

# White Paper

802.16 vs WiFi en enlaces PtP en banda libre

Rev. A5, Octubre 2013

*Este documento presenta un análisis detallado de las tecnologías IEEE 802.11 (WiFi) e IEEE 802.16-2012 para su aplicación en radioenlaces punto-punto en la banda libre de 5 GHz, comparando los aspectos técnicos de cada estándar y resaltando las ventajas e inconvenientes de cada solución.*

## Introducción

Hoy en día cada vez es más común el uso de estas nuevas tecnologías inalámbricas en radioenlaces punto-punto (PtP), debido entre otras cosas a su bajo coste y probada versatilidad. Sin embargo, ninguna de las dos fue inicialmente diseñada para aplicaciones PtP. *WiFi* se concibió como solución de red local punto-multipunto (PtMP) inalámbrica en entornos interiores, y *802.16* nació como tecnología también PtMP orientada al acceso en banda ancha de “última milla”.

Aparentemente un enlace PtP no es más que un caso particular de los escenarios PtMP. Sin embargo, dadas las grandes distancias que se intentan cubrir empleando antenas de elevada ganancia, algunos parámetros que pasan inicialmente desapercibidos cobran en este caso especial relevancia, poniendo en relieve el potencial real de la tecnología empleada.

La principal conclusión de este documento es la notable superioridad de la tecnología *802.16* para enlaces PtP frente a la tecnología *WiFi*, especialmente debido a la elevada eficiencia de las capas físicas y de control de acceso al medio. Este documento analiza las principales diferencias entre ambas tecnologías y da respuesta a preguntas como las siguientes:

- a) ¿Por qué un radioenlace PtP *802.16* proporciona una mayor capacidad neta que en el caso de *802.11* ocupando menos ancho de banda? (en las mismas condiciones de potencia, frecuencia, distancia y antena).
- b) ¿Por qué es posible emplear antenas de menor tamaño, con un importante ahorro económico, al emplear equipamiento *802.16* en comparación con las antenas que necesita *802.11*? (para un mismo enlace, con la misma potencia y capacidad neta).
- c) ¿Por qué los equipos *802.16* permiten mayores distancias de enlace si emplean la misma potencia y antena que los equipos *WiFi*?
- d) ¿Por qué la distancia del enlace disminuye notablemente la capacidad neta proporcionada al emplear equipos *802.11* mientras que no afecta en el caso de equipamiento *802.16*? (al margen de aspectos relacionados con el balance energético del enlace).
- e) ¿Por qué la mayoría de los fabricantes de equipos *802.11* se limitan a garantizar una capacidad a nivel físico que queda muy lejos de la capacidad efectiva? ¿Por qué no garantizan capacidades netas? ¿Por qué los equipos *802.16* sí pueden garantizar una determinada capacidad neta?

## Organización del documento

El documento analiza en primer lugar las capas físicas de cada estándar, mostrando la mayor capacidad bruta de la tecnología *WiFi* frente a *802.16*, y cómo esa ventaja inicial se reduce al trabajar en entornos exteriores, donde la tecnología *802.16* es más eficiente.

En segundo lugar se analiza la capa de control de acceso al medio, la principal ventaja tecnológica de *802.16*. Tal y como se explicará, el tiempo de uso efectivo del espectro es muy superior en *802.16* que en *WiFi*, lo que se traduce en un mejor aprovechamiento de la capacidad del enlace y en una mayor capacidad neta real. La segunda sección también analiza los mecanismos de acceso al medio, estadísticos en el caso de *WiFi* y deterministas en el caso de *802.16*, mecanismos que afectan a la posibilidad de garantizar una determinada capacidad neta en el enlace. Por último se analizan aspectos más sutiles como el impacto de la distancia del enlace en la capacidad neta de los enlaces debido al retardo de propagación de las ondas radioeléctricas, impacto especialmente relevante en equipamiento *WiFi*.

La tercera sección analiza las capacidades de ambas tecnologías a la hora de proporcionar calidad de servicio para aplicaciones sensibles como voz o vídeo. Ambas tecnologías permiten priorizar servicios, pero sólo *802.16* permite asignar los recursos del nivel físico acordes con dichas prioridades.

Finalmente, se concluirá resumiendo las principales ventajas de la tecnología *802.16* frente a *WiFi* para radioenlaces PtP en la banda libre de 5 GHz, lo que permite obtener mejores prestaciones con un notable abaratamiento del coste de infraestructura.

## VENTAJAS DE 802.16

- Modulación OFDM para operar en escenarios exteriores.
- Alta eficiencia espectral (3.5 bps/Hz netos) y por tanto mayor capacidad neta del enlace.
- Mecanismos de QoS hasta nivel 2 que permiten la asignación de recursos y la diferenciación de servicios.
- Ahorro en antenas y mayores distancias.
- Control de acceso al medio determinista y sin contienda.

## CAPA FÍSICA

### Modulación WiFi

La capa física 802.11 emplea modulación OFDM con 64 subportadoras, de las que sólo se emplean 52 (48 para datos y 4 pilotos). La separación entre subportadoras es de 312,5kHz. La señal ocupa un ancho de banda total de 16,25 MHz.

802.11 emplea corrección de errores basado en códigos concatenados Reed-Solomon y Convolutacional.

Las subportadoras se modulan de forma adaptativa con modulación BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM.

### Propagación multi-trayecto

La longitud de símbolo es de 3,2 microsegundos, a los que se añade un prefijo cíclico fijo de 800 nanosegundos para mitigar los ecos causados por la propagación multi-trayecto.

802.11 soporta una dispersión por multi-trayecto de hasta aproximadamente 400 nanosegundos, por lo que permite tolerar diferencias de recorrido entre rayos reflejados de hasta 120 metros, suficiente para propagación en entornos de interior.

La modulación emplea 4 portadoras piloto distribuidas en los 16,25 MHz de ancho de banda. Estos pilotos son suficientes para compensar los desvanecimientos selectivos y coherencia espectral típica de propagación en interior.

### Capacidad del nivel físico

La capacidad de un símbolo OFDM modulado en 64QAM-3/4 es de 216 bits (48 portadoras de datos con 4,5 bits por portadora). Dado que la duración de un símbolo completo es de 4 microsegundos, la capacidad bruta máxima del nivel físico 802.11 es de **54 Mbps**, que decrece rápidamente al aparecer colisiones.

### Eficiencia espectral bruta a nivel físico

Dada la capacidad bruta máxima a nivel físico de 54 Mbps, y el ancho de banda ocupado por la señal de 16,25 MHz, la eficiencia espectral máxima a nivel físico es de **3,3 bps/Hz** en el mejor de los casos.

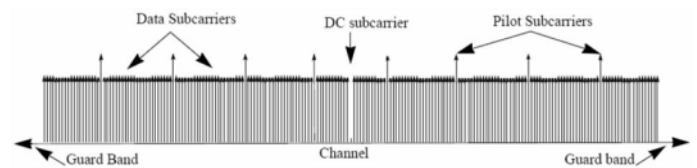


### Modulación 802.16

La capa física 802.16 emplea modulación OFDM con 256 subportadoras, de las que sólo se emplean 200 (192 para datos y 8 pilotos). La separación entre subportadoras es de 45 kHz. La señal ocupa un ancho de banda total de 9 MHz.

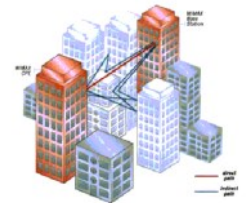
802.16 emplea corrección de errores basado en códigos concatenados Reed-Solomon y Convolutacional.

Las subportadoras se modulan de forma adaptativa con modulación BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM.



### Propagación multi-trayecto

La longitud de símbolo es de aproximadamente 22,2 microsegundos, a los que se añade un prefijo cíclico seleccionable que varía entre 700 nanosegundos y 5,6 microsegundos para mitigar los ecos causados por la propagación multi-trayecto en exterior.



802.16 soporta una dispersión por multi-trayecto de hasta aproximadamente 3 microsegundos, por lo que permite tolerar diferencias de recorrido entre rayos reflejados de hasta 2400 metros, suficiente para propagación en entornos exteriores.

La modulación emplea 8 portadoras piloto distribuidas en los 9 MHz de ancho de banda. Estos pilotos son suficientes para compensar los desvanecimientos selectivos y coherencia espectral típica de propagación en exteriores.

### Capacidad del nivel físico

La capacidad de un símbolo OFDM modulado en 64QAM-3/4 es de 864 bits (192 portadoras de datos con 4,5 bits por portadora). Dado que la duración de un símbolo completo es de 22,92 microsegundos, la capacidad bruta máxima del nivel físico 802.16 es de **37,7 Mbps** en cualquier caso.

### Eficiencia espectral bruta a nivel físico

Dada la capacidad bruta máxima a nivel físico de 37,7 Mbps, y el ancho de banda ocupado por la señal de 9 MHz, la eficiencia espectral máxima a nivel físico es de **4,2 bps/Hz** y se mantiene permanentemente.

## CAPA MAC

### Acceso al medio compartido

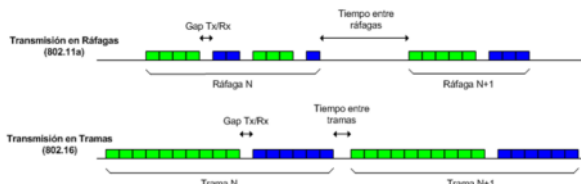
802.11 emplea mecanismos de control de acceso al medio similares a Ethernet, basados en algoritmos **aleatorios** de contienda. Estos algoritmos se emplean para coordinar el uso del espectro radioeléctrico entre las diferentes estaciones, minimizando las colisiones. El mecanismo se basa en un proceso de escucha del canal y de una espera ("backoff") aleatoria. Para reducir el número de colisiones la estación receptora envía un acuse de recibo.

No existe una trama de acceso al medio definida en 802.11, sino que cada estación inicia la transmisión cuando lo necesita, en base a los citados algoritmos de contienda.

Este funcionamiento basado en contienda y ausencia de trama de acceso al medio desaprovecha el uso del espectro de dos formas:

- Para evitar colisiones, los algoritmos de escucha de canal y de espera aleatoria introducen intervalos de tiempo en el que el canal no es utilizado.
- Los mecanismos de contienda no son infalibles, por lo que existe una probabilidad no despreciable de colisión, que aumenta en caso de congestión y provoca pérdida de paquetes.

En los dos casos citados el canal está siendo desaprovechado, por ausencia de transmisión o por colisión. Esto implica que el tiempo efectivo de transmisión se ve notablemente reducido. Por otra parte, estos casos no son predecibles, por lo que no es posible indicar la eficiencia del uso del medio, que en ocasiones



será máxima y en otras no.

En definitiva, la MAC 802.11 no es determinista, sino que se rige por procesos aleatorios que emplean el medio de forma ineficiente. Dicha ineficiencia es imposible de predecir.

Este uso ineficiente del medio físico afecta notablemente a la capacidad del sistema, obligando al nivel físico a emplear las modulaciones más complejas (64QAM) para transmitir la información necesaria durante los intervalos de uso eficiente del medio. Estas modulaciones más complejas requieren mayores niveles de Relación Señal-Ruido, reduciendo el alcance del enlace u obligando a emplear antenas con mayor ganancia para compensar esa pérdida de balance de enlace.

Además de la baja eficiencia en sí, el problema es la imposibilidad de caracterizar la propia eficiencia. Es por ello que ningún fabricante de equipamiento 802.11 especifica el tráfico *neto* disponible, tan sólo el tráfico *bruto* máximo a nivel físico (suponiendo transmisión constante sin *overhead*), que es lo único determinista.

Por lo general, el uso de modulación 64QAM-3/4, que proporciona una capacidad máxima bruta a nivel físico de 54 Mbps, se traduce en una capacidad útil inferior a 20 Mbps debido a la ineficiencia de la capa MAC.

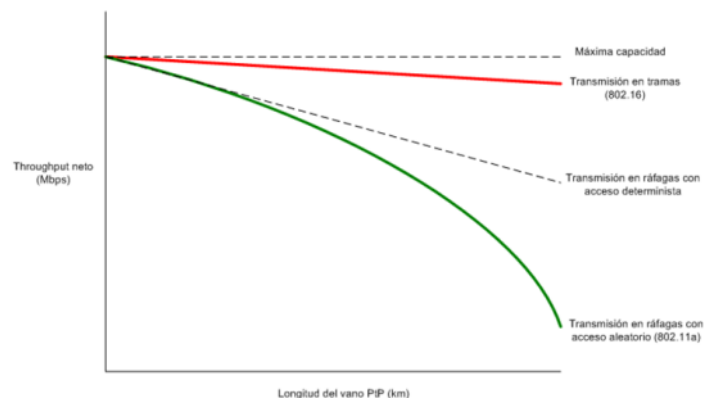
### Sistema entramado

Mientras que en 802.11 se transmite paquete a paquete, en 802.16 se hace trama a trama, agrupando en cada trama muchos paquetes. La ausencia de una trama definida en 802.11 implica que cada paquete transmitido debe constituir una trama completa en sí mismo, exigiendo el uso de preámbulos y cabeceras que reducen notablemente la eficiencia de la capa MAC.

Por contra, en 802.16 el control de acceso al medio es **determinista**. Los usuarios no tienen que competir por el medio, ya que una vez se encuentren dentro de la red la estación base (BS) ejercerá de árbitro, controlando las transmisiones y asignando *slots* a los diferentes usuarios.

### Degradación de capacidad en enlaces punto-punto

Un fenómeno poco caracterizado es la reducción de la capacidad útil de un enlace punto-punto conforme aumenta la distancia del enlace.



Este fenómeno se debe a la propagación de las ondas radioeléctricas entre los dos extremos del enlace y el uso de duplexión TDD (transmisión TX y recepción RX en la misma frecuencia con alternancia en el tiempo).

La duplexión TDD implica que cada estación se encuentra en modo recepción o transmisión, pero nunca ambos simultáneamente. Una estación no pasa a modo transmisión hasta que no deja de recibir señal, lo que ocurre instantes después de que la otra estación deje de transmitir, debido al tiempo de propagación de la señal.

Cada conmutación de TX a RX y viceversa requiere una espera igual al tiempo de propagación de la velocidad de la luz a lo largo del enlace. Dado que la MAC 802.11 no emplea tramas definidas y requiere un acuse de recibo por cada paquete, el número de transiciones Tx/Rx es muy elevado, lo que se traduce en una capacidad efectiva que decrece con la longitud del enlace.

Por ejemplo, si en un enlace de 10 km se transmite un paquete cada 200us, hay al menos una transición Tx/Rx en ese intervalo de tiempo. La luz tarda en recorrer la distancia del enlace 30us, por lo que el canal queda inutilizado 30us por cada paquete, tiempo nada despreciable.

En conclusión, la MAC 802.11, ideada para propagación en interior, ve reducida su capacidad efectiva en enlaces de grandes distancias. El efecto comienza a ser apreciable a partir de distancias de 1 km.

## QoS (Calidad de Servicio)

### Introducción

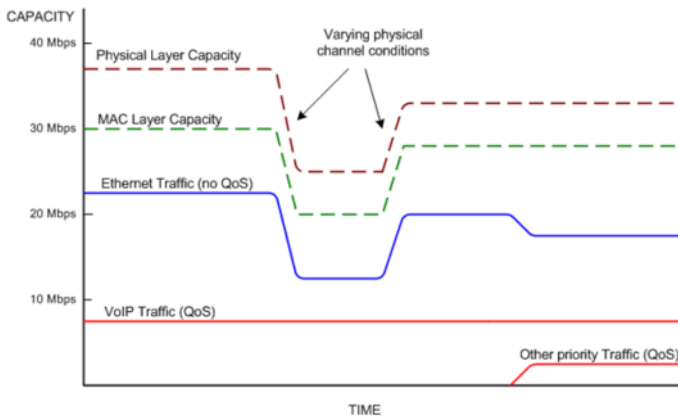
A medida que aumenta el éxito de las comunicaciones inalámbricas, crece la necesidad de poder soportar también en estos entornos las mismas aplicaciones que corren en sistemas cableados, pero el espectro radioeléctrico es escaso, inestable y con disponibilidad de ancho de banda limitada, con lo que resulta fundamental poder dotar a estas nuevas tecnologías de características de calidad de servicio (QoS).

Se denomina QoS al conjunto de mecanismos que nos garantizan unas mínimas condiciones de rendimiento en una comunicación. Poder ofrecer QoS es muy importante para los proveedores de servicios, ya que pueden garantizar a sus clientes unos niveles mínimos de calidad y pueden crear distintos niveles de servicio con diferente tarificación.

En sistemas *WiFi*, los paquetes son marcados con un nivel de prioridad que dependerá del tipo de aplicación o servicio al que correspondan. Así, en caso de congestión determinados tipos de datos o aplicaciones pueden tener prioridad en la entrega.

El gran valor añadido de la tecnología *802.16* respecto a sus otras competidoras es que además de priorizar servicios permite asignar recursos del nivel físico de acuerdo a dichas prioridades, implementando mecanismos de QoS hasta nivel 2 que le permiten ofrecer completa separación de servicios. Esto permite asignar parámetros mínimos de QoS a ciertos servicios, aun en situaciones de congestión.

La tecnología *802.16* se basa en un tratamiento diferencial de los flujos de datos para múltiples usuarios y servicios (audio/vídeo/



datos). Para una correcta implementación se desarrolla a lo largo de 4 fases diferenciadas: *Admission Control*, *Service Classification*, *Traffic Shaping* y *Scheduling*

El control de QoS es un concepto que tradicionalmente se asocia más a sistemas de acceso o de distribución en última milla, pero también es algo a tener muy en cuenta en redes de transporte o *backhaul*.

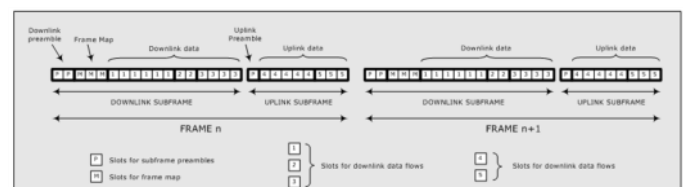
Con la tecnología *802.16* y sus garantías de QoS se puede controlar el impacto de estos canales de *backhaul* en las redes y asignarles una capacidad máxima, para que los demás usuarios no se vean perjudicados por una avería de un operador ajeno.

### QoS extremo a extremo

En un enlace PtP, es importante que la comunicación sea equilibrada en ambos extremos para aprovechar al máximo la capacidad del medio. Si uno de los extremos de la comunicación se encuentra saturado y el otro extremo le envía más datos, será información que no podrá ser procesada correctamente y aumentará la latencia total del sistema. Las garantías de QoS que ofrece *802.16* nos permiten realizar un intercambio de datos que ambas estaciones puedan soportar, con lo que la comunicación extremo a extremo es mucho más eficaz y se adapta a las posibilidades de transmisión de cada momento.

### Ausencia de contienda

Con el sistema de control de acceso al medio y de eliminación de contienda que implementa *802.16*, es sencillo establecer mecanismos de control de QoS, modificando las asignaciones de *time slots* dependiendo de las necesidades de cada estación en cada momento concreto. Esto posibilita reservar un mínimo ancho de banda para ciertas aplicaciones sin depender del tráfico de otras SSs, obteniendo así niveles de *throughput* elevados.



## CONCLUSIONES

### Comparativa general

1. *WiFi* emplea canales de 20 MHz, 40MHz y 80MHz, mientras que *802.16* permite el uso de canales de 10 MHz, por lo que hay más canales disponibles en el mismo espectro RF en el caso de *802.16*.
2. Ambos estándares emplean las mismas modulaciones, por lo que ambas requieren la misma relación Señal-Ruido para una misma modulación. En el caso mejor, la señal WiFi ocupa el doble que la señal *802.16*, por lo que en un sistema *802.16* el ruido integrado es menor, la sensibilidad del receptor es 3 dB mejor que la de un receptor *WiFi*; lo que se traduce en un alcance en condiciones LOS de un 50% mayor.
3. La eficiencia espectral máxima a nivel físico es de 3,3 bps/Hz en *WiFi* (para el mejor caso) frente a los 4,2 bps/Hz en *802.16* (en cualquier caso).
4. El control de acceso al medio en *802.11* se realiza con mecanismos de contienda, mientras que en *802.16* es determinista.
5. *WiFi* transmite paquete a paquete y *802.16* transmite trama a trama. Menor *overhead* en *802.16*
6. La capacidad bruta a nivel físico es superior en *WiFi* (54 Mbps) frente a *802.16* (37,7 Mbps), debido al mayor ancho de banda ocupado por la señal. Sin embargo, y debido a su control de acceso al medio aleatorio, *WiFi* no puede especificar el tráfico neto disponible, que por lo general suele ser inferior a los 20 Mbps.
7. *802.16* soporta mayor dispersión multi-trayecto que *WiFi*. Es decir, con diferencias de recorridos superiores a 120 metros la señal *WiFi* se degrada (diseñado para propagación en interiores), mientras que *802.16* soporta dispersiones del orden de kilómetros, por lo que es una señal mucho más robusta en entornos exteriores.

### Conclusiones

1. La etapa radio *802.16* suele implicar mayores costes debido al uso de osciladores y etapas de filtrado de mayor calidad que en sistemas *WiFi*.
2. El prefijo cíclico y el mayor número de portadoras de sondeo de canal de *802.16* le confieren mayor robustez en exterior.
3. *WiFi* dispone de una mayor capacidad bruta a nivel físico debido al uso de un mayor ancho de banda. Sin embargo esta ventaja sólo es apreciable en propagación en interiores, ya que la modulación es menos robusta que *802.16* para entornos exteriores, lo que se traduce en pérdidas debido a la coherencia espectral del canal.
4. *802.16* dispone de una menor capacidad bruta, pero es más eficiente para propagación en exterior, lo que se traduce en una mayor capacidad efectiva del nivel físico.
5. *802.16* es mucho más eficiente implementando mecanismos de QoS.

	802.11	802.16	Technical Explanation
Range	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimized for users within a 100 meter radius</li> <li>Add access points or high gain antenna for greater coverage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimized for typical cell size of 7-10 km</li> <li>Upto 50 km range</li> <li>No "hidden node" problem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>802.16</i> PHY tolerates 10 more multi-path delay spread than <i>802.11</i></li> </ul>
Coverage	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimized for indoor environments</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimized for outdoor environments (trees, buildings, users spread out over distance)</li> <li>Standard support for advanced antenna techniques &amp; mesh</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>802.16</i>: 256 OFDM (vs. 64 OFDM)</li> <li>Adaptive modulation</li> </ul>
Scalability	<ul style="list-style-type: none"> <li>Channel bandwidth for 20 MHz is fixed</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Channel b/w is flexible from 1.5 MHz to 20 MHz for both licensed and license exempt bands</li> <li>Frequency re-use</li> <li>Enables cell planning for commercial service providers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Only 3 non-overlapping <i>802.11b</i> channels; 5 for <i>802.11a</i></li> <li><i>802.16</i>: limited only by available spectrum</li> </ul>
Bit rate	<ul style="list-style-type: none"> <li>2.7 bps/Hz peak data rate; Upto 54 Mbps in 20 MHz channel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3.8 bps/Hz peak data rate; Up to 75 Mbps in a 20 MHz</li> <li>5 bps/Hz bit rate; 100 Mbps in 20 MHz channel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>802.16</i>: 256 OFDM (vs. 64 OFDM)</li> </ul>
QoS	<ul style="list-style-type: none"> <li>No QoS support today -&gt; <i>802.11e</i> working to standardize</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>QoS designed in for voice/video, differentiated services</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>802.11</i>: contention-based MAC (CSMA)</li> <li><i>802.16</i>: grant request MAC</li> </ul>