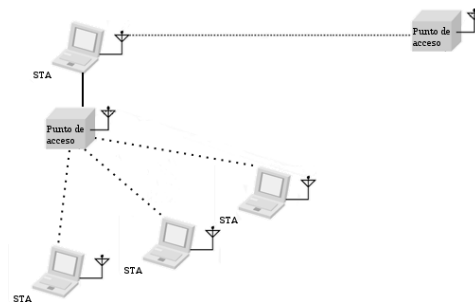


Figura 8.8.: Cómo operan los enrutadores con múltiples interfaces en redes reales.

8.4.6. 802.11e para largas distancias: ¿WiLD-EDCA?

Como se señala en el trabajo de Simo *et al.* [145] los problemas principales para enlaces de larga distancia con 802.11e son los mismos que en el caso 802.11. Estos problemas tienen como causa principal los retardos de propagación importantes en los enlaces de larga distancia. Todos los problemas de adaptación a la distancia planteados anteriormente para DCF se encuentran exactamente igual para EDCA, que es el mecanismo de contienda con diferenciación de prioridades que propone 802.11e. Lo primero que se requiere entonces para poder usar EDCA en distancias largas es realizar los ajustes básicos ya propuestos.

El problema que queda por abordar es, entonces, qué ajustes adicionales se requieren para que los mecanismos de priorización diferencial de tráfico que aporta EDCA

funcionen como se espera a distancias largas. Por una parte están los parámetros específicos de las distintas AC, y en cuyo efecto sobre las prestaciones la distancia puede influir; por otra parte, 802.11e puede operar en modo Block-ACK o No-ACK. Estos mecanismos permitirían mejorar la eficiencia y también cabe preguntarse cómo afecta la distancia a su efecto sobre las prestaciones.

8.4.7. 802.11n para largas distancias: ¿WiLD-2?

Si bien el estándar no está concebido para operar en largas distancias, con adaptaciones a nivel de controladores y equipos podría ser factible. Esto abre un nicho de investigación que puede proporcionar a comunidades aisladas una oportunidad para acceder a información a bajo costo.

El primer enfoque es la reducción de la sobrecarga creada por cabeceras, preámbulos y ACK, conseguida a través de agregación de tramas [146, 147, 148]; esto se ha comprobado para esquemas que siguen el 802.11a [149], luego es necesario definir los parámetros óptimos para el tamaño de tramas y número de tramas agregadas [150], porque cuando se reduce la longitud de tramas se obtiene menor caudal [151], y por otro lado este tamaño depende de las condiciones BER del canal que son definidas por el MCS utilizado [152]; en cuanto al número de tramas, es mucho más conveniente acercarse a la zona de saturación [153]. Aunque se ha comprobado que con esta técnica se puede conseguir un 95 % de utilización del canal [154], también se ha experimentado con el uso de dos niveles de agregación, A-MSDU y A-MPDU [144], con excelentes resultados para interiores; sin embargo, para exteriores en entornos urbanos los niveles de ruido pueden determinar retransmisiones de largas tramas teniendo un efecto contraproducente.

El segundo punto de interés se genera en la inmunidad que el estándar debe presentar ante las condiciones del canal. El TGn (*IEEE 802.11 Task Group N*) definió 6 modelos de canal (A-F) [155, 156] para condiciones de interiores y exteriores hasta 300 metros; para las aplicaciones de interés de este libro es necesario considerar la variabilidad topográfica que se encuentra en zonas rurales y de largas distancias, la cual determina el grado de multitrayecto presente. En este sentido se pueden identificar tres tipos de escenarios: condiciones LOS, multitrayecto con un rayo dominante, y multitrayecto plano [157].

La técnica MIMO tendría especial interés en el segundo escenario por cuanto se podrían tener efectos constructivos por la energía desplegada en los rayos indirectos [158]. Para evaluarlo se considerarían dos factores principales: el desfase temporal entre rayos que permite aprovechar la reducción del intervalo de guarda, y por otro lado, la relación de energía entre el rayo directo y los rayos reflejados traducida en el valor BER para la señal recibida, pues como se señala en [159] estos niveles determinan la eficiencia en la utilización de MIMO.

8.5. Soluciones no estándar basadas en Wi-Fi

Como se dijo al principio de este capítulo, desde el principio muchos expertos juzgaron que la inherente falta de adecuación de CSMA/CA a las distancias largas hacía inútil invertir esfuerzos en ajustar sus parámetros. Tanto investigadores y desarrolladores del mundo académico como empresas fabricantes de productos de comunicaciones inalámbricas de banda ancha orientaron mayoritariamente su trabajo al estudio y desarrollo de alternativas no basadas en el acceso múltiple por contienda.

Muchos fabricantes de equipos Wi-Fi de exteriores han abierto líneas de producto que tienen circuitos Wi-Fi pero que opcionalmente pueden reemplazar la capa MAC estándar por una MAC TDMA libre de colisiones. Los primeros esfuerzos en este sentido fueron productos comerciales como el Turbocell de Karlnet o el WOPR de Proxim. Pero los productos comerciales que más éxito han tenido fueron llegando después tras la aparición de los primeros juegos de circuitos de última generación de Atheros. Hay productos como la gama Tsunami de Proxim o la gama BreezeAccess de Alvarion que van en este sentido pero que resultan relativamente caros y, a juicio de los autores, pierden su sentido ahora que WiMAX ha ido llegando más masivamente a los usuarios a precios más bajos.

No obstante, existen dos gamas de productos comerciales que ofrecen soluciones interesantes de esta clase a precios más interesantes aún, y están siendo muy empleadas en todo el mundo. La primera cronológicamente fue Mikrotik⁴, una empresa letona que produce enrutadores y estaciones Wi-Fi para exteriores y que desarrolló un protocolo llamado nstreme que, al activarse, reemplaza a CSMA/CA y gestiona el acceso múltiple mediante una estrategia TDMA. El otro caso es el de Ubiquiti⁵, empresa conocida como fabricante de equipos Wi-Fi de exteriores que recientemente sacó una gama de productos con su solución AirMAX, de características similares. Ubiquiti es además imbatible en precios.

Cualquiera de estos sistemas se comprueba que opera con mejores prestaciones que Wi-Fi estándar y es más inmune a la distancia, posibilitando enlaces muy largos con capacidades mucho mayores que las de Wi-Fi estándar optimizado. No obstante, en cada caso se debe pensar si es preferible más capacidad a costa de una solución no estándar o no.

Antes de finalizar esta sección, hay que mencionar también los esfuerzos del grupo de los profesores Raman y Chebrolu del *Indian Institute of Technology*, y los del grupo TIER de la Universidad de Berkeley dirigido por el Prof. Eric Brewer, por desarrollar capas MAC alternativas para funcionar sobre dispositivos Wi-Fi en redes WiLD pero libres de colisiones. Varias investigaciones y desarrollos de estos grupos han culminado en versiones implementadas de protocolos TDMA sobre dispositivos Wi-Fi, primero sólo para enlaces punto a punto, luego para punto a multipunto y, finalmente, con soporte para tráficos diferenciados. No obstante, en el momento de publicar este libro no se tiene evidencia de que ninguno de estos productos tengan el nivel de estabilidad y mantenimiento mínimos para hacerlos usables.

⁴<http://www.mikrotik.com>

⁵<http://ubnt.com/>

8.6. Ejemplos de redes WiLD para la mejora de la salud en zonas rurales de países en desarrollo

Entre los años 2001 y 2005 fue común el despliegue de redes exteriores con Wi-Fi en muchas partes del mundo para la provisión de servicios de Internet por medio inalámbrico, redes de campus, y otras aplicaciones que requerían redes con alcance medio, de hasta unos pocos kilómetros. La experiencia más pionera de que tenemos conocimiento, durante ese lustro, de red Wi-Fi de larga distancia, fue desplegada bajo la dirección del Prof. Ermanno Pietrosémoli y operada por Fundacite-Mérida en Venezuela⁶. Otra red pionera fue la desplegada en la India por el proyecto *Digital Gangetic Plains*, liderado por el Prof. Bhaskaran Raman del *Indian Institute of Technology*.

Pero fue a partir de 2005 que se empezaron a dar despliegues más extensos y permanentes de redes WiLD. Vamos a poner dos ejemplos que fueron desplegados por algunos de los autores de este libro y sus colaboradores, pues pensamos que pueden ilustrar dos tipologías de red que resultan representativas.

8.6.1. Red CuzcoSur

La red WiLD CuzcoSur nació para cubrir las necesidades de conectividad entre establecimientos rurales de salud en las comarcas rurales que quedan al sur de la ciudad de Cuzco, en la región andina del Perú. En esta zona los pueblos están conectados por carreteras sinuosas típicas de la sierra, y cubrir las distancias que en línea recta apenas superan los 130 km lleva, por tierra, muchas horas. Con el objetivo de interconectar los puestos de salud rurales con el hospital de Cuzco y con la Dirección Regional de Salud, se buscó la forma de enlazar todos estos centros con WiLD. Al tratarse de una zona de sierra, pronto se vio claro que resultaba ideal aprovechar algunos cerros para establecer enlaces punto a punto en cascada desde el Cuzco, pues entre cerros era fácil tender enlaces con línea de vista, y desde las cumbres enlazar con los pueblos que quedaban en los valles mediante enlaces punto a multipunto.

Esta red fue primeramente desplegada por el Grupo de Telecomunicaciones Rurales (GTR) de la Pontificia Universidad Católica del Perú, en colaboración con la Fundación EHAS, y posteriormente fue repotenciada y extendida por el GTR en cooperación con la ONGD española Ingeniería Sin Fronteras - ApD (hoy, ONGAWA, Ingeniería para el Desarrollo Humano).

La red desplegada siguió el esquema de la Figura 8.9. En los cerros, placas empotradas con dos interfaces inalámbricas Wi-Fi servían para enlazar, en canales no solapados,

⁶El Profesor Pietrosémoli, actualmente profesor emérito de la Universidad de Los Andes en Mérida, Venezuela, y presidente de la Fundación Escuela Latinoamericana de Redes, ha seguido interesado en las comunicaciones Wi-Fi de larga distancia y lideró el equipo que obtuvo en 2008 el récord de mayor distancia alcanzada con un enlace Wi-Fi experimental, con 382 km. Junto con Carlo Fonda y Marco Zennaro, del *International Centre for Theoretical Physics* de Trieste, Italia, ha llevado a cabo éste y otros experimentos, y también ha desplegado otras redes estables con WiLD como el caso de una red de telemedicina en Malawi.

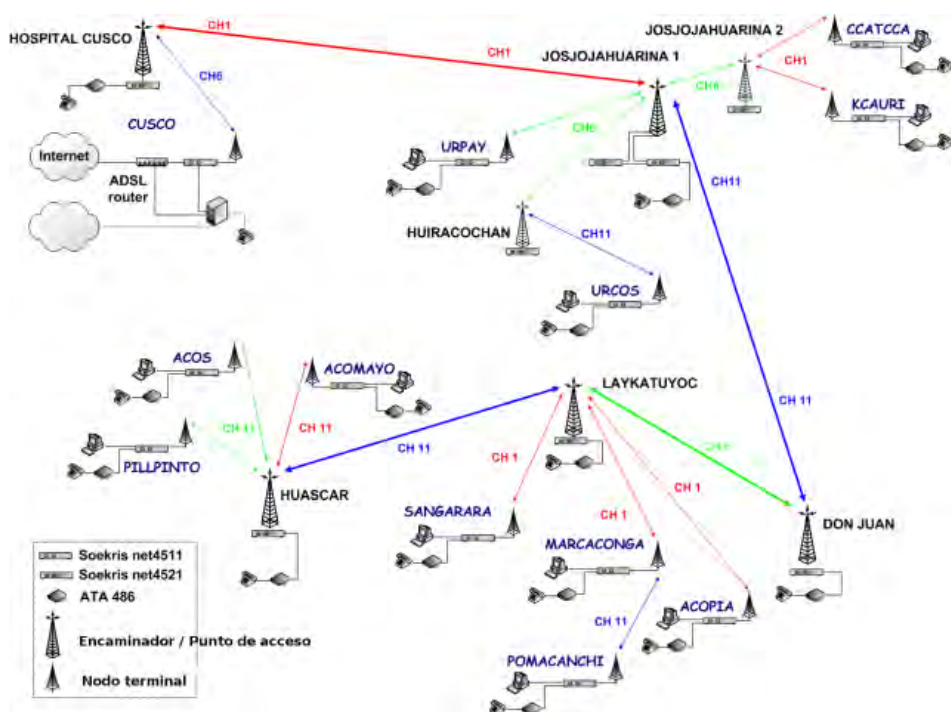


Figura 8.9.: Esquema de la red CuzcoSur.

con los cerros anterior y siguiente, y el mismo sistema se empleaba para enlazar con los establecimientos de salud en los valles próximos. Los sistemas de comunicaciones se ubicaban en casetas anexas a las torres que soportaban antenas y paneles solares. Los enrutadores inalámbricos eran placas x86 Soekris que operaban con sistema operativo GNU/Linux y llevaban adicionalmente instalado el programa de telefonía IP Asterisk para hacer posibles las comunicaciones telefónicas locales y con el exterior.

En la segunda fase, la infraestructura fue reforzada con enlaces redundantes con sistemas Mikrotik. La red entonces fue explotada no sólo para dar conexión a establecimientos de salud, sino también para otros usos paralelos como el e-gobierno.

Esta red fue diseñada y desplegada en 2005, e inaugurada a principios de 2006.

8.6.2. Red del río Napo

En 2006-2007 fue diseñada y desplegada esta red en zona de selva amazónica, y fue completada en su diseño actual en una segunda fase que tuvo lugar dos años después. Esta red interconecta establecimientos de salud a lo largo del río Napo, desde la ciudad amazónica de Iquitos, en Perú, hacia el Norte hasta la frontera con Ecuador.

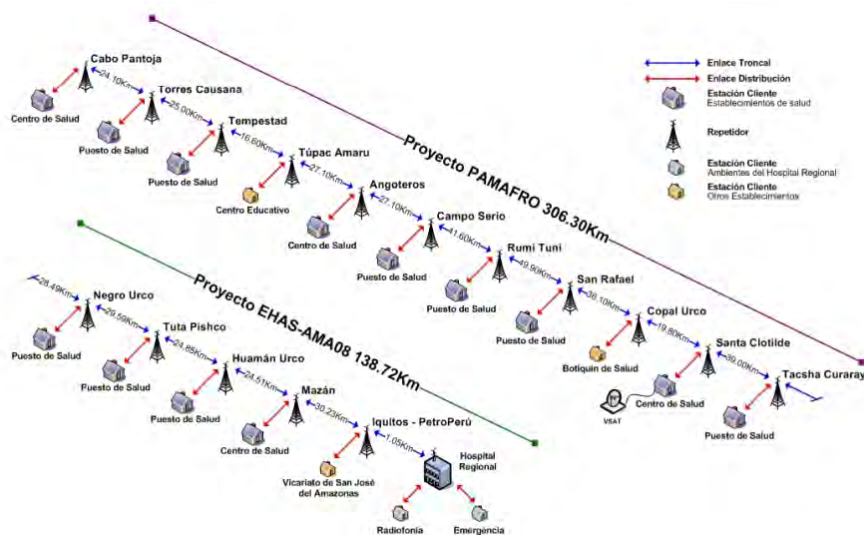


Figura 8.10.: Esquema de la red Napo.

En saltos de entre 20 y 60 km, la red recorre una línea de cerca de 500 km que une 18 establecimientos de salud. El esquema de la red puede verse en la Figura 8.10.

Al tratarse de un terreno casi totalmente plano, cubierto de una capa arbórea bastante alta, todas las antenas necesitan estar elevadas a más de 40 m del suelo para alcanzar la línea de vista, y para los enlaces más largos esa elevación llega a ser de más de 90 m. Por esa razón, la comunicación entre el sistema inalámbrico de la torre y el establecimiento de salud al nivel del suelo se hace también de forma inalámbrica. El sistema elevado en la torre es alimentado por un sistema solar fotovoltaico instalado también en altura en su totalidad, de forma que ningún cableado de comunicaciones o de alimentación eléctrica desciende desde lo alto de la torre.

Los enlaces en este caso están hechos con placas embebidas de tipo ALIX, dotadas de interfaces Wi-Fi 802.11g a 6 Mbps, en la banda de 2,4 GHz, salvo los dos tramos más próximos a la ciudad, que por causa de las interferencias se han hecho con equipos Mikrotik que operan en la banda de 5,8 GHz.