



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons  
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### ESTUDIO DE LA MIGRACIÓN DEL ESTÁNDAR 802.11 AL ESTÁNDAR 802.16 EN ZONAS RURALES

Tesis para optar el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones,  
que presenta el bachiller:

**Eduardo Montes Moscol**

**ASESOR: Pastor David Chávez Muñoz**

Lima, noviembre del 2008

## RESUMEN

En países en vías de desarrollo, como es el caso de Perú, es frecuente que zonas rurales de gran extensión carezcan por completo de infraestructuras de telecomunicación, lo cual supone un obstáculo para el desarrollo y la calidad de vida de las personas. Las razones de esta carencia van desde el alto coste de las alternativas tecnológicas convencionales hasta las dificultades del entorno tales como la ausencia de alimentación eléctrica, las dificultades de acceso o la falta de seguridad física de las instalaciones en emplazamientos deshabitados.

En el contexto del Perú se han implementado algunas tecnologías inalámbricas para dar solución a la falta de comunicación en zonas rurales tales como HF, VHF, VSAT y IEEE 802.11 (WiFi). Siendo esta última adaptada para este tipo de escenarios (enlaces largos en zonas rurales) mediante la modificación de algunos parámetros de la capa MAC ya que fue diseñada en principio como solución para redes inalámbricas de área local.

Si bien algunas experiencias demuestran que, en efecto, IEEE 802.11 mejoró su performance para su uso en enlaces largos, ésta presenta una serie de limitaciones.

Por otro lado, entidades e instituciones importantes como la ITU, Regulatel, Banco Mundial, entre otros han reconocido la importancia de la banda ancha para el desarrollo de las personas en la actual Era de la Información; y de acuerdo a lo investigado, las tecnologías antes mencionadas no permiten verdaderamente velocidades de transferencia adecuadas para lograr conexiones de banda ancha en zonas rurales.

Por tal motivo se plantea la posibilidad de migrar a IEEE 802.16 (WiMAX) en los lugares donde se usa WiFi como solución tecnológica ya que la primera es una tecnología inalámbrica diseñada para redes MAN que no solo permite conectividad inalámbrica sino también velocidades de banda ancha; lográndose llenar los vacíos que deja WiFi. De esta manera se estaría fomentando el acceso universal el cual es un componente en la estrategia del desarrollo de las telecomunicaciones en el Perú.

## Introducción

Actualmente vivimos en un mundo en el cual el acceso a la comunicación es cada vez más imprescindible para tener una buena calidad de vida. En el caso de la realidad peruana, existe una marcada diferencia en lo que se refiere al acceso a las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC) entre las grandes ciudades y las denominadas zonas rurales o apartadas. Esto es debido a factores tecnológicos y socioeconómicos, y específicamente al déficit de infraestructuras de telecomunicaciones. Este hecho, conocido como **brecha digital**, se traduce en una desigualdad de posibilidades en acceder a la información, al conocimiento y a la educación mediante las TICs.

La tendencia actual en telecomunicaciones es la convergencia de servicios, tecnologías y estándares, los cuales están soportados por accesos de banda ancha.

Cabe resaltar que este tipo de acceso está limitado a zonas urbanas y a los sectores con capacidad adquisitiva suficiente para utilizar estos servicios. Si lo que se quiere es dar comunicación a zonas marginadas lo que se ha propuesto es usar la banda ancha como medio para ofrecer el invaluable servicio de Internet, VoIP, entre otras aplicaciones para mejorar la calidad de vida de las personas que viven estas realidades.

Dado que las zonas a las que se pretende proveer de comunicación son alejadas, se plantea la posibilidad de utilizar el estándar IEEE 802.16, conocido comercialmente como WiMAX, el cual es una tecnología de conexión de banda ancha a través de ondas de radio con mayor alcance y confiabilidad que las tecnologías que se están usando actualmente en ciertas zonas rurales (principalmente WiFi). De esta manera, *el Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)* estaría propiciando la introducción de nuevos y mejores servicios de telecomunicaciones.

Al encontrar una solución alternativa al problema de comunicación de las comunidades rurales y las zonas marginadas del Perú estamos logrando que disminuya la desigualdad de oportunidades entre ciudadanos y pymes que

pertenecen a entornos rurales con respecto a los *urbanos*. Este hecho permite la equidad en el acceso a los servicios de telecomunicaciones, por tanto, los habitantes de zonas rurales al poder también aprovechar de los beneficios de las TICs tendrán mayores posibilidades de fomentar su propio desarrollo económico y social.

Es mediante este tipo de proyectos que se logrará acortar la brecha digital existente y así contribuir a la construcción de la Sociedad de la Información y el conocimiento en el país.



## *Capítulo I*

### *Marco Teórico de los Estándares 802.11 y 802.16*

#### **1.1 Estándar IEEE 802.11**

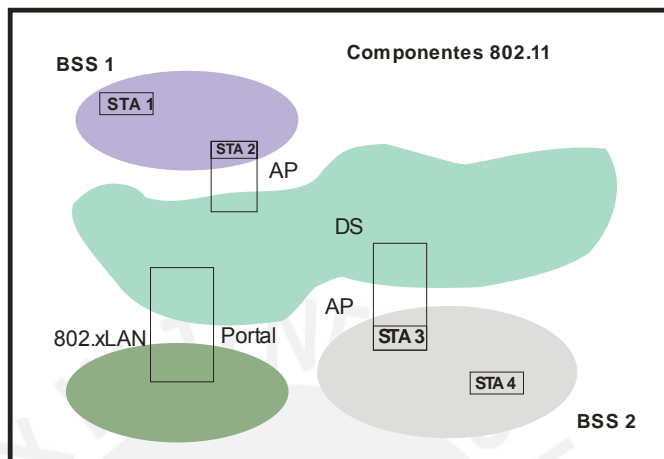
##### **1.1.1 Introducción a los estándares IEEE 802.11**

La familia de estándares IEEE 802.11 fue concebida para especificar un conjunto de Tecnologías de redes inalámbricas de área local (WLAN). Así pues, ya desde el primer momento el diseño de esta tecnología está caracterizado por tener como objetivo redes en que las distancias entre nodos son del orden de las decenas o centenares de metros, como sucede en general en las redes de área local; se trataba de evitar la necesidad de instalar parte o la totalidad del cableado hasta entonces imprescindible en estas redes, y de dotar a los nodos de una movilidad que se hace posible al prescindir del cableado.

El origen de las LAN inalámbricas (Wireless Local Area Network, WLAN) se remonta a la publicación en 1979 de los resultados de un experimento realizado por ingenieros de IBM en Suiza, consistente en utilizar enlaces infrarrojos para crear una red local en una fábrica. Estos resultados, publicados por el IEEE, pueden considerarse como el punto de partida en la línea evolutiva de esta tecnología. Las investigaciones siguieron adelante tanto con infrarrojos como con microondas, donde se utilizaba el espectro ensanchado (Spread Spectrum). En mayo de 1985, y tras cuatro años de estudios, la FCC (Federal Communications Commission), la agencia federal del Gobierno de Estados Unidos encargada de regular y administrar en materia de telecomunicaciones, asignó las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) 902-928 MHz, 2,400-2,4835 GHz, 5,725-5,850 GHz para uso en las redes inalámbricas basadas en espectro ensanchado. Desde 1985 hasta 1990 se siguió trabajando ya más en la fase de desarrollo, hasta que en mayo de 1991 se publicaron varios trabajos referentes a WLAN operativas que superaban la velocidad de 1 Mbps, el mínimo establecido por el IEEE 802 para que la red sea considerada realmente una LAN.

Es ya en 1997 cuando, finalmente, el IEEE emite su primer estándar de WLAN, el IEEE 802.11, que define las capas física, de enlace y control de acceso al medio en redes inalámbricas de banda ancha basadas en espectro ensanchado. Para asegurar la

compatibilidad e interoperabilidad de los distintos dispositivos fabricados según este estándar se crea la WiFi-Alliance, una asociación que aglutina a los diferentes actores relacionados con IEEE 802.11, y se crea la marca WiFi (Wireless Fidelity) que se emplea para certificar los productos que cumplen ciertas reglas de interoperabilidad [1].



**FIGURA 1.1:** COMPONENTES DE LA ARQUITECTURA DE REDES IEEE 802.11

**Fuente:** [1]

Los productos certificados WiFi también pueden tener algunas prestaciones no estándares mayores de las que cumplen los requisitos de la certificación. Desde el primer momento, la industria propuso algunos equipos pensados para uso en exteriores y con distancias algo más largas que las típicas de WLAN. Sirvan como ejemplos la gama de equipos FHSS y DSSS de Alvarion, comercializadas ya en los años 90 para exteriores, o algunos productos de Cisco de la línea Aironet que permitían su ajuste para distancias de varios kilómetros, también comercializados a finales de los años 90.

No obstante, aunque la retroalimentación de la industria ha producido una importante evolución en la familia de estándares 802.11 (más adelante se detalla toda la lista de estándares y grupos de trabajo), *los ajustes o adaptaciones para largas distancias han permanecido siempre como soluciones propietarias que no han revertido en ningún nuevo estándar* de la familia ni modificación de los anteriores. [1]



### 1.1.2 Arquitectura de una red 802.11

La arquitectura IEEE 802.11 define distintos tipos de sistemas inalámbricos y distintas formas de asociarse entre ellos. Los componentes básicos de una red 802.11 son (ver Figura 1.1):

- Estaciones (STA): son los ordenadores, PDAs, teléfonos inalámbricos, etc. En definitiva, cualquier dispositivo dotado de conectividad 802.11 y que va a usar la red WiFi para comunicarse.
- Puntos de acceso (AP): hacen de puentes entre la red inalámbrica y la red cableada, y comunican entre sí a las estaciones que se conectan a él.
- Medio inalámbrico: las estaciones y puntos de acceso se comunican de forma inalámbrica. En WiFi se definen varios medios inalámbricos alternativos, que difieren en frecuencia, modulación y otros detalles tecnológicos.
- Sistema de distribución (DS): elemento definido para asociar distintos puntos de acceso que proporcionan cobertura de la misma red. En el estándar faltan muchos detalles de cómo implementar un sistema de distribución, pero se tiene en cuenta para especificar la manera de direccionar las tramas para que puedan encaminarse a través del DS.

El bloque constructivo básico de una red que se define en el estándar es el BSS (Basic Service Set), que es el conjunto de estaciones que se pueden comunicar entre sí dentro de un área de cobertura determinada. Hay dos tipos de BSS (ver Figura 1.2):

- BSS independientes (IBSS): las estaciones se comunican directamente unas con otras sin ningún intermediario, por lo que deben de estar todas en sus respectivos rangos de cobertura. El modo de funcionamiento que soporta la constitución de IBSS se suele llamar modo ad-hoc.[1]
- BSS infraestructurales: emplean un punto de acceso para la comunicación entre las estaciones. Por esa razón, las estaciones no necesitan verse todas con todas para comunicarse (aunque es preferible por razones relacionadas con el protocolo MAC), basta que todas vean y sean vistas por el punto de acceso.

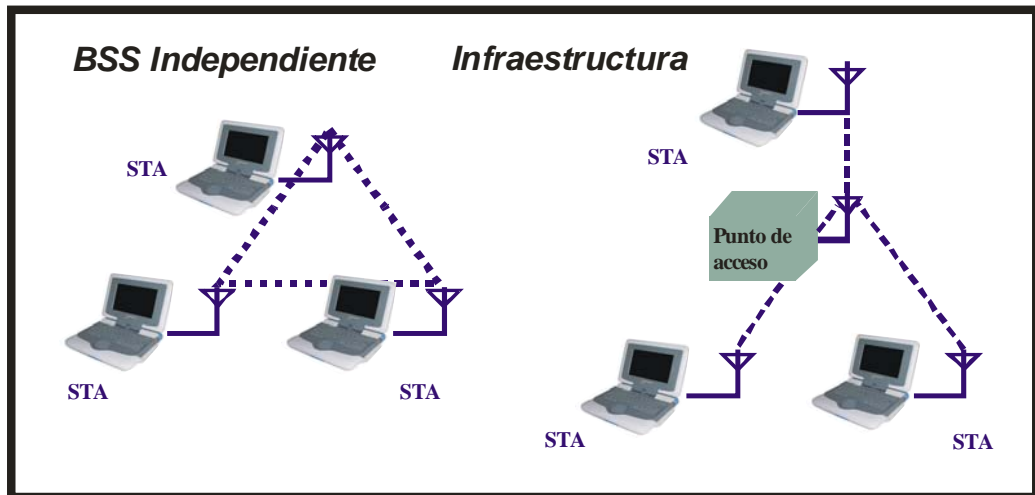


Una red WiFi se suele caracterizar por un nombre o identificador de conjunto de servicio (SSID = Service Set Identifier). Si varias BSS infraestructurales tienen el mismo SSID y sus puntos de acceso se comunican y coordinan entre sí a través de una red troncal, a eso lo llamamos conjunto de servicio extendido (ESS = Extended Service Set, ver Figura 1.3).

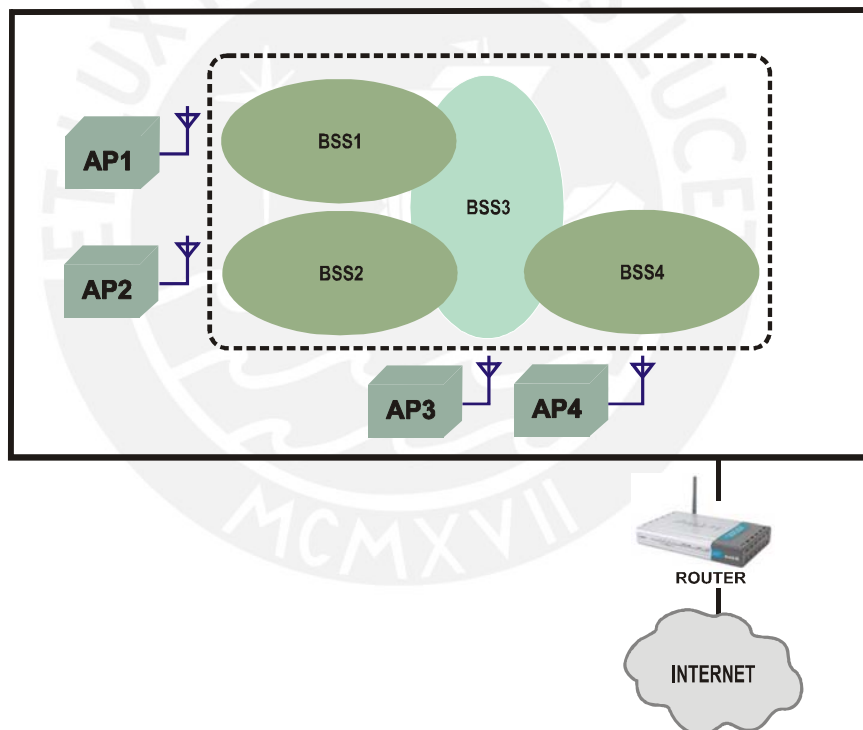
El estándar especifica el procedimiento para que una estación de un BSS pase a otro dentro del mismo ESS sin que se interrumpan sus conexiones, mediante un procedimiento llamado “transición de BSS” (ver Fig. 1.3). Cuando la transición se produce entre BSS de distintos ESS, no hay soporte actualmente para que ésta se produzca de forma transparente.

En el estándar no se indica cómo han de ser implementados cada uno de los elementos anteriormente descritos, por lo que cada fabricante puede implementarlos como desee. El IEEE 802.11 prefiere especificar lo que denomina servicios, los cuales están asociados a los distintos elementos de la arquitectura. Existen 9 servicios especificados en el estándar que pueden dividirse en dos categorías:

- SS (Station Service), aquellos que son parte de todas y cada una de las estaciones (incluyendo por tanto los APs).
  1. Autenticación: proporciona el control sobre el acceso a la LAN y es invocado por cada estación para establecer su identidad de cara al resto de estaciones con las que desea comunicarse.
  2. Desautenticación: es invocado cada vez que se desea dar por terminado un servicio de autenticación existente.
  3. Privacidad: es utilizado para incrementar la privacidad de las tramas en una red WiFi acercándose a la de una red Ethernet. El estándar IEEE802.11 [1] proporciona, mediante este servicio, la capacidad de encriptar el contenido de las mismas.
  4. Entrega de las tramas MSDU (MAC Service Data Unit): es invocado para la entrega de este tipo de tramas en una misma BSS.



**FIGURA 1.2:** TIPOS DE CONJUNTOS BÁSICOS DE SERVICIO EN IEEE 802.11  
Fuente: [1]

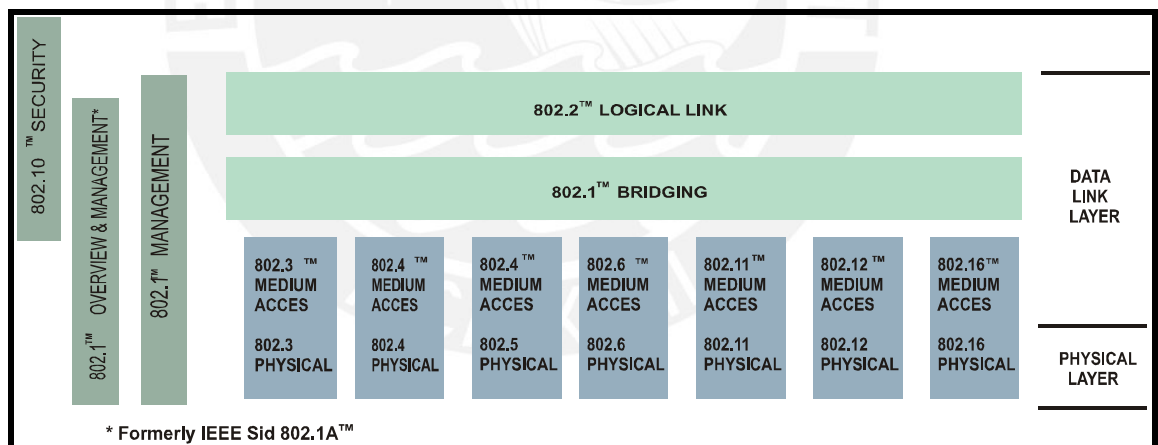


**FIGURA 1.3:** CONJUNTO DE SERVICIO EXTENDIDO EN IEEE 802.11  
Fuente: [1]

- DSS (Distribution System Service), aquellos que son parte de un DS. Dichos servicios son accedidos vía un AP.
  1. Asociación: proporciona al DS la información sobre qué AP utilizar para acceder a cada STA de la red. Antes de que una estación pueda transmitir una trama a través de un AP es imprescindible que se asocie primero con él.

2. Desasociación: es invocado cuando una estación quiere dar por terminada su asociación con un determinado AP.
3. Distribución: es el principal servicio utilizado por las estaciones del IEEE802.11. Es invocado, de forma conceptual, por cada trama de datos enviada o recibida por una estación operando en una ESS. La distribución tiene lugar a través del DSS.
4. Integración: es responsable de realizar aquello que sea necesario para entregar mensajes de la WLAN a cualquier equipo de la red general integrada, entendiendo como tal la red global compuesta por múltiples redes LAN.
5. Reasociación: la asociación es suficiente para la entrega de las tramas entre estaciones WiFi que no realicen transiciones entre distintas BSS. Sin embargo para poder dar soporte a la movilidad entre BSS es necesaria la funcionalidad adicional proporcionada por este servicio.

Cada servicio está soportado por uno o más mensajes IEEE802.11 a nivel MAC. Para una explicación más detallada sobre cada uno de ellos es recomendable acudir al propio estándar, al apartado 5.7 “Message information contents that support the services”. [1]



**FIGURA 1.4: ESTÁNDARES DE LA FAMILIA IEEE 802**  
Fuente: [1]

### 1.1.3 Los estándares de la familia IEEE 802.11

El IEEE, Institute of Electrical and Electronic Engineers, es una organización internacional dedicada, entre otras cosas, a la definición de los estándares necesarios para la interacción y comunicación entre equipos de telecomunicaciones que deseen utilizar una misma tecnología. En concreto la familia IEEE 802 se ocupa de la definición de estándares de redes locales y metropolitanas (ver Figura 1.4).

De entre todos estos estándares cabe destacar dos por su enorme difusión a nivel mundial:

- IEEE 802.3, también conocido como Ethernet, estándar dominante en las tradicionales redes de área local (LAN, Local Area Network), en las que las comunicaciones se basan en una infraestructura cableada.
- IEEE 802.11, también conocido como WiFi, el cual hace referencia a las redes inalámbricas de rea local (WLAN).

Estas y las otras tecnologías alternativas estandarizadas por el IEEE definen la capa física (PHY) y la capa de control de acceso al medio (MAC).

El estándar IEEE802.11 fue aprobado por el IEEE en 1997 y permite trabajar con velocidades de transmisión de 1Mbps y 2Mbps. Desde que el estándar fue establecido hasta hoy han sido muchos los grupos de trabajo creados para mejorar las deficiencias detectadas en él así como para mejorar algunas de sus prestaciones:

- IEEE 802.11a - Estándar para operar redes inalámbricas en la banda de 5GHz con tasas de transmisión de datos de hasta 54Mbps.
- IEEE 802.11b - Estándar para operar redes inalámbricas en la banda de 2,4GHz con tasas de transmisión de datos de hasta 11Mbps.
- IEEE 802.11c - Especifica métodos para la conmutación inalámbrica, es decir, para conectar diferentes tipos de redes mediante puentes inalámbricos.
- IEEE 802.11d - Extensión para la armonización del IEEE802.11 en los distintos países.
- IEEE 802.11e - Extensión para proporcionar calidad de servicio (QoS, Quality of Service) a las redes IEEE802.11a/g/h.
- IEEE 802.11f - Extensión para asegurar la interoperabilidad de los puntos de acceso de distintos proveedores. Define el IAPP, protocolo interno entre puntos de acceso.
- IEEE 802.11g - Estándar para incrementar las tasas de transmisión de datos en la banda de 2,4GHz hasta los 54Mbps.
- IEEE 802.11h - Extensión para adecuarse a los requisitos de los elementos reguladores europeos en la banda de los 5GHz. Sus dos diferencias fundamentales de IEEE 802.11a son la selección dinámica y la potencia de

transmisión variable, obligatorias en el mercado europeo según normas del Instituto Europeo de Estándares de Comunicación (ETSI).

- IEEE 802.11i - Extensión para incrementar la seguridad en las redes WiFi.
- IEEE 802.11j - Extensiones para Japón.
- IEEE 802.11k (en desarrollo) - Intercambio de información de capacidad entre clientes y puntos de acceso.
- IEEE 802.11m (en desarrollo) - Mantenimiento, publicación de actualizaciones estándar.
- IEEE 802.11n (actualmente está el Draft 2.0 ) – Nueva generación de WLAN que introducirá MIMO y algunas otras mejoras en la capa física para obtener tasas de transferencia superiores a 100Mbps.
- IEEE 802.11p (en desarrollo) - WAVE (Wireless Access for the Vehicular Environment), para ambulancias y coches de pasajeros.
- IEEE 802.11r (en desarrollo) - Roaming rápido.
- IEEE 802.11s (en desarrollo, propuesto para aprobación en 2008) - áreas de servicio extendidas con redes Mesh.
- IEEE 802.11T (en desarrollo) - WPP (Wireless Performance Predictions), métodos de testeo y métricas.
- IEEE 802.11u (en desarrollo) - interconexión con redes no-802, por ejemplo redes de telefonía celular.
- IEEE 802.11v (en desarrollo) - Gestión de redes inalámbricas.
- IEEE 802.11w (en desarrollo) - Tramas de gestión protegidas.
- IEEE 802.11y (en desarrollo) - Extensión para USA.

Como todos los estándares de la familia IEEE 802, el IEEE 802.11 define los protocolos de la capa física (PHY) y del control de acceso al medio (MAC). Se van a introducir a continuación las capas PHY y MAC de 802.11, entrando más detalle en los PHY que pueden utilizarse para distancias largas y destacando los aspectos de MAC que se ven influenciados por la distancia o que la pueden limitar. No se van a abordar los aspectos de WiFi que no tienen relación directa con las prestaciones y limitaciones relativas a la distancia, por lo que se va a pasar de largo temas muy importantes como la seguridad y control de acceso, o gran parte de los servicios de gestión de 802.11, fundamentales en la aplicabilidad de WiFi pero que no entran en el ámbito de esta tesis. [1]

#### 1.1.4 La capa física (PHY)

El nivel físico del IEEE802.11 es la interfaz entre la capa MAC y el medio inalámbrico por el que se propaga la señal. Consta de tres funciones principalmente:

1. Realiza el intercambio de tramas con la capa inmediatamente superior (MAC).
2. Es el encargado de transmitir las tramas a través del medio utilizando diferentes tipos de modulación: DSSS, FHSS, OFDM, etc.
3. Proporciona a la capa MAC la posibilidad de comprobar si el medio inalámbrico está libre u ocupado. Se considera que el medio está ocupado cuando se detecta la presencia de una señal de comunicaciones a la frecuencia a la que se desea transmitir.

La arquitectura del PHY divide la capa física en dos capas independientes: PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) y PMD (Physical Medium Dependent).

- La capa PMD es la que proporciona los medios reales para la transmisión y recepción de las señales radioeléctricas a través del medio inalámbrico utilizando DSSS. Se encarga de fijar el canal y convertir las secuencias binarias en señales (y viceversa).  
Ofrece una serie de funciones a la capa superior (PLCP) para la transmisión y recepción de las tramas PPDU (PLCP Protocol Data Unit). Proporciona además la capacidad de realizar lo que el estándar denomina CCA (Clear Channel Assessment), que consiste en la detección de energía o portadoras en el medio para decidir si se considera que está libre u ocupado. En el momento en el que se detecta la presencia de una señal a la frecuencia de trabajo del equipo, se indica a las capas superiores que el canal está ocupado. En caso contrario se considera que el canal está libre.
- La capa PLCP se define para permitir que el nivel MAC opere con la mayor independencia posible con respecto a la subcapa PMD. La capa PLCP simplifica el interfaz entre el nivel físico y los servicios MAC. Las tramas a nivel MAC se denominan MPDU (MAC Protocol Data Unit) y se tratará sobre ellas más adelante. La capa PLCP convierte la trama MPDU en una trama PPDU y viceversa. En la transmisión la trama MPDU será precedida por un preámbulo y



una cabecera PLCP. En la recepción se procesará la información en esos dos campos para ayudar a la demodulación y entrega de la trama MPDU a la capa MAC. [2]

El estándar IEEE802.11 original de 1997 especificaba tres técnicas de transmisión en el nivel físico:

- FHSS (Frequency Hoping Spread Spectrum): utiliza un conjunto de canales estrechos en la banda de 2,4GHz. La clave de su funcionamiento es que se produzcan saltos entre ellos en una secuencia predeterminada, operando a velocidades de transmisión de datos de 1 ó 2 Mbps. No llegó prácticamente a ser implementado ya que pronto quedó obsoleto, por lo que no se va a entrar en el detalle de esta tecnología en este trabajo de tesis.
- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum): se basa en el ensanchamiento de la señal, mediante la multiplexación a través de un código, para minimizar las interferencias y el ruido. Trabaja también en la banda de frecuencias de 2,4GHz. Soporta las velocidades de 1Mbps y 2Mbps mediante el uso de las modulaciones DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) y DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) respectivamente. Esta técnica fue implementada en las primeras tarjetas IEEE802.11 y complementa al estándar IEEE 802.11b.
- IR (Infrarrojos). utiliza ondas en las frecuencias de los infrarrojos para la transmisión binaria de los datos a velocidades de 1Mbps y 2Mbps. Al igual que FHSS, ninguna tarjeta IEEE802.11 llegó a ser basada en IR, y además es una tecnología claramente inapropiada para distancias largas, por lo que tampoco se va a entrar en el detalle de esta tecnología en este trabajo.[2]

El estándar IEEE 802.11b primero, y luego los estándares IEEE802.11a y IEEE802.11g, añadieron nuevas técnicas de modulación en la capa física logrando mayores velocidades de transmisión y una mayor robustez en la conectividad. A continuación se realiza un pequeño resumen de las principales aportaciones y características de cada uno de ellos.

- El estándar IEEE802.11a trabaja en la banda de frecuencia de los 5GHz utilizando la técnica de transmisión OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Da soporte a velocidades de transmisión de 6Mbps a 54Mbps y



ocho canales no interferentes de 20MHz. Esta banda de frecuencia está menos saturada que la de 2,4GHz, lo cual es una ventaja. La banda de 2,4GHz también es utilizada por algunos teléfonos inalámbricos, hornos microondas y equipos Bluetooth. Tiene el inconveniente de no ser compatible con el IEEE802.11b.

- El estándar IEEE802.11b trabaja en la banda de frecuencia de 2,4GHz utilizando el sistema de transmisión HR/DSSS. Mediante el uso de la modulación CCK (Complementary Code Keying) se da soporte a las velocidades de transmisión de 5,5Mbps y 11Mbps. Se cuenta catorce canales (que pueden estar limitados a once o trece según el país) de 22MHz, de los cuales se pueden utilizar simultáneamente hasta tres de forma no interferente.
- El estándar IEEE802.11g fue desarrollado a raíz del importante problema de incompatibilidad entre los equipos de IEEE802.11a y IEEE802.11b. Además, la creación de este estándar atendía al interés en incrementar la capacidad de los equipos y redes WiFi. IEEE802.11g trabaja en la banda de frecuencia de 2,4GHz, manteniendo además los mismos canales y modulaciones de IEEE802.11b. Añade el sistema OFDM mediante el cual se soportan velocidades de transmisión de hasta 54Mbps.[1]

En la Tabla 1.1 se muestra un resumen de las características más destacables a nivel físico de los principales estándares. Como velocidad de transmisión se ha incluido únicamente la máxima soportada por cada uno de ellos.

El próximo advenimiento de IEEE802.11n introducirá una línea más en esta tabla, con algunas mejoras en la aplicación de OFDM y diversidad espacial basada en múltiples antenas (MIMO).

Las bandas de frecuencia empleadas por los diferentes estándares WiFi son bandas ISM (industrial, scientific and medical), destinadas por la FCC de los Estados Unidos desde los años 80 a uso sin licencia a condición de que se respeten ciertos límites en el nivel de potencia transmitida. En Europa, la banda de 5.8GHz no estaba inicialmente disponible pero ya se puede usar con limitaciones similares a las norteamericanas desde finales de 2003, según normativas de la ETSI. En países de América Latina,

África y Asia las normativas son muy variadas, y muchos países tienen incluso vacíos legales; no obstante, es frecuente en los países en desarrollo que se aplique la normativa de la FCC o una muy parecida, al menos en las zonas rurales.

La tecnología de transmisión por radio que está en la base de estos estándares (salvo por lo que respecta al PHY IR) es el “espectro ensanchado” (Spread Spectrum), esencial para poder explotar las bandas ISM en la transmisión de datos. Emplea funciones matemáticas para difuminar la potencia de señal sobre un rango de frecuencias muy amplio.

Cuando el receptor realiza la operación inversa, éste reconstituye la señal y elimina cualquier ruido de banda estrecha. Un receptor tradicional de banda estrecha en esa banda percibiría la transmisión como ruido, aunque eso no sirve realmente para aportar seguridad porque cualquier receptor de espectro ensanchado se puede usar para recuperar la señal si no se emplean técnicas adicionales.

El espectro ensanchado no elimina mágicamente el problema de las interferencias. Si hay otros dispositivos RF (de espectro ensanchado o no) ocupando la zona de cobertura de la red inalámbrica, el nivel de ruido aumenta, la relación señal a ruido disminuye y las comunicaciones se ven afectadas. Para minimizar las interferencias, la FCC impone restricciones de potencia en las transmisiones de espectro ensanchado.

Se van a ver a continuación los distintos PHY que se han especificado en 802.11 y en estándares subsiguientes de la familia, y se comentará brevemente el PLCP y PMD de los más importantes.[1]

**TABLA 1.1: CARACTERÍSTICAS MÁS IMPORTANTES DE LOS ESTÁNDARES IEEE 802.11**

Estándar	Frecuencia	Canales no inter - ferentes	Modulaciones	Velocidad de transmisión
802.11	2,4GHz	3	DSSS	1 y 2Mbps
802.11b	2,4GHz	3	HR/DSSS	5,5 Y 11Mbps
802.11g	2,4GHz	3	DSSS Y OFDM	54Mbps
802.11a	5,8GHz	8	OFDM	54Mbps

Fuente: [1]

### 1.1.5 DSSS (802.11) y HR/DSSS (802.11b)

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) apareció en el estándar original soportando las mismas velocidades que el salto de frecuencias (FHSS), 1Mbps y 2Mbps; pero pronto se vio que tenía un potencial muy superior para lograr velocidades de transmisión mayores. Pronto DSSS se convirtió en la opción de todos los fabricantes, FH quedó en desuso, y en 1999 se estandarizó 802.11b, que ampliaba las velocidades originales con otras dos: 5.5Mbps y 11Mbps.

Habitualmente, toda interfaz comercializada como compatible con 802.11b soporta las cuatro velocidades, si bien las dos primeras y las dos últimas se especifican en estándares diferentes.

La transmisión por secuencia directa es una técnica que transmite una señal sobre una banda de frecuencia mucho más ancha, repartiendo la energía de RF sobre la banda ancha de forma controlada por una transformación matemática. Se producen cambios en la portadora que los receptores detectan a través de procesos de correlación, que invierten el ensanchado realizado en transmisión. El ensanchamiento tiene como consecuencia que cualquier receptor de banda estrecha perciba solamente ruido de baja intensidad si recibe una señal DSSS en su frecuencia.

Además, la correlación otorga a DSSS una alta protección contra las interferencias; el ruido tiende a tener forma de pulsos relativamente estrechos que no producen efectos coherentes a todo lo ancho de la banda, por lo que el correlador expande el ruido y reduce su impacto mientras que la señal se concentra y sobresale.

La modulación se produce aplicando una secuencia de chips a la señal de datos. Un chip es un dígito binario usado por el proceso de ensanchado. No hay diferencia matemática entre bit y chip, pero los chips solo forman parte del proceso de codificación y transmisión y no contienen datos. Los flujos de chips se llaman también códigos pseudo-aleatorios de ruido (códigos PN) y van a una velocidad muy superior que los flujos de datos. El número de chips usados para transmitir un bit se llama “tasa de ensanchamiento” (spreading ratio). Cuanto mayor es la tasa de ensanchamiento más fácil es recuperar la señal en recepción, pero se utiliza una banda más ancha para transmitir la misma información, además de que los componentes electrónicos deben trabajar a frecuencias superiores y son, por lo tanto, más caros. 802.11 adoptó como código PN una palabra Barker de 11 bits, que tiene excelentes propiedades de

autocorrelación. Cada bit se codifica usando toda la palabra Barker como secuencia de chips. Ello permite que una función de correlación en el receptor funcione de la forma esperada en una gran variedad de entornos y sea relativamente tolerante a la dispersión del retardo producida por el multitrayecto. La longitud de 11 bits tiene que ver con el requerimiento de los organismos regulatorios de tener al menos una ganancia de procesamiento de 10dB en los sistemas de secuencia directa, lo que de esta forma se logra con un ligero margen de seguridad. La secuencia Barker usada es +1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1, donde -1 significa 0 en binario, por lo que equivale a 10110111000. Se aplica a cada bit con un sumador módulo-2. Cuando se codifica un 1, todos los chips cambian, mientras que para un 0 permanecen inalterados.

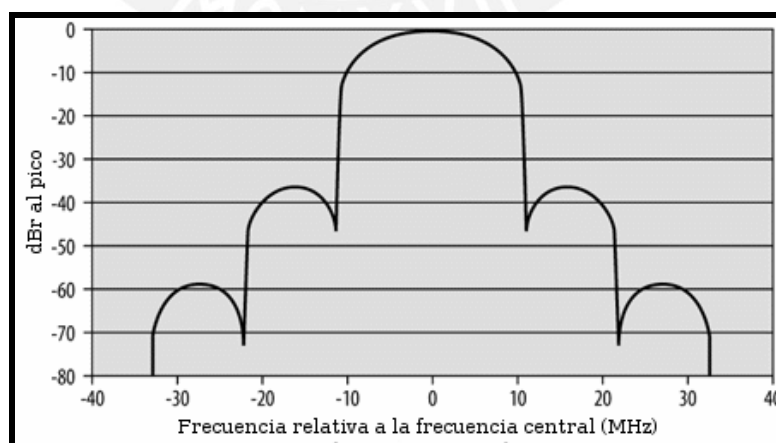
En ausencia de errores en la transmisión, un 1 o un 0 se pueden detectar simplemente contando el número de unos y ceros, pero también se puede analizar el patrón para poder detectar y corregir errores.

Los canales de radio empleados para DS son de 5 MHz de ancho, empezando en 2.412 GHz del canal 1. A continuación se puede ver una tabla con los canales usados en distintos dominios regulatorios.[2]

**TABLA 1.2:** CANALES AUTORIZADOS EN DISTINTOS DOMINIOS REGULATORIOS PARA DSSS

Dominio regulatorio	Canales permitidos
U.S. (FCC) / Canadá (IC)	1 a 11 (2.412-2.462 GHz)
Europa (ETSI)	1 a 13 (2.412-2.472 GHz)
Japón (MIC)	1 a 13 (2.412-2.462 GHz) y 14 (2.484 GHz)

Fuente: [1]



**FIGURA 1.5:** EXTENSIÓN DE LA ENERGÍA EN UNA TRANSMISIÓN DSSS

Fuente: [1]

Aunque un canal tenga un ancho de 5MHz, en realidad la energía se extiende sobre una banda de 22 MHz. Para evitar en lo posible interferencias con canales adyacentes, el lóbulo principal es filtrado a -30 dB y los demás se filtran a -50 dB (ver Fig. 1.5).

Para que dos equipos mutuamente visibles no interfieran, deben operar en canales suficientemente alejados. 802.11b especifica que una señal afectada por otra 35dB más fuerte pero alejada al menos 25MHz debe verse afectada menos del 8% por ella. En definitiva, para asegurar un rechazo de canal adyacente suficiente (aún así no está garantizado), no se pueden utilizar más de tres canales en la misma zona, usualmente los canales 1, 6 y 11. Entonces, para que dos comunicaciones convivan de forma no destructiva sus canales deben tener una separación de al menos cinco canales.

La respuesta a la interferencia de DS es mucho mejor que en el caso de FH. La correlación permite recuperarse de muchos errores de chip sin que den lugar a errores de bit. No obstante, cuando la interferencia o el ruido perjudican la señal recibida más allá de cierto límite, entonces no se puede recuperar nada.

#### 1.1.5.1 CCK (Complementary Code Keying)

Los sistemas de secuencia directa 802.11 usan una tasa de 11Mchips/s, es decir, 1 millón de palabras Barker por segundo, cada una de las cuales codifica uno o dos bits, dando lugar a velocidades de 1.0 Mbps ó 2.0 Mbps respectivamente. 802.11b emplea transformaciones matemáticas sofisticadas que permiten usar unas pocas secuencias de 8 bits para codificar 4 o incluso 8 bits por palabra, lográndose velocidades de 5.5Mbps u 11Mbps. Las transformaciones matemáticas están pensadas para que los receptores puedan reconocer fácilmente los distintos códigos, incluso en presencia de interferencias o desvanecimientos por multitrayecto.

Las modulaciones se realizan en DQPSK, transmitiéndose 2 bits por símbolo, pero al transmitirse palabras código que contienen 2 ó 4 bits adicionales, el resultado es la transmisión de 4 ó 6 bits por símbolo.[2]

#### 1.1.5.2 Subcapa PMD de 802.11 DS

El PMD de 802.11 incorpora especificaciones para dos velocidades: 1.0 y 2.0 Mbps.

- A 1.0 Mbps, tras añadir la cabecera PLCP a la trama procedente del MAC, la unidad entera se mezcla. La secuencia resultante es transmitida usando DBPSK a un millón de símbolos por segundo, lo que resulta en un throughput de 1.0 Mbps.



- A 2.0 Mbps, el preámbulo y la cabecera PLCP se transmiten a 1.0 Mbps con DBPSK; cuando se termina la transmisión de la cabecera, se conmuta a DQPSK para transmitir la trama procedente de la capa MAC a 2.0 Mbps.

Si se detecta interferencia, se puede pasar automáticamente a funcionar a 1 Mbps.

La detección de portadora y de canal libre (CS/CCA, por “carrier sense/clear channel assessment”) tiene tres modos:

- Modo 1: Cuando se supera un umbral de detección de energía, se reporta que el medio está ocupado.
- Modo 2: Cuando se detecta una señal DSSS, aunque sea a un nivel de señal inferior al umbral de detección de energía, se reporta que el medio está ocupado.
- Modo 3: Combinación de los modos 1 y 2; se tiene que detectar una señal DSSS con suficiente energía para reportar que el canal está ocupado.

Cuando el canal se da por ocupado, se mantiene así durante toda la duración de la transmisión independientemente de que se siga recibiendo señal o no. Esa duración se extrae del intervalo de tiempo en el campo correspondiente de la cabecera. El reporte de medio ocupado tiene que producirse en un tiempo inferior a la duración de una ranura. [2]

**TABLA 1.3: PARÁMETROS PHY DS**

Parámetro	Valor	Notas
Tiempo de ranura	20 $\mu$ s	SIFS se usa para derivar la duración del resto de IFS (DIFS, PIFS Y EIFS).
SIFS	10 $\mu$ s	
Tamaño de la ventana de contienda.	31 a 1.023 ranuras	Los símbolos del preámbulo se transmiten a 1 MHz, luego cada símbolo lleva 1 $\mu$ s; 144 bits requieren 144 tiempos de símbolo. La cabecera PCLP tiene 48 bits, luego dura 48 tiempos de símbolo.
Preámbulo.	144 $\mu$ s	
Cabecera PLCP.	48 $\mu$ s	
Tamaño máximo de trama MAC.	4 – 8.191 bytes	
Sensibilidad mínima del receptor	-80 dBm	
Rechazo de canal adyacente	35 dB	

Fuente: [1]

### 1.1.5.3 PMD de 802.11b HR/DSSS

La transmisión a 1.0 Mbps y a 2.0 Mbps no tiene ninguna diferencia con la especificada en 802.11.

En 5.5 Mbps con CCK, la transmisión se realiza con DQPSK, es decir, codificando dos bits por símbolo, siendo los símbolos cuatro distintos desplazamientos de fase. En CCK se transmiten bits adicionales mediante la selección de palabras código; en 5.5 Mbps los bits adicionales son dos, por lo que se transmiten 4 bits por símbolo. Igualmente, para transmitir 11Mbps se usa DQPSK y los 6 bits adicionales por símbolo los transporta la palabra código escogida de entre 64 palabras de 8 bits.

Por ejemplo, para transmitir la secuencia 01001101 a 11Mbps, los primeros dos bits se codifican como un desplazamiento de fase, que será de  $\pi/2$  si el símbolo es par, y de  $3\pi/2$  si es impar. Los otros 6 bits se dividen en tres pares: 00, 11, y 01, cada uno de los cuales codifica un ángulo en la ecuación de la palabra código. Por último, se convierten los ángulos de fase en una palabra código compleja para su transmisión.

En 11.0 Mbps es igual salvo en que las palabras código son 64 y permiten codificar 6 bits. El reconocimiento de canal libre tiene los modos del DSSS original y dos modos específicos adicionales, que son el 4 y el 5:

**TABLA 1.4: PARAMETROS PHY HR/DSSS**

Parámetro	Valor	Notas
Tiempo de ranura SIFS	20 $\mu$ s 10 $\mu$ s	SIFS se usa para derivar la duración del resto de IFS (DIFS, PIFS Y EIFS).
Tamaño de la ventana de contienda. Preámbulo.	31 a 1.023 ranuras 144 $\mu$ s	Los símbolos del preámbulo se transmiten a 1 MHz, luego un símbolo lleva 1 $\mu$ s; 96 bits requieren 96 tiempos de símbolo.
Cabecera PLCP.	48 $\mu$ s	El tiempo de transmisión de la cabecera PCLP depende de si se usa el preámbulo corto o largo.
Tamaño máximo de trama MAC.	4095 bytes	
Sensibilidad mínima del receptor	-76 dBm	
Rechazo de canal adyacente	35 dB	

Fuente: [1]

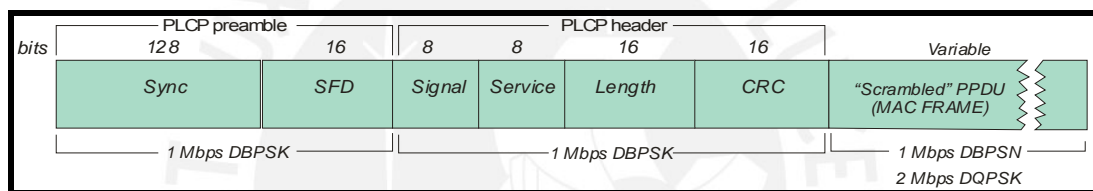


- Modo 4: Inicia un temporizador de 3.65 ms durante el que busca una señal válida HR/DSSS; de no recibirse en ese tiempo, el medio se considera libre. Ese tiempo corresponde al envío de la trama más larga autorizada a 5.5 Mbps.
- Modo 5: Combina los modos 1 y 4.

#### 1.1.5.4 Subcapa PLCP de 802.11 DS

La cabecera PLCP que se añade a las tramas recibidas del MAC contiene 6 campos. En terminología ISO, las tramas pasadas por el MAC al PLCP son “PLCP Service Data Units” o PSDUs.

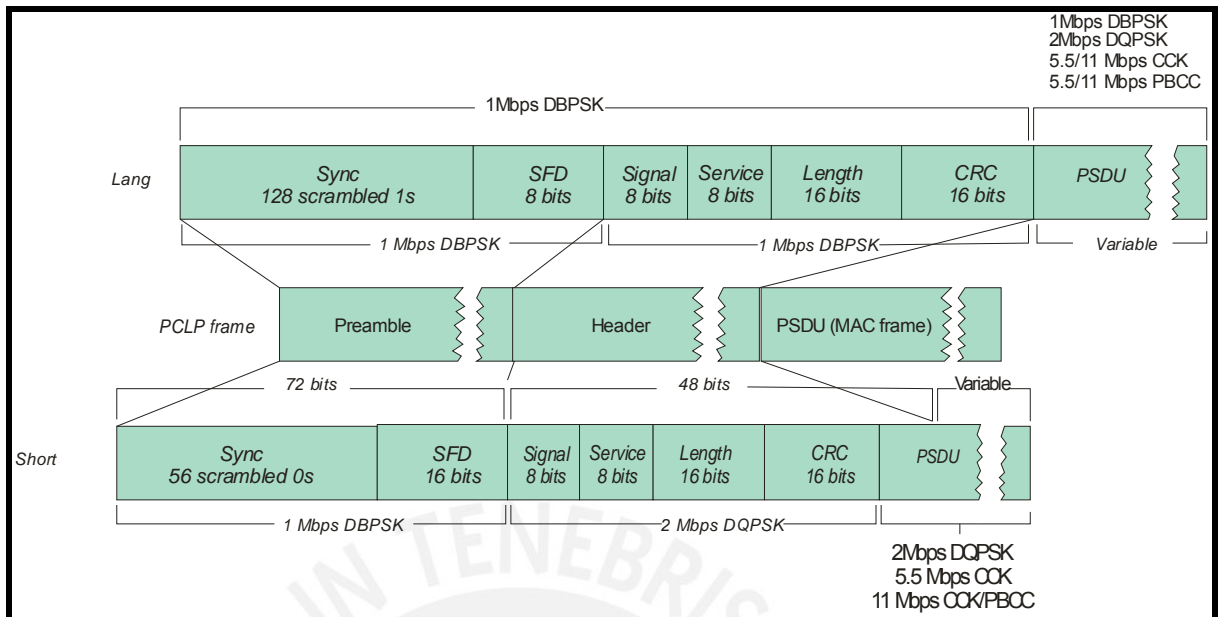
Se muestra a continuación en la Figura 1.6, aunque no se va a entrar en detalles sobre el significado de los campos, ya que en esta tesis solo interesa la duración a la que se transmite cada parte y la duración total.



**FIGURA 1.6:** FORMATO DE TRAMA PLCP DEL PHY DS  
Fuente: [2]

#### 1.1.5.5 Subcapa PLCP de 802.11b HR/DSSS

Las largas cabeceras del PHY original reducen mucho las prestaciones, sobre todo debido al larguísimo preámbulo de 192 microsegundos. En 802.11b se introduce un preámbulo corto opcional que reduce la sobre carga de preámbulo y cabecera PLCP del 25% al 14 %. Como es opcional, el preámbulo corto sólo puede usarse si lo soportan todas las estaciones de una red. Véase figura 1.7.



**FIGURA 1.7: FORMATO DE TRAMA PLCP DEL PHY HR/DSSS**  
Fuente: [2]

### 1.1.6 802.11g: PHY ERP

Cuando apareció 802.11a, los usuarios estaban esperando una nueva extensión del estándar que aumentara la velocidad del exitoso 802.11b, pero 11a tenía algunos problemas que dificultaban su buena acogida: la banda de 5GHz alcanza rangos menores, no era libre en muchos países y no era compatible con 802.11b.

Por todo ello aparece 802.11g en 2003, asegurando la compatibilidad hacia atrás con 802.11b, usando la banda de 2.4GHz e incorporando la tecnología y las velocidades de 802.11a. En realidad hay poca novedad en 802.11g, ya que con ERP (Extended-Rate PHY) se propone en realidad una variedad de tecnologías propuestas antes en otra parte:

- ERP-DSSS ERP-CCK: Estos modos son compatibles con los originales de 802.11 (1 Mbps y 2 Mbps) y los de 802.11b (5.5 Mbps y 11 Mbps).
- ERP-OFDM: Es el modo principal de 802.11g y es esencialmente una redefinición de 802.11a en la banda ISM de 2.4GHz. Soporta exactamente las mismas velocidades que 802.11a (6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54Mbps), y también las mismas son obligatorias (6, 12 y 24Mbps).

- ERP-PBCC: Extensión opcional que proporciona tasa a 22 Mbps y 33 Mbps. Es muy poco implementado y apenas se usa.
- DSSS-OFDM: Modo híbrido en que los paquetes de datos codifican las cabeceras usando DSSS mientras que los datos se codifican en OFDM. Se hizo por compatibilidad hacia atrás. Es opcional y no muy implementado.

802.11a tiene muy en cuenta que debe convivir correctamente con 802.11b. Mientras que 802.11g entiende todo lo que sucede en una red 802.11b, los dispositivos 802.11b no entienden muchas de las tramas de 802.11g, ya sea por usar temporizaciones distintas o directamente por emplear modulaciones OFDM, totalmente incomprensibles para 802.11b. La solución es doble: por una parte, se requiere que, en redes con dispositivos 802.11b y 802.11g mezclados, estos últimos tienen que transmitir a la mayor tasa posible entendida por todas las estaciones. Por otra parte, los dispositivos 802.11g tienen que emplear algún mecanismo para hacer entender las cabeceras de sus transmisiones OFDM de manera que las demás estaciones sepan al menos la duración de las transmisiones en curso; para lograr esto, puede usarse el mecanismo RTS/CTS ya descrito en 802.11 o un nuevo mecanismo CTS-to-self, que básicamente consiste en mandarse una trama CTS a uno mismo para que las demás estaciones que la escuchen actualicen sus NAV. Todos estos mecanismos para permitir la convivencia entre 802.11g y 802.11b se llaman “protección”.

Las tramas de protección se tienen que transmitir siguiendo las reglas de 802.11b. Las estaciones que envían tramas “beacon” son responsables de poner a uno o a cero el bit “Use protection” para imponer o no el uso de la protección en la red. También el bit “Barker Preamble Mode” se puede usar para que las estaciones usen el preámbulo corto si todas las de la red lo soportan, o usen el preámbulo largo si al menos una no lo soporta. La mayor desventaja de la protección es que reduce las prestaciones de 802.11g a la mitad cuando se activa. Los modos opcionales ERP-PBCC y DSSS-OFDM no necesitan mecanismos de protección explícitos porque ya las cabeceras son comprensibles por estaciones 802.11b; en realidad es como si tuvieran protección siempre habilitada, y sufren las consecuencias de ello ya que las cabeceras más largas limitan todo el tiempo las prestaciones que se pueden lograr con esos modos. [2]

### 1.1.6.1 Subcapa PMD de ERP

Puesto que ERP no es más que un cúmulo de técnicas de capa física ya especificadas en los estándares anteriores, la única característica peculiar de 11g a este nivel es que cada trama procedente de la capa PLCP puede pertenecer a cualquiera de los modos, por lo que se tiene que ser capaz de conmutar entre ellos.

En recepción, esa multiplicidad de modos de transmisión implica que el procedimiento de recepción de tramas sea notablemente más complicado que en otros PHY. Cuando se detecta una trama entrante, la estación 802.11g tendrá que detectarla y demodularla de forma distinta según el modo en el que haya sido transmitida:

1. El preámbulo es OFDM o DSSS. Según sea el caso, se aplicará un procedimiento similar al de 11a o al de 11b.
2. Si la trama no es OFDM, se debe decodificar el preámbulo y encontrar su final para reconocer los campos PLCP SIGNAL y SERVICE.
3. Al decodificar la cabecera PLCP se sabe como demodular el cuerpo de la trama:
  - Si la trama se moduló con PBCC, se usan los procedimientos correspondientes.
  - En caso contrario, se observa la velocidad. Si es 1 o 2 Mbps, se aplica el algoritmo de recepción de DSSS; si es 5.5 Mbps o 11 Mbps se usa el algoritmo de CCK. [2]

**TABLA 1.5: PARÁMETROS PHY ERP**

Parámetro	Valor	Notas
Tiempo de ranura	20 $\mu$ s o 9 $\mu$ s	Solo se puede usar el valor más corto si todas las estaciones de la red lo soportan.
SIFS	10 $\mu$ s	SIFS se usa para derivar la duración del resto de IFS (DIFS, PIFS Y EIFS).
Tamaño de la ventana de contienda.	15 o 31 a 1.023 ranuras	Se puede usar 15 como tamaño mínimo si todas las estaciones de la red lo soportan. Presente al final de todo paquete 802.11g.
Tiempo de extensión de la señal. Preámbulo.	6 $\mu$ s	
Preámbulo Cabecera PLCP.	16 $\mu$ s 4 $\mu$ s	
Tamaño máximo de trama MAC.	4095 bytes	

Fuente: [1]

### 1.1.6.2 Subcapa PLCP de ERP

El PLCP de ERP es bastante complejo por la diversidad de modos de operación, cada uno de los cuales tiene sus propios formatos de trama a nivel físico. El modo fundamental es el ERP-OFDM, de implementación obligatoria, y es casi idéntico al de 802.11a. La única diferencia es que la trama se cierra con una extensión de señal que no es más que un tiempo vacío de 6  $\mu$ s. Este tiempo es una adaptación para mantener las mismas velocidades y formatos de trama de 802.11a pero manteniendo SIFS de 10  $\mu$ s igual que en 802.11b por compatibilidad hacia atrás, y se debe a que SIFS en 802.11a es de 16  $\mu$ s.

En caso de tramas de portadora única, la estructura de la trama PLCP es similar a 802.11b con pocas excepciones. Los valores de los campos SIGNAL y SERVICE permiten distinguir los diferentes tipos de tramas y demodularlas correctamente. Cuando se va a usar PBCC para transmitir una trama, se aplica un código convolucional. El codificador da una secuencia de 3 bits por cada 2 bits introducidos, y cada uno de esos bloques de 3 bits se mapea a un símbolo en 8PSK. El proceso contrario se realiza en recepción. De forma inmediata, con el reloj de símbolo a 11MHz y dos bits por símbolo, se transmiten 22Mbps. Para alcanzar los 33Mbps se incrementa el reloj de símbolo de la porción de datos de la trama hasta 16.5 MHz.

En cuanto a DSSS-OFDM, es una técnica híbrida. Las cabeceras son iguales que en 802.11b, y los datos incluidos van con OFDM. No aparecen las frecuencias de entrenamiento cortas de 11a y sí en cambio la extensión de señal. [2]

### 1.1.7 La capa de control de acceso al medio (MAC)

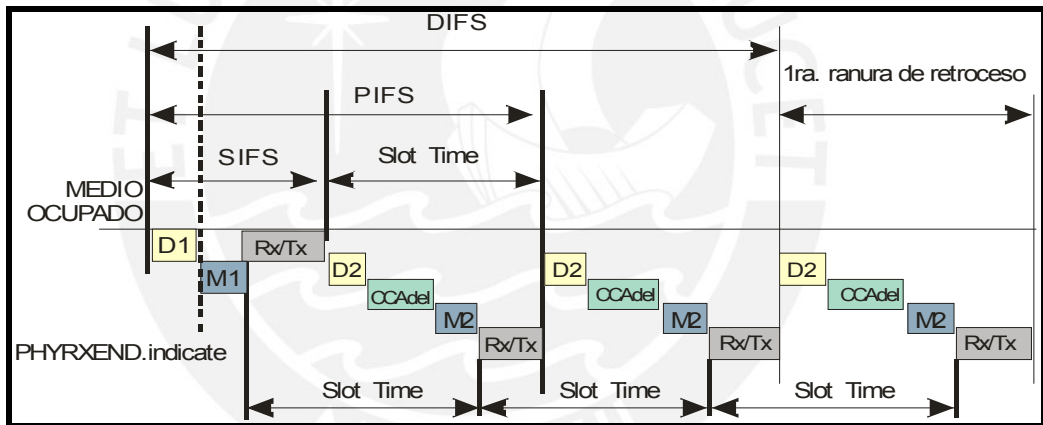
El control de acceso al medio tiene como misión coordinar de la forma más eficiente posible el acceso al medio de transmisión de las distintas estaciones que lo comparten. El MAC de 802.11 no es en absoluto rupturista con respecto a la trayectoria previa de los estándares 802, se podría decir que adapta con éxito el MAC de Ethernet al contexto diferente de una red radio; esto se logra esencialmente reemplazando el CSMA/CD por CSMA/CA.

El MAC tiene que vencer en 802.11 algunos retos específicos de la naturaleza inalámbrica de las redes WiFi, de los que se pueden destacar dos: el primero, la calidad fluctuante y no necesariamente óptima de los enlaces de radio impone un

modelo confirmado de conmutación de tramas unicast. El segundo, la alta probabilidad de que las redes contengan nodos que puedan colisionar sin siquiera oírse, que es el llamado fenómeno del nodo oculto, y para el que se propone el mecanismo RTS/CTS.[1]

**1.1.8 Temporizaciones en el MAC de 802.11**

Aunque el nivel MAC del IEEE802.11 no es ranurado, sí se define una duración de ranura (SlotTime), cuyo valor se fija en el nivel físico. Una ranura es cada una de las fracciones resultantes de particionar el tiempo en ranuras de igual tamaño con instantes de comienzo y fin perfectamente definidos. Para el caso DSSS se fija en el estándar IEEE802.11 un valor de 20µs, si bien en IEEE802.11g se da un valor alternativo opcional de 9µs, que se puede usar si se tiene la garantía de que todos los equipos involucrados lo soportan.



**FIGURA 1.8: PREÁMBULO Y COMIENZO DE TRAMA PLCP OFDM**  
Fuente: [1]

El resto de tiempos definidos en la capa MAC fijarán su valor en función de la duración del slot del nivel físico subyacente. En el estándar se denomina IFS (Interframe Space) a los intervalos entre tramas. Se definen cuatro de ellos para proporcionar niveles de prioridad para el acceso al medio inalámbrico en función del tipo de trama y del modo de coordinación (los modos de coordinación PCF y DCF se introducirán en las líneas siguientes):

- **SIFS** (Short Inter Frame Space): Es el mínimo espacio entre tramas. Utilizado para separar transmisiones pertenecientes al mismo diálogo, como una trama y



su ACK o varios fragmentos de la misma MPDU. Se utiliza cuando una estación ha ganado el medio y necesita mantenerlo para un intercambio de tramas definido. Su valor se fija en la capa física de tal forma que a la estación transmisora le sea posible conmutar al modo de recepción y que la receptora pueda decodificar la trama entrante en ese tiempo.

- **PIFS** (Point Coordination IFS): Se utiliza únicamente bajo PCF. Lo utiliza el AP para ganar acceso al medio al comienzo del periodo de contienda (CFP, Contention Free Period), antes de que cualquier otra estación pueda hacerlo. De esta forma puede comunicar a cuál de ellas le corresponde transmitir a continuación.
- **DIFS** (Distributed IFS): Utilizado bajo DCF por las estaciones que desean transmitir tramas de datos y de control. Su valor se fija como SIFS + SlotTime. Una estación podrá transmitir tras una trama correctamente recibida (aunque no vaya dirigida a ella), una vez transcurrido un tiempo igual a DIFS, si detecta que el medio está libre y cuando su ventana de contención haya expirado.
- **EIFS** (Extended IFS): Utilizado bajo DCF. Es el IFS más largo. Si una estación recibe una trama que no es capaz de comprender, espera este tiempo antes de intentar transmitir. Se usa para evitar que se produzca una colisión debido a que la estación no ha entendido la información de duración de la trama.

Una explicación más detallada de los subcomponentes del tiempo de ranura y del SIFS se puede ver en la Figura 1.8. D1 es el tiempo que tarda la capa física en pasar hacia arriba una primitiva de indicación de que la recepción ha terminado desde que esto realmente sucede; M1 y M2 son el tiempo de reacción de la capa MAC; Rx/Tx es el tiempo que lleva al transceptor conmutar de recepción a transmisión; CCA<sub>del</sub> es el retardo en la detección del canal ocupado, y D2 es D1 más el tiempo de propagación.

Cabe señalar la existencia de un parámetro que se menciona vagamente en el estándar y para el que no se define claramente su valor: el ACKTimeout. Este parámetro marca el tiempo que debe esperar una estación que ha transmitido una trama a su correspondiente ACK. Una vez superado ese tiempo se considera que la trama se ha perdido y se da comienzo a una nueva retransmisión (si el ACK llega superado ese tiempo, se descarta y es como si no hubiese llegado). [1]



### 1.1.9 El protocolo de contienda CSMA/CA

El protocolo CSMA/CA se ha diseñado para tratar de reducir la probabilidad de que se produzca una colisión entre las tramas de dos o más estaciones transmitiendo de forma simultánea. Dicha probabilidad es máxima justo cuando el medio queda libre, puesto que las estaciones que estuviesen esperando para transmitir intentarán hacerlo a la vez. Es por ello que se necesita un procedimiento por el que las estaciones esperen un tiempo aleatorio antes de volver a comprobar si el medio está libre para transmitir. Se tratará de explicar a continuación de forma sencilla el procedimiento seguido por una estación que desea hacerlo.

En primer lugar se procederá a la escucha del canal y una vez que se detecta que el canal está libre la estación espera un tiempo DIFS. Si una vez transcurrido este tiempo el canal sigue libre, la STA generará un periodo adicional de espera que se denomina ventana de contienda (**CW**, Contention Window), cuyo valor será un número aleatorio de veces el tamaño del aSlotTime. Si durante la espera por la ventana de contención se detecta otra trama en el medio, se congela el temporizador y no se transmite ni se sigue la cuenta atrás. Una vez que el medio vuelve a quedar libre se espera nuevamente el tiempo DIFS y se reanuda la cuenta atrás de la CW donde se detuvo. Cuando la CW alcanza el valor cero, se transmite la trama. Si dicha trama tenía un solo destinatario (era unicast), la estación transmisora queda a la espera de recibir la correspondiente confirmación (ACK). El receptor recibe la trama y comprueba su CRC mientras espera un tiempo SIFS y luego envía la trama ACK para confirmar. Las tramas broadcast no se confirman en IEEE 802.11, al igual que las multicast.[1]

Cuando se produce una colisión en una trama unicast, el resultado es que el transmisor no recibe correctamente la confirmación de la trama y la intenta retransmitir hasta un número de veces máximo que por defecto son 7 para el servicio de dos tramas y 4 para tramas transmitidas mediante el servicio RTS/CTS, si bien esos valores se pueden modificar. A cada retransmisión el tamaño de la ventana de contienda se calcula según una variable aleatoria uniforme entre (0, CW), pero el valor CW se va duplicando a cada retransmisión hasta llegar a un valor máximo, en el que se mantiene. Los tamaños mínimos y máximo de CW dependen del PHY, siendo los rangos más usuales el de DSSS (31, 1023) y el de ERP/OFDM (15, 1023). El proceso termina cuando la trama se logra transmitir con éxito (y se recibe confirmación) o se descarta por haberse alcanzado el máximo de retransmisiones sin éxito; en cualquiera

de esos casos, la siguiente se intenta transmitir otra vez con ventana de contienda mínima.

Si una trama es demasiado larga, el nivel MAC puede proceder a su fragmentación y transmisión mediante ráfagas. En este caso el transmisor tan solo espera el tiempo SIFS entre fragmento y fragmento de forma que ninguna otra estación pueda ganar acceso al medio hasta que no termina de transmitirse y confirmarse la ráfaga completa.

#### 1.1.10 Funciones de coordinación PCF y DCF

En el estándar se recogen dos modos de funcionamiento para la capa MAC, uno distribuido conocido como DCF (Distributed Coordination Function), y otro centralizado llamado PCF (Point Coordination Function). Éste último es opcional y depende del primero para funcionar.

El DCF permite compartir el medio de forma automática a través del uso del protocolo de acceso al medio **CSMA/CA** (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) y un tiempo aleatorio de espera cuando el medio está ocupado. Además, tras enviar una trama a un destinatario concreto se debe recibir un asentimiento positivo (trama ACK) y en el caso de que no se reciba en un periodo de tiempo concreto se debe retransmitir la misma trama. La no recepción de un ACK se interpreta como que la estación destino no ha recibido la trama o que ha habido un error, pero esto no es necesariamente cierto.

La estación puede haber recibido la trama perfectamente y que el error se haya producido en la transmisión/recepción del ACK. El DCF no hace diferencias entre puntos de acceso y estaciones cliente, todos los sistemas emplean de idéntica forma el mecanismo distribuido de control de acceso al medio.

El mecanismo PCF proporciona transferencia de tramas libre de contienda. Este método de acceso usa un Punto Coordinador (PC), que operará en el punto de acceso de la BSS, para determinar que estación tiene derecho a transmitir en cada momento. El funcionamiento se basa en sondeo, siendo el PC el que desempeña el papel de “maestro”. El PCF está planteado para alternar periodos libres de contienda (CFP) con periodos de contienda, o dicho de otra manera, DCF y PCF pueden funcionar alternativamente. El PCF usa DCF para establecer un periodo libre de contienda; lo hace distribuyendo cierta información dentro de tramas de gestión para ganar el control

del medio con el objeto de fijar el NAV (Network Allocation Vector) en las estaciones por un valor equivalente a todo el periodo libre de contienda. Todas las estaciones fijarán su NAV al comienzo del CFP, lo cual supone que ninguna se considerara con derecho a ocupar el canal en ese periodo. Al final de un periodo DCF el maestro puede generar un nuevo periodo libre de contienda, ganando el canal de forma determinista gracias a que  $PIFS < DIFS$ .

En un CFP, todas las estaciones de la BSS (exceptuando el PC) fijan su NAV al valor del parámetro  $CFP_{MaxDuration}$  en el comienzo de cada CFP. Esto evita la mayor parte de las contiendas impidiendo las transmisiones no sondeadas por parte de las estaciones, independientemente de que estas sean o no sondeables (CF-Pollable). Las transferencias durante el periodo libre de contienda están formadas por tramas enviadas alternativamente desde y hacia el PC. Durante el CFP, el PC controlará el orden de estas transmisiones y el permiso de las estaciones para transmitir en todo momento.[2]

#### 1.1.11 El problema del nodo oculto y el mecanismo RTS/CTS

En el estándar WiFi se definen dos mecanismos para conocer la disponibilidad del canal, uno físico y otro virtual. Si cualquiera de los dos indica que el medio está ocupado el nivel MAC esperará para poder iniciar la transmisión. El mecanismo físico se basa en la detección real de una portadora en el medio (a la frecuencia de trabajo). El mecanismo virtual se basa en la distribución de información anunciando el uso inmediato del canal. El intercambio de tramas RTS y CTS de forma previa a la transmisión de la trama de datos es un medio para la reserva del canal de comunicaciones. Dichas tramas contienen un campo  $Duration/ID$  que define el periodo de tiempo que la estación origen reserva el medio para transmitir la próxima trama y su correspondiente ACK. De esta forma el resto de estaciones dentro del rango de la estación emisora (que transmite la trama RTS) y de la receptora (que transmite la trama CTS), son informadas de que el medio está reservado y que deben esperar sin transmitir ese tiempo, aunque el medio esté aparentemente libre. Se emplea un contador denominado NAV (Network Allocator Vector) en cada sistema para controlar el tiempo que se debe esperar porque el canal está reservado.

Este mecanismo se diseñó para tratar de solucionar la denominada problemática del nodo oculto, de la cual se expone a continuación un ejemplo: tres estaciones A, B y C, las cuales pueden establecer enlaces A-B y B-C, pero las estaciones A y C se encuentran demasiado lejos una de la otra y no pueden recibir sus respectivas señales.

En un modo de funcionamiento normal, cuando la estación A transmite, la estación C detectará que el medio está libre y transmitirá (si le interesa), lo que dará lugar a una colisión de ambas tramas en la estación B. Si se activa el mecanismo RTS/CTS la estación A enviará la trama RTS. Cuando la estación B reciba la trama RTS transmitirá la trama CTS que será recibida por las estaciones A y C. De esta forma la estación C sabrá que se ha reservado el medio y no transmitirá en ese tiempo, proporcionando a la estación A la garantía de que su transmisión estará libre de colisiones. Las tramas RTS y CTS son muy cortas, por lo que las probabilidades de que se produzca una colisión que las implique son mucho más reducidas que si se transmite directamente una trama de datos de gran tamaño.

Éste mecanismo no debe utilizarse para todas y cada una de las transmisiones de tramas de datos puesto que implica una sobrecarga extra debido a la transmisión de tramas adicionales sin datos; en tramas largas, ofrecen la ventaja de que una colisión del paquete RTS es mucho menos perjudicial que la colisión de la trama de datos, pero en tramas cortas (p.e. paquetes de VoIP) carece de sentido usar este mecanismo. Por este motivo se define el atributo `RTSThreshold`, que es el tamaño en bytes de una trama de datos a partir del cual se utiliza el mecanismo. [1]

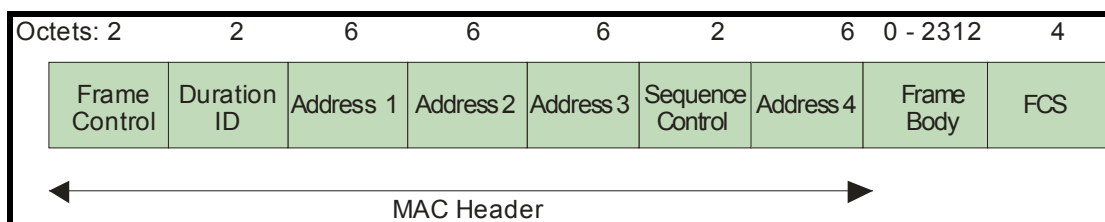
#### 1.1.12 Formato de tramas MAC de 802.11

A continuación se va a proceder a analizar la estructura de las tramas MAC (MPDU) que fija el estándar. Hay tres tipos de trama: las de datos, que transportan los datos entre estaciones, las de control, que se usan en conjunto con las de datos para las operaciones de funcionamiento del MAC, y las de gestión, que sirven para operaciones diversas de supervisión y gestión de usuarios.

La Figura 1.9 muestra la estructura de la trama MAC de datos, que se compone de un conjunto de campos con un orden y tamaño predeterminados:

El campo **Frame Control** consta de múltiples campos que contienen toda la información de control necesaria a nivel MAC. El campo **Duration/ID** tiene 16 bits de

longitud y se utiliza de diversas formas, según el tipo de trama, para informar sobre su duración. El campo **FCS** contiene un CRC de 32 bits para controlar si se han producido errores en la transmisión.



**FIGURA 1.9:** FORMATO DE TRAMAS MAC EN 802.11

Fuente: [2]

El resto de campos solo están presentes en determinado tipo de tramas.

Los campos Address 1, Address 2, Address 3 y Address 4 se utilizan para determinar el origen y destino finales de la trama así como las estaciones transmisora y receptora (la cuarta dirección sólo se usa cuando es necesaria en sistemas de distribución inalámbricos). El campo **Sequence Control** se utiliza para asignar un número de trama a cada una de ellas y poder así tener mayor control sobre ellas. El campo Frame Body es el único campo de tamaño variable y contiene los datos procedentes de capas superiores (por ejemplo un datagrama).

Las tramas de control participan en la entrega de tramas de datos. Administran el acceso al medio inalámbrico y proporcionan funciones de fiabilidad de la capa MAC. Es conveniente listar las tramas de control por su importancia en el funcionamiento del MAC:

- “Request to Send” (RTS): Se pueden usar opcionalmente para ganar el control del medio de cara a la transmisión de tramas largas cuando la presencia de nodos ocultos hace especialmente delicada la transmisión de tramas de gran longitud. El servicio RTS/CTS sólo lo pueden usar tramas unicast, las de broadcast y multicast simplemente se transmiten.
- “Clear to Send” (CTS): sirven para responder a las tramas RTS, y también sirven en 802.11g para habilitar el mecanismo de protección para evitar interferir con estaciones que no son 11g.
- Asentimiento (ACK): permiten asentir positivamente las tramas de datos que lo requieren. La obligatoriedad de asentir todas y cada una de las tramas unicast o



fragmentos tiene un importante impacto en el throughput de datos que se puede lograr con 802.11.

- “Power-Save Poll” (PS-Poll): sirve para que una estación recién despertada del modo de ahorro de energía pida al punto de acceso las tramas que tiene pendientes de recepción. Las tramas de gestión tienen todas la misma estructura y comparten la misma cabecera MAC; la información viaja en el campo de datos en forma de etiquetas numéricas que representan ciertos elementos de información predefinidos. No vamos a entrar en detalles sobre el formato porque no resulta necesario en el ámbito de esta tesis.[2]

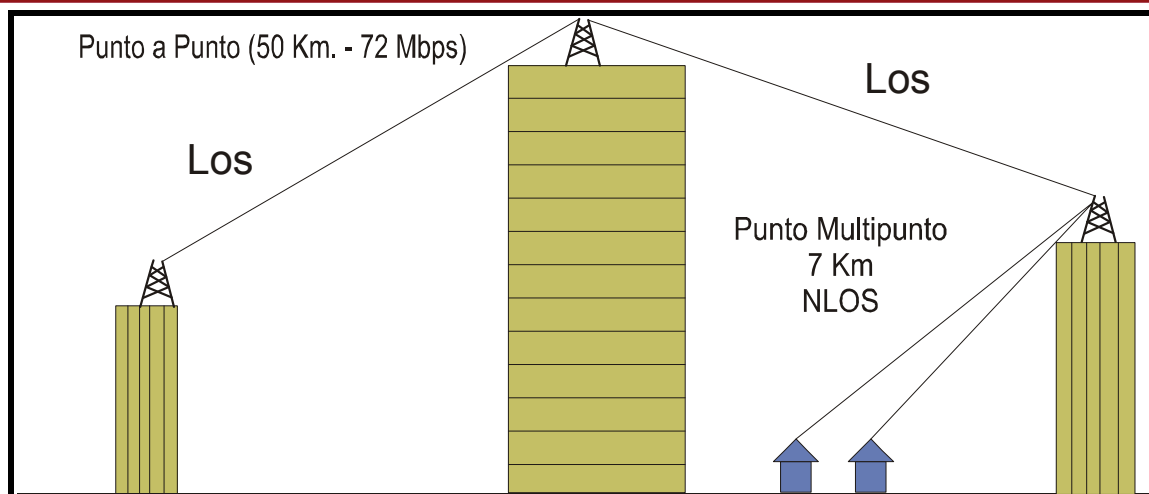
## 1.2 Estándar IEEE 802.16

### 1.2.1 Generalidades

WiMAX es un sistema basado en el estándar IEEE 802.16 que permite la conexión inalámbrica de banda ancha teniendo una amplia área de cobertura. Existen dos variantes prácticas de este estándar; la IEEE 802.16d (IEEE 802.16-2004) y la IEEE 802.16e (estándar aprobado en diciembre del 2005). La primera es definida para **sistemas inalámbricos fijos** (Por ejemplo, WiMAX se constituye como alternativa a ser el Backbone para Redes de Distribución WiFi) y la segunda para **acceso a móviles**.

WiMAX aparentemente es un concepto parecido a WiFi, pero es diferente en su concepción y operación, ya que no solo se consiguen mayores alcances y ancho de banda. WiFi fue diseñado para ambientes inalámbricos internos como una alternativa al cableado estructurado de redes y con la posibilidad de cobertura sin línea de vista (NLOS) de muy pocos metros. Por el contrario WiMAX fue diseñado como un medio de última milla en redes metropolitanas (MAN), de acceso a los usuarios.

WiMAX ofrece enlaces como “backhaul” (punto a punto) de hasta 50 Km con una capacidad de 72 Mbps como enlace punto a punto con línea de vista (LOS) y ofrece rangos de no línea de vista (NLOS) de hasta 7 Km para una distribución punto multipunto [3].



**FIGURA 1.10: ESQUEMA DE PROPAGACION CON LOS y NLOS**

Fuente: MTC-Os iptel. *Boletín Tecnológico sobre WiMAX*.Perú.2006

Actualmente WiMAX está siendo desarrollado y promovido por el grupo de la industria WiMAX Fórum, que es una organización conformada por alrededor de 250 industrias entre las que se encuentran fabricantes de chips, equipos de comunicaciones y prestadores de servicios. Su función es de vigilar la interoperatividad entre distintos equipos que utilizan esta tecnología.

Asimismo, este estándar fue desarrollado en la actualidad para conexiones punto a punto o punto multipunto típicas en radio enlace de microondas (IEEE 802.16d), y en un futuro ofrecerán una total movilidad (IEEE 802.16e) con lo cual podría competir con las redes celulares, dentro del concepto punto a punto y punto multipunto.[16]

Otra ventaja importante de WiMAX es que al usar el aire como medio de transmisión, se evitan los gastos de cableado de los sistemas actuales, gracias a esto es posible comunicar lugares muy apartados que no cuentan con la infraestructura necesaria para su comunicación. Además soporta calidad de servicio (QoS) que permite una adecuada transmisión de datos, voz y video. [3]

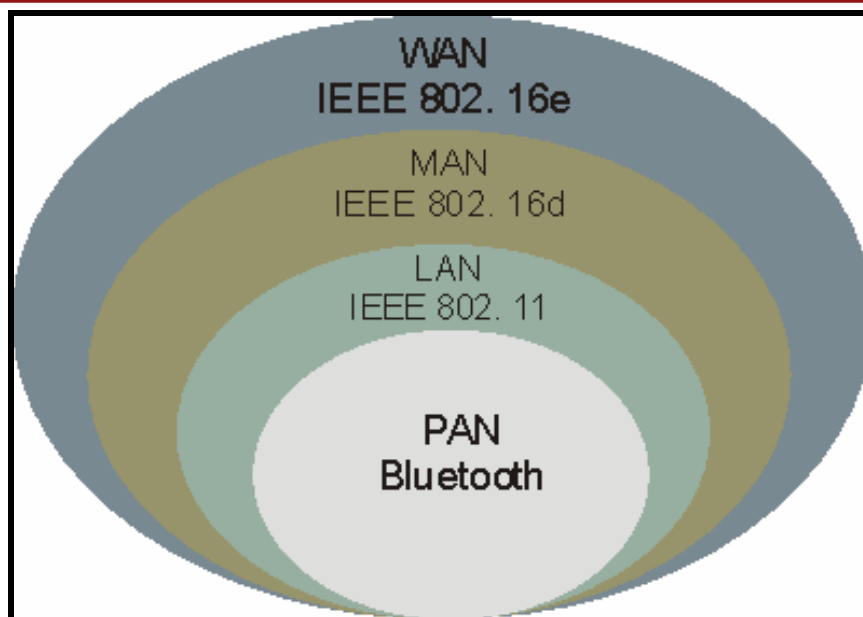
Por estas razones WiMAX presenta una solución para conexiones a **áreas rurales o a áreas poco accesibles**. Entre las características más resaltantes de este sistema se pueden mencionar las siguientes[3]:

- Utiliza la modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) la que permite la transmisión en distintas frecuencias simultáneamente. Estas



frecuencias son ortogonales entre sí lo que puede garantizar (teóricamente) que no exista interferencia entre éstas.

- Soporta mecanismos de antenas inteligentes los cuales mejoran la eficiencia espectral en sistemas inalámbricos y distintos tipos de antenas.
- Soporta redes punto multipunto y redes de malla.
- Soporta calidad de servicio (QoS) para los operadores NLOS tal que la señal no se distorsiona severamente por la existencia de edificios ni otras posibles causas de interferencia.
- Soporta las multiplexaciones TDM y FDM, tal que permite la interoperabilidad entre los sistemas celulares (FDM) y los inalámbricos (TDM).
- Como medidas de seguridad, incluyen mecanismos de criptografía y seguridad propios del sistema.
- Posee un ajuste dinámico del tamaño del paquete de transmisión.
- Tiene aplicaciones de voz, datos y video.
- El sistema WiMAX presenta técnicas de modulación adaptativa dependiendo de las condiciones de la relación señal a ruido (SNR).
- Técnicas como FEC, codificación convolutiva, y otros algoritmos son usados para poder detectar y corregir errores, tal que ayudan a mejorar la relación señal a ruido o SNR. Se incorpora el ARQ (*Automatic repeat request*), para solucionar los errores que no puede solucionar la FEC.
- Algoritmos de control de potencia son implementados en las estaciones base de tal manera que se pueda regular los niveles de potencia en los CPE (*Customer Premise Equipment*). Con esto se logra un ahorro en la potencia consumida en los CPEs.



**FIGURA 1.11:** RELACIÓN DE COBERTURA DE ALGUNOS ESTÁNDARES INALÁMBRICOS  
Fuente: MTC-Osiptel. *Boletín Tecnológico sobre WiMAX*.Perú.2006

### 1.2.2 ESTÁNDAR IEEE 802.16

- **802.16**

La primera versión del estándar fue completada en el 2001. Esta versión de WiMAX considera un rango de espectro mayor a 10 GHz (especialmente de 10 a 66 GHz). Para este estándar la línea de vista era necesaria, y el multidireccionamiento utilizaba técnicas de multiplexación ortogonal por división de frecuencia (OFDM). Así se soportan canales con un ancho de banda mayor a 10 MHz.

Este primer estándar consideró la prestación del servicio con las autorizaciones correspondientes (licencias), aunque se utilice un espectro libre de licencia. Además este primer estándar fue diseñado para conexiones punto a punto.

- **802.16a**

La actualización de 802.16a, completada en enero del 2003, consideró el rango del espectro de frecuencias de 2 a 11GHz. Utiliza rangos de frecuencia tanto licenciados como no licenciados, además incorpora la capacidad de no línea de vista (NLOS) y características de calidad de servicio (QoS). Esta versión da mayores capacidades a la capa de control de acceso al medio o MAC (Medium Access Control).

Además se incorporó un soporte para FDD y TDD – proveyendo para ambas transmisión de datos duplex y half duplex en el caso donde FDD es usado. Son soportados protocolos como Ethernet, ATM e IP. Este estándar es para conexiones fijas de última milla punto a punto y punto multipunto.

- **802.16c**

Este estándar se ocupó sobretodo del rango de 10 a 66 GHz. Sin embargo, también desarrolla otros aspectos como la evolución del funcionamiento y la prueba y ensayo de los posibles perfiles del sistema. Esto último es un elemento crucial en el juego de herramientas de WiMAX, porque pasa a constituir un gran acuerdo de opciones disponibles con 802.16 en general. La metodología de perfiles del sistema evoluciona para definir qué características podrían ser obligatorias y qué características opcionales. El intento era definir a los fabricantes los elementos obligatorios que se deben considerar para asegurar la interoperabilidad. Los elementos opcionales tales como diversos niveles de los protocolos de la seguridad incorporados permiten que los fabricantes distingan sus productos por precio, funcionalidad y el sector de mercado.

- **802.16-2004(d)**

Las principales características de los protocolos para WiMAX fijos, mencionados en los puntos anteriores, se han incorporado en 802.16-2004. Por lo que éste es el reemplazo del estándar IEEE 802.16a. Este estándar final soporta numerosos elementos obligatorios y opcionales. Teóricamente podría transmitir hasta para un rango de datos de 70Mbps en condiciones ideales, aunque el rendimiento real podría ser superior a 40Mbps.

Debe tenerse presente que para este estándar se tiene tres tipos de modulación para la capa PHY: modulación con una sola portadora, modulación con OFDM de 256 portadoras y de 2048 portadoras, pero el elegido es OFDM de 256 portadoras, debido a que en el proceso de cálculo para la sincronización se tiene menor complejidad respecto a la utilización del esquema de 2048 portadoras.

- **802.16e**

IEEE 802.16e conserva las técnicas actualizadas en el “Fixed WiMAX”, a las cuales se agrega un soporte robusto para una banda ancha móvil. Mientras no esté completamente fija, la tecnología está basada sobre la tecnología de OFDM. Esta

técnica OFDM soporta 2K, 1K, 512 y 128 portadoras. De manera interesante, ambos estándares soportan el esquema de 256-portadoras elegido para IEEE 802.16-2004.

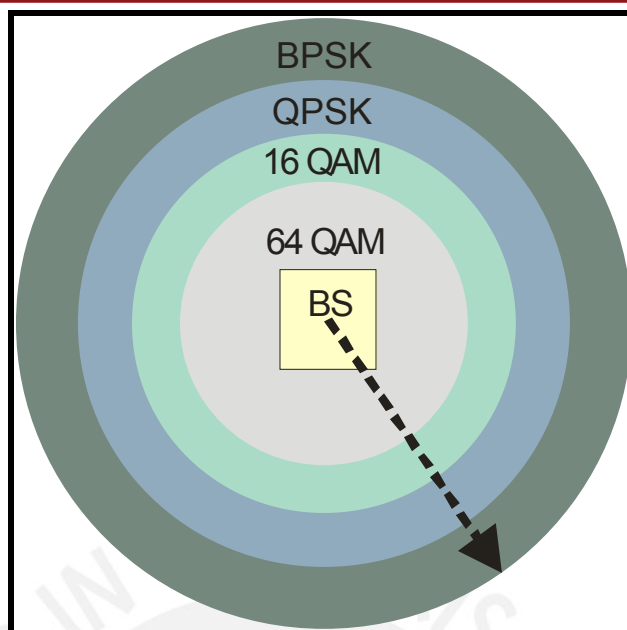
El sistema de OFDM permite que las señales sean divididas en muchos subcanales de baja velocidad para aumentar la resistencia a la interferencia multidireccional. Por ejemplo, un canal de 20MHz es subdividido en 1000 canales, cada usuario individual podría permitirle un número dinámico de los subcanales basados en su distancia y necesidades de la celda (4, 64, 298, 312, 346, 610 y 944). Si está cercano, se podría utilizar una modulación tal como la modulación de la amplitud en cuadratura de 64 niveles (64-QAM). [3]

### **Tipos de Modulación**

WiMAX (802.16) usa en su arquitectura diferentes normas propias de la serie IEEE 802, particularmente en lo referente a Ethernet. En Ethernet, la capa física (PHY) contiene los estándares correspondientes al de medios físicos tales como el cable clase 5 (propio de los servicios de conmutación local), es decir tanto WiMAX como su estándar precedente 802.11 (WiFi) son formas inalámbricas para Ethernet.

Los diseñadores (IEEE 802.16 Working Group D) han diseñado un sistema para que en la máxima capacidad del sistema se ofrezca una confiabilidad del 99.999%. El nivel físico incluye OFDM, Time Division Duplex (TDD), Frequency Division Duplex (FDD), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) y Quadrature Amplitude Modulation (QAM).

De los tipos de modulación (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM), BPSK es la menos eficiente, y se emplea donde las estaciones de suscriptor o SS están más alejadas de las estaciones base o BS, y por lo tanto se requiere mayor potencia para realizar la transmisión. Por otro lado, se utiliza 64QAM, donde las SS están relativamente cerca del BS, y se requiere menos potencia para la transmisión. En la figura 1.12 se muestran los tipos de modulación en función a su distancia con respecto a la BS [3].



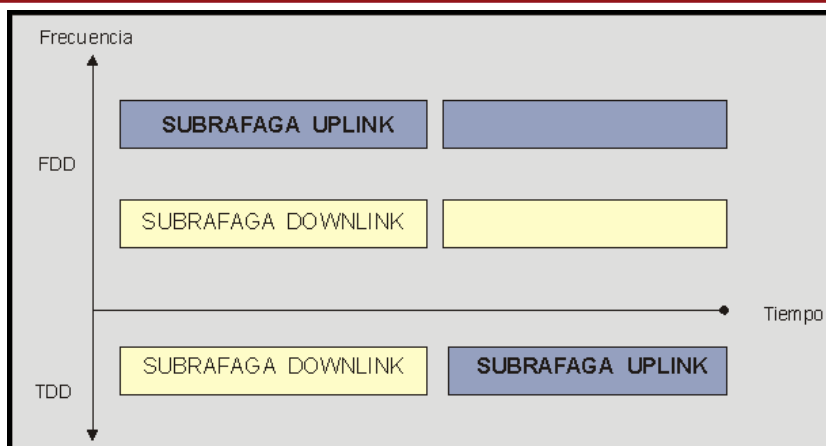
**FIGURA 1.12: TIPO DE MODULACION UTILIZADO EN TERMINOS DEL ALEJAMIENTO A LA ESTACION BASE**

Fuente: MTC-Osiptel. *Boletín Tecnológico sobre WiMAX*. Perú. 2006

### 1.2.3 Capas Física y MAC

#### 1.2.3.1 Descripción de la Capa Física (PHY)

En la capa física, el flujo de datos está formado por una secuencia de ráfagas de igual longitud. Los modos de operación FDD y TDD, se consideran tanto para Uplink (UL) como para Downlink (DL). En el modo FDD, las subráfagas de UL y DL, son transmitidas simultáneamente y sin interferencia, gracias a que éstas son transmitidas a distintas frecuencias. En el modo TDD, las subráfagas de UL y DL son transmitidas de manera consecutiva. Puede usarse 0.5, 1 ó 2 milisegundos como tiempo de ráfaga. En este modo las posiciones de DL y UL pueden variar. En la siguiente figura se muestra la secuencia de las ráfagas [3].



**FIGURA 1.13: SECUENCIA DE LAS RÁFAGAS**

Fuente: MTC-Osiptel. *Boletín Tecnológico sobre WiMAX*. Perú. 2006

El estándar IEEE802.16a/d define tres diferentes especificaciones para la capa física PHY que pueden usar en conjunto con la capa MAC para dar una confiable conexión extremo a extremo. Estas son las siguientes [3]:

- WirelessMAN-SCA: una interfase aérea de portadora única modulada.
- WirelessMAN-OFDM: de 256 portadoras multiplexación por división de frecuencia ortogonal.  
Para el múltiple acceso de diferentes estaciones abonadas (SS) empleando TDMA.
- WirelessMAN-OFDMA: un esquema 2048 portadoras OFDM. El acceso múltiple es proporcionado asignando un subconjunto de los portadoras a un receptor individual, así esta versión es referida a menudo como acceso OFD múltiple.

De estas, las dos últimas son las convenientes para usar en conexiones NLOS, debido a la simplicidad del proceso de ecualización para señales multiportadora. De las dos interfaces aéreas basadas en OFDM, la WirelessMAN-OFDM de 256 portadoras es favorable debido que en el proceso de cálculo de la transformada rápida de Fourier (FFT) se tiene una baja relación o tasa entre el promedio y el nivel pico y se tienen requerimientos menos estrictos para la sincronización de frecuencia, comparado con la otra OFDM.

Las 256 subportadoras están asignadas de la siguiente manera:

- 192 son usadas para datos del usuario
- 56 nulos por banda de guarda



· 8 usadas con símbolos pilotos permanentes

Para proporcionar robustez a los canales multidireccionales, se toman 8, 16, 32 o 64 muestras en ciclos prefijados, dependiendo del retraso de la difusión del canal. Una manera de asegurar la implementación global del estándar IEEE 802.16 ha sido el uso del canal de ancho de banda variable.

El ancho de banda del canal puede ser un entero múltiplo de 1.25MHz, 1.5Mhz y 1.75MHz con un máximo de 20MHz.

La capa física presenta las siguientes características:

- Modulación adaptiva y codificación.- El estándar IEEE 802.16d presenta siete combinaciones de modulación y rangos de codificación que pueden ser usados para alcanzar varios niveles en de la tasa de datos y en la robustez de la transmisión, dependiendo de las condiciones de canal y de la interferencia. Utiliza un bloque de código concatenado Reed-Salomon (RS) externo, con un código convolucional interno. El código RS externo está fijado por medio de un RS sistemático (N = 255, K = 239, T = 8). El código convolucional interno, tiene una longitud de 7, y un rango entre  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$ . Esta interpolación también se utiliza para reducir el efecto de ráfaga de error.[3]

**TABLA 1.6:** CARACTERÍSTICAS DE LAS MODULACIONES USADAS EN IEEE 802.16

Tipo de ID	Tipo de modulación	Codificación	Información bits/símbolo	Información de bits/símb OFDM	Tasa pico de dato a 5MHz (Mb/s)
0	BPSK	1/2	0.5	88	1.89
1	QPSK	1/2	1	184	3.95
2	QPSK	3/4	1.5	280	6.00
3	16QAM	1/2	2	376	8.06
4	16QAM	3/4	3	568	12.18
5	16QAM	2/3	4	760	16.30
6	16QAM	3/4	4.5	856	18.36

Fuente: MTC-Osptel. *Boletín Tecnológico sobre WiMAX*.Perú.2006

Una característica opcional del sistema es la codificación Turbo, la cual aumenta la cobertura, a un costo de aumentar la latencia de decodificación y su complejidad.

Los tipos de modulación permitidos para Uplink y Downlink son: BPSK, QPSK, QAM y 64-QAM. Además se conocen los preámbulos usados por el protocolo IEEE 802.16d, de tal manera que esto ayuda al receptor en la estimación del canal y con la sincronización. En el Downlink se tiene un largo preámbulo de dos símbolos OFDM los cuales son enviados para el inicio de cada cuadro. En el Uplink un corto preámbulo de un símbolo OFDM es enviado por el SS al inicio de cada cuadro.

- Códigos de bloque tiempo espacio. - STBCs (*Space-time block code*) es una característica opcional que se implementa en los downlinks con lo que se incrementa la diversidad. La aplicación de los códigos STBC Alamouti 2x1 o 2x2, no afectan el ancho de banda, de tal forma que proporcionan diversidad tanto en el tiempo y especialmente en el espacio. Al ser posible que el receptor cuente con dos antenas, éste hace una valorización de la señal transmitida teniendo como base la señal recibida, con esto y usando el código Alamouti, el desempeño de esta característica opcional será mejorada.
- Sistema de antena adaptiva.- Este protocolo presenta ciertas características que permiten el uso de sistemas con antenas inteligentes. En una comunicación punto a punto para la transmisión de uplink y downlink, se define una conexión entre la estación base (BS) y estación subscriptora (SS), y se le proporciona al SS un canal de realimentación a la BS. Los componentes reales e imaginarios del canal de respuesta para cada una de las ráfagas directas y subportadoras específicas provistos por la BS. La BS puede especificar la resolución en frecuencia dominante para esta realimentación. El estándar permite que los SS proporcionen la respuesta del canal para cada 4to, 8vo, 16vo, 32vo o 62vo subportadora.

### 1.2.3.2 Descripción de la Capa MAC (*Medium Access Control*)

Esta es la otra capa característica del protocolo IEEE 802.16, fue diseñada para accesos a las aplicaciones PtMP (Punto Multipunto) de banda ancha para altas tasas de datos y con una distinta variedad de requerimientos de calidad de servicios (QoS), por lo que está orientada a la conexión.

Lo que hace flexible a este sistema es que maneja algoritmos que permiten que cientos de usuarios finales puedan tener distintos requerimientos de ancho de banda y de latencia. Esta capa también se encarga de manejar la necesidad de tener muy alta tasa de bits, tanto para el uplink (hacia la BS) como para el downlink (desde la BS) por lo que el sistema incluye Multiplexación por División del Tiempo (TDM) de voz y datos. Asimismo soporta el protocolo de Internet (IP) y voz sobre IP (VoIP)[3].

El protocolo IEEE 802.16, debe soportar los variados requerimientos del backhaul, como el modo de transferencia asíncrono (ATM) y los protocolos basados en paquetes.

La capa MAC a su vez esta subdividida en tres subcapas: **Convergencia, Parte Común y Seguridad**. La principal de éstas es la subcapa de Parte Común ya que es en ella donde se maneja el ancho de banda, se establece la conexión, y se establecen las unidades de datos de protocolo(PDUs). También se encarga de hacer el intercambio de la unidad de servicios de datos de la MAC (SDU) con la capa de convergencia. Esta subcapa se encuentra fuertemente ligada con la capa de seguridad.

La subcapa de Convergencia es la encargada de adaptar las unidades de datos de protocolo de alto nivel al formato MAC SDU y viceversa. También se encarga de clasificar los SDUs de la MAC entrantes a las conexiones a las que pertenecen. La subcapa de Seguridad es la encargada de la autenticación, establecimiento de llaves y encriptación. Es en ella donde se realiza el intercambio de los PDUs de la MAC con la capa física [3].

- Formato de la PDU de la MAC.

La PDU de la MAC es la unidad de datos que intercambian la capa MAC de la BS y la del SS.

Consiste en una cabecera de MAC de longitud fija y una carga útil de longitud variable y un ciclo redundante de control (CRC). Dos formatos de cabecera son diferenciados

por el escudo HT, una cabecera genérica y una cabecera de requerimiento de ancho de banda.

Se utilizan tres tipos de subcabeceras de la MAC.

- Subcabecera de gestión de concesión. Es usada por la SS para transportar la gestión de ancho de banda necesaria por su BS.
- Subcabecera de fragmentación(fragmentation). Contiene información que indica la presencia y orientación en la carga útil de cualquier fragmento de SDU.
- Subcabecera de empaque(packing). Usada para indicar el empaquetamiento de múltiples SDUs en un único PDU.

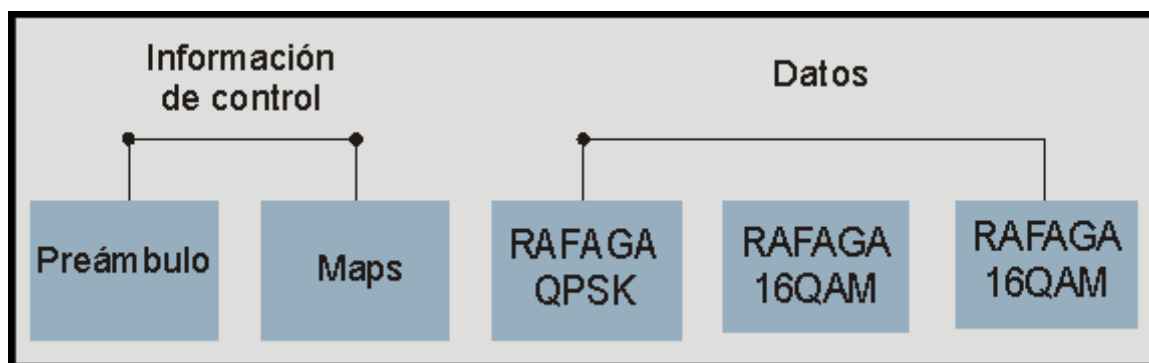
Las cabeceras de gestión de concesión y de fragmentación pueden ser insertadas en el PDU de la MAC inmediatamente después de la cabecera genérica, y así indica el tipo de escudo. La subcabecera de empaque puede ser insertada después de cada SDU de la MAC y es indicada por el tipo de escudo[3].

- Transmisión de los PDUs de la MAC.

La MAC del estándar IEEE 802.16, soporta varios protocolos de capas de alto nivel así como ATM o IP. Para maximizar el proceso haciéndolo flexible y eficaz, se incorporan los procesos de fragmentación y de empaque. El proceso de fragmentación es donde un SDU de MAC es dividido en fragmentos. Y el proceso de empaque es en el cual varios SDUs de la MAC son empaquetados en una sola carga útil de PDU de la MAC. Ambos procesos pueden ser usados tanto para downlink como para uplink. El estándar IEEE 802.16 permite el uso de ambos procesos simultáneamente para un eficiente uso del ancho de banda, y fue diseñado para poder soportar tanto FDD como TDD.

La MAC de la BS se encarga de crear una trama(frame) Downlink (subcuadro del TDD), empezando con un preámbulo que es usado para la sincronización y la estimación del canal. Una cabecera de cuadro de control (FCH) es transmitida después del preámbulo para el resto del cuadro. Esto es requerido debido a que la ráfaga es transmitida con diferentes esquemas de modulación y codificación. El FCH es seguido por una o múltiples ráfagas Downlink las cuales consisten de un número entero de símbolos OFDM.

La localización del perfil de la primera ráfaga de downlink es especificada en el cuadro prefijo del donwlink (DLFP),que forma parte del FDH. En la figura 1.14 se muestra la estructura de la subráfaga downlink TDD [3].



**FIGURA 1.14:** SUBRÁFAGA DOWNLINK TDD

Fuente: MTC-Osiptel. *Boletín Tecnológico sobre WiMAX*. Perú. 2006

La ráfaga de datos es transmitida en orden de decrecimiento de robustez para permitir que el SS reciba datos confiables antes de arriesgar un error de ráfaga que podría causar pérdida de sincronización. En el Downlink, una porción del TDM inmediatamente seguida del FCH es usada para UGS (*unsolicited grant service*), útil para aplicaciones constantes de tipo binario con estrictas restricciones de retardo como la VoIP. [3]

### 1.2.3.3 Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM).

Un avance que ayudó al desarrollo del protocolo IEEE 802.16, fue la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM). La modulación OFDM presenta muchos beneficios que no presentan otras modulaciones previas a ésta, y permite que las redes inalámbricas transmitan eficientemente en relativamente pequeños anchos de banda.

Esta técnica de transmisión se caracteriza por dividir la señal de banda ancha en un número de señales de banda reducida. La OFDM es un caso especial de la modulación multiportadora (MCM), en donde múltiples datos son transmitidos de manera paralela utilizando diferentes subportadoras con banda de frecuencias traslapadas ortogonalmente. [3]

En una modulación FDM convencional, los canales adyacentes se encuentran muy separados usando una banda de guarda. Para que los canales se puedan traslapar, se debe de reducir la interferencia entre los subcanales adyacentes, por lo que se

requiere la ortogonalidad. Que dos frecuencias sean ortogonales, significa que ellas son armónicas, es decir que las frecuencias siguientes son múltiplos de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, supongamos que **N** es el número total de portadoras del sistema, **f<sub>0</sub>** es la frecuencia fundamental de ellas, y **T** es el período de símbolo de cada flujo de datos. Entonces, las frecuencias de las **N-1** portadoras restantes vienen dadas por la relación:

$$f_k = f_0 + k/T, \text{ con } k = 1, 2, \dots, N-1$$

Las subportadoras son datos modulados usando:

- BPSK (*BiPhase Shift Keying*): Es una forma de desplazamiento de fase, en la cual dos bits se modulan inmediatamente, seleccionando uno de cuatro grados posibles de los desplazamientos de fase del portador 0, 90, 180, 270 grados.
- QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*): Es una forma de modulación en la que la señal se envía en cuatro fases, 45, 135, 225, y 315 grados, y el cambio de fase de un símbolo al siguiente codifica dos bits por símbolo. Una de sus principales ventajas es que ofrece la misma eficiencia de potencia, utilizando la mitad de ancho de banda.
- 16-QAM: Es una modulación digital en la que se tienen 4 fases y 4 amplitudes, de esta manera es como se tiene 16 símbolos.
- 64-QAM: Al igual que la 16-QAM, ésta es una modulación digital en la que se tienen 4 fases y en este caso 16 amplitudes. De esta manera es como se obtienen 64 símbolos.

En la respuesta espectral máxima de cada subportadora el resto de respuestas espectrales de subportadoras son idénticamente cero. Después de la modulación de datos los símbolos son alimentados a través de un proceso de conversión paralelo serie. A cada símbolo PSK o QAM es asignado una subportadora y una implementación DFT inverso (IDFT) para generar una señal de dominio en el tiempo. Un tiempo de guarda es introducido para eliminar la interferencia íter simbólica (ISI) causada por la extensión de retraso. Como regla, el tiempo de guarda es 2 a 4 veces mayor que la extensión de retraso esperada. Para reducir la interferencia entre portadoras, ICI, los símbolos de OFDM son cíclicamente extendidos en un intervalo de



guarda. Como el retardo es menor que el tiempo de guarda, este ciclo extendido asegura que un símbolo OFDM pueda tener un número entero de ciclos en el intervalo DFT.

Una característica del OFDM, es el superar los problemas de propagación que presenta el NLOS. Las señales OFDM tienen la ventaja de ser capaces de operar con retardos de la propagación en los entornos NLOS. Una ventaja muy importante es que es más sencillo modular señales portadoras individuales OFDM que modular una simple portadora ensanchada.[3]

#### 1.2.3.4 Utilización de Espectro Radioeléctrico

Si bien es cierto que existe el WiMAX Forum, como la entidad que se encarga de garantizar la interoperabilidad entre los equipos WiMAX, esto no implica que sea aceptada a nivel mundial. Un ejemplo de esto es que las bandas de frecuencia de radio varían según la región donde se encuentre. Es donde entran las autoridades de cada gobierno a jugar el rol de determinar el uso del espectro. Depende también de estas autoridades el que parte del espectro armonice a nivel mundial.

Existen bandas de frecuencia que pueden ser licenciadas o no licenciadas. Una empresa puede utilizar tanto un espectro licenciado o no licenciado, la diferencia entre uno y otro es que el espectro no licenciado es gratis, lo cual reduce el costo de usuario que utiliza un servicio, sin embargo no está libre de posibles interferencias entre empresas operadoras.

En el caso específico del estándar IEEE 802.16d, los enlaces se realizan en la última milla, es decir el sistema es una de naturaleza PtMP (Punto MultiPunto), y utilizan una arquitectura NLOS (no línea de vista) para la propagación de la información en una señal RF [3].

Actualmente el estándar está enfocado en porciones del espectro que están en el rango de 2 a 6 GHz, bandas centimétricas donde el rango de los anchos de banda asignados son estrechos en comparación con los anchos de banda asignados entre 10 a 60 GHz bandas milimétricas. Las bandas milimétricas al tener bandas más amplias acomodan mejor cantidades mayores de información. Por lo que estas son usadas

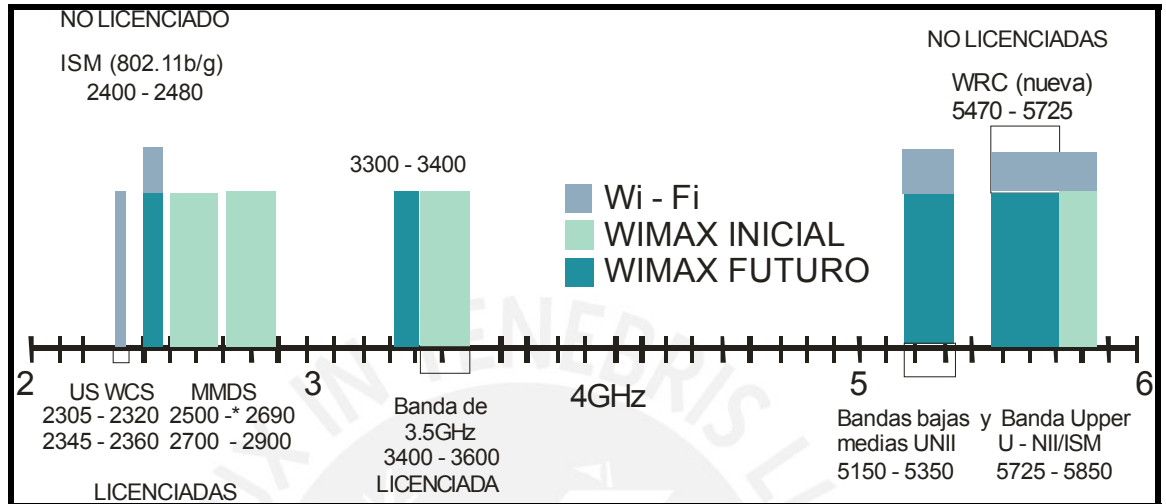
para líneas de vista (LOS) y tasa de datos mayores. Mientras que las bandas en centímetros tienen muy buen desempeño para multipuntos, NLOS y distribución en la última milla.

#### 1.2.3.4.1 Distribución de frecuencias

- Distribución de frecuencias en el rango de 2 a 6GHz
  - **3.5GHz.-** Esta banda es un espectro licenciado que está disponible en muchos países de Europa y Asia. Esta banda tiene un ancho de 300MHz para el rango de 3.3 a 3.6GHz, ofrece gran flexibilidad para un gran portador para los servicios de la WAN. Cabe destacar que en el Perú se encuentra disponible la banda de (3.4-3.6) GHz para servicios públicos.
  - **Bandas de 5GHz U-NII & WRC.-** La U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure), tiene las tres mayores bandas de frecuencia: Bandas U-NII bajas y medias (5150 – 5350 MHz), WRC (World Radio Conference) (5470 – 5725 MHz) y la banda superior U-NII/ISM (5725 –5850 MHz). WiFi opera en el rango de bajas y medias
  - **WCS (Wireless Communication Service).-** Presenta dos bandas angostas gemelas de 15MHz que van de 2305 a 2320 y 2345 a 2360MHz. El espacio entre estas bandas fue atribuido para la DARS (Digital Audio Radio Service), lo que puede ser una fuente de posibles interferencias causadas por las repetidoras terrestres. El uso de estas bandas requiere una excepcional eficiencia en el uso del espectro, como son ofrecidas por OFDM.
  - **2.4GHz ISM (Industrial, Scientific and Medical).-** La banda de 2.4GHz ISM es no licenciada y ofrece aproximadamente un ancho de banda de 80MHz. Esta banda es usada para WLAN.
  - **MMDS (Multichannel Multipoint Distribution Service).-** Este espectro incluye 31 canales separados 6MHz entre el rango de 2500 y 2690MHz e incluye al ITFS (Instructional Televisión Fixed Service). Se espera que esta banda tenga un significado comercial importante en los próximos años.

WiMAX Fórum se está enfocando en MMDS, la banda licenciada de 3.5GHz, y la banda no licenciada mayor de U-NII 5GHz., por presentar menor interferencia, razonables niveles de potencia y un adecuado ancho de banda. Esto podría ayudar a

que WiMAX tenga una alta tasa de crecimiento a nivel mundial, por presentar un gran potencial comercial y relativamente un bajo costo. En la figura 1.15 se muestra la utilización de bandas en WiMAX. [3]



**FIGURA 1.15: UTILIZACION DE BANDAS EN WIMAX**

Fuente: MTC-Osiptel. *Boletín Tecnológico sobre WiMAX*.Perú.2006

Asimismo, resulta interesante mostrar el espectro radioeléctrico en el Perú:

**TABLA 1.7: ESPECTRO RADIOELECTRICO EN EL PERÚ**

	2.3 GHz	2.4GHz	2.5GHz	3.5GHz	5.4GHz	5.8GHz
	WIMAX	WiFi	WIMAX	WIMAX	WiFi	WIMAX
Perú		Uso Libre		Licenciado	Uso Libre	Uso Libre

Fuente: MTC-Osiptel. *Boletín Tecnológico sobre WiMAX*.Perú.2006

## *Capítulo II*

### *Desarrollo de WiFi en zonas rurales*

#### **2.1 Situación actual de las zonas rurales**

Definición de área rural: Tradicionalmente, el término rural se aplica al campo o a zonas relacionadas con él. De acuerdo al INEI se entiende por áreas rurales a aquellos territorios conformados por centros poblados rurales (CPR); siendo un CPR " aquel que no tiene más de 100 viviendas contiguamente, ni es capital de distrito; o, que teniendo más de 100 viviendas, éstas se encuentran dispersas o diseminadas sin formar bloques o núcleos"[4]. Para el caso de la presente tesis, el término zona rural también se referirá a zonas donde no existen(o es muy precaria) instalaciones de telecomunicaciones debido a ciertos factores, que se detallarán más adelante, que hacen difícil el establecimiento de servicios de telecomunicaciones.

Un área rural presenta al menos una de las siguientes características:

- Escasez o ausencia de instalaciones públicas tales como electricidad, agua, acceso a caminos o medios de transporte.
- Condiciones topográficas difíciles. Ejemplo: lagos, montañas, desiertos. Los cuales son los causantes de que las redes cableadas sean tan costosas.
- Condiciones climáticas severas que pueden deteriorar los equipos.
- El nivel en la actividad económica es bajo. Este se basa en agricultura, artesanía o pesca principalmente.
- Nivel per cápita bajo.
- Las infraestructuras de índole social no están muy desarrolladas (salud, educación, etc.)
- Baja densidad poblacional.
- Tasas muy altas de llamadas por línea telefónica lo que refleja la carencia de servicio telefónico y el hecho de que un gran número de personas dependen de una sola línea telefónica en la mayoría de los casos.

Las características antes mencionadas hacen difícil proveer de servicios de telecomunicaciones de calidad aceptable; considerando además lograr precios accesibles y viabilidad comercial para el proveedor del servicio [5].

- Realidad actual

Debido al increíble número de zonas rurales en Sudamérica es que agentes internacionales multilaterales de desarrollo han querido dotar a estas zonas de conectividad a redes de voz y datos; partiendo de la hipótesis de que con acceso a información se puede dar desarrollo y una mejor calidad de vida a personas de esas zonas [6]. Sin embargo, no ha sido posible encontrar soluciones completamente satisfactorias (realistas y sostenibles tecnológicamente hablando) debido a que hay una serie de impedimentos en las zonas rurales como:

- No solamente se carece de infraestructuras de telecomunicaciones; también suele ser prácticamente inexistente o de mala calidad la infraestructura de electrificación y, en muchos casos las vías de acceso.
- Es difícil el dotar de alimentación eléctrica a las instalaciones de telecomunicaciones para así garantizar su funcionamiento; y la ausencia de vías de acceso también encarece y dificulta tanto el despliegue de redes como su mantenimiento.
- Puesto que el personal técnico calificado necesario para el mantenimiento y operación de estas tecnologías suele encontrarse en las ciudades, resulta caro y difícil contar con éste en estas zonas.
- Al ser los pobladores de esas zonas pobres y por tanto de baja capacidad adquisitiva no pueden soportar los costos de infraestructuras caras de instalar, mantener y operar [7].

También es una realidad el hecho de que los países de la región no están en condiciones de poder subvencionar la instalación de redes de comunicaciones rurales en pro de la cobertura total. Esto debido básicamente a su falta de recursos y a que las poblaciones rurales en el papel de poblaciones no contribuyentes representan una enorme proporción con respecto al total. Prueba de esto es que según el INEI las personas que viven en áreas rurales representan aproximadamente el 26% del total de habitantes del Perú [4].

Asimismo estas personas no cuentan con líneas telefónicas privadas, solo cuentan con teléfonos públicos en su mayoría.

- **Problema : necesidad de comunicación**

Entonces, dado que en el Perú existen muchos centros poblados rurales (alrededor de 80 mil según el INEI) es un hecho que gran cantidad de la población peruana se encuentra excluida de la Sociedad de la Información que se está creando en el Perú; entonces la idea es que estas personas logren integrarse ya que el acceso a la comunicación es un derecho universal, y solo así podrán progresar y desarrollarse [1].

## 2.2. Características de las soluciones tecnológicas

Por lo mencionado anteriormente es fácil de comprender por qué casi la mitad del mundo habitado se encuentra en esa situación de incomunicación. Ahora si lo que se quiere es dar una solución idónea a esa situación hay que tener en cuenta que las tecnologías TIC que se utilicen para que sean sostenibles en un contexto de zonas rurales para países en desarrollo tienen que tener una serie de requisitos los cuales se describen a continuación:

- Tiene que ser robusta y fácil de usar ya que los usuarios serán poco calificados y no contarán con asesoría técnica continua.
- Los equipamientos que se empleen deberán requerir el mínimo mantenimiento posible puesto que los técnicos especializados no se encontrarán en las cercanías de la zona. Asimismo, deberá ser mínima la necesidad de gestionar y administrar redes pues implicaría costos fijos importantes.
- Deberá tener un consumo relativamente bajo de energía porque debido a la común situación precaria de instalaciones de electricidad de las zonas rurales, se dependerá de fuentes de energías fotovoltaicas o eólicas las cuales encarecen las infraestructuras y aumentan los costos de mantenimiento.
- Tiene que ser **tecnología inalámbrica** ya que uno de los requisitos fundamentales es que tenga costos de despliegue y de operación muy bajos. Esto excluye las redes cableadas, las de telefonía móvil y las redes satelitales como soluciones únicas. Ocasionalmente, se puede plantear el acceso al



mundo de toda una red por estos medios, pero la distribución del acceso se tendrá que hacer con una tecnología complementaria más barata [7].

### 2.3 Uso de WiFi en zonas rurales

Como se explicó en el subcapítulo anterior hay una serie de requisitos que las tecnologías que se apliquen en zonas rurales deben de cumplir. Entre esas tecnologías factibles de aplicar está IEEE 802.11 más conocida comercialmente como WiFi.

Si bien este estándar no fue concebido para redes extensas[2], resulta muy atractivo para ser adoptado como solución tecnológica por sus ventajas de costo, uso de frecuencias libres de licencia y su relativamente gran ancho de banda el cual permite brindar servicios como VoIP e Internet. Es por eso que se trata de *adaptar* esta tecnología para largas distancias y para determinados escenarios en áreas rurales mediante antenas con mayor ganancia o empleando redes mesh [8]. Esto se verá en los ejemplos que se muestran en el subcapítulo siguiente.

Una pequeña muestra de lo dicho es el hecho de que la mayor parte de los países (incluido el Perú) han adoptado las restricciones de la FCC en cuanto al uso de la banda ISM. Como se puede ver en la tabla 2.1 estas normas son más permisivas que las europeas y permiten realizar en las zonas rurales enlaces PtP y PtMP de varias decenas de kilómetros [7].

Máxima potencia transmisible	Dominio Legal	Normativa
1000 mW	EE.UU y muchos países en desarrollo	FCC 15.247
100 mW	Europa	ETS 300 - 328
10 mW	Japón	MTP Ordinance for Regulating Radio Equipment, Article 49 -20

**Tabla 2.1:** Máxima potencia transmisible en 2.4 GHz

**Fuente:** [7]

De lo explicado líneas arriba se ve que lo que se intenta es *forzar* a la tecnología WiFi para que funcione en zonas rurales, es decir, intentar darle la forma para que le permita hacer enlaces largos e inclusive pueda ofrecer QoS para ciertas aplicaciones como VoIP mediante la aplicación de unos procedimientos técnicos al nivel de la capa IP [9]. En el transcurso de la presente tesis se detallarán y se dejará ver los aspectos positivos y negativos que traen consigo estas *adaptaciones* hechas para la tecnología WiFi a fin de que trabaje de la manera más óptima en zonas rurales.

A continuación se presentan algunos ejemplos de redes WiFi implementadas en el Perú extraídos de [7].

## **2.4 Aplicaciones de WiFi en zonas rurales**

En esta sección se presentan 2 redes WiFi instaladas en zonas rurales de la sierra y selva respectivamente. Estas infraestructuras de telecomunicaciones fueron implementadas por GTR-PUCP en el marco del programa EHAS con el propósito de permitir el desarrollo de servicios de formación a distancia y mejora de los procesos de vigilancia epidemiológica, gestión de medicamentos y transferencia de pacientes.

Cabe resaltar que este grupo GTR-PUCP a través de todos sus proyectos ejecutados ha logrado conectar alrededor de 100 comunidades rurales peruanas.

### **2.4.1 Red EHAS-@LIS**

La red EHAS-@LIS, la cual fue implementada en Cusco, utiliza la tecnología IEEE 802.11 en la modalidad de red tipo mallada o mesh. Esta red interconecta a 12 establecimientos de salud del MINSA ubicados en las provincias de Quispicanchi y Acomayo con la Red de Servicios Cusco Sur y el Hospital Regional del Cusco brindando servicios de telefonía IP, correo electrónico e Internet. Cabe resaltar que para realizar estas conexiones se realizaron enlaces PtP de hasta 42 km y enlaces PtMP de hasta 20 km para el cliente más alejado.

Este sistema de telecomunicaciones combina redes cableadas (Ethernet) con redes inalámbricas (WiFi). En cada establecimiento de salud se instaló una pequeña red (cableada e inalámbrica) para brindar dichos servicios. Estas pequeñas redes se interconectan entre sí a través de una red inalámbrica la cual está formada por repetidores ubicados en los cerros de Huiracochan, Josjohuarina, Don Juan, Laykatuyoc y Huáscar. Estos se eligieron por tener línea de vista directa con los centros/puestos de salud de su respectiva zona. Las estaciones cliente están formadas por los equipos y las redes cableadas e inalámbricas instalados en los establecimientos de salud indicados a continuación:

- |                  |               |
|------------------|---------------|
| 1. Red Sur Cusco | 7. Pomacanchi |
| 2. Urcos         | 8. Marcaconga |
| 3. Urcos         | 9. Sangrará   |
| 4. Ccatcca       | 10. Acomayo   |
| 5. Kcauri        | 11. Accos     |
| 6. Acopia        | 12. Pillpinto |

Cabe destacar que se utilizó el software Radio Mobile con el cual se evaluó principalmente la potencia de transmisión, la ganancia de las antenas y la altura de las torres para que no haya interferencia del terreno en el recorrido de la señal. En la figura 2.2 se muestra el diseño radio Mobile donde se pueden ver los puntos geográficos en mención y sus alturas con respecto al mar.

También se le proporcionan los servicios de VoIP y de Internet al Hospital Regional del Cusco mediante la instalación de una computadora, a través del repetidor allí instalado.

Los repetidores se encargan de interconectar las estaciones clientes y están ubicados en los cerros de Josjojahuarina (2 repetidores), Huiracochan, Don Juan, Laykatuyoc y Huáscar. Además se ha instalado una estación repetidora en el Hospital y la estación cliente de Marcaconga funciona como repetidor de la estación de Pomacanchi. En la siguiente lista se indican las estaciones repetidoras junto a sus respectivas estaciones clientes:

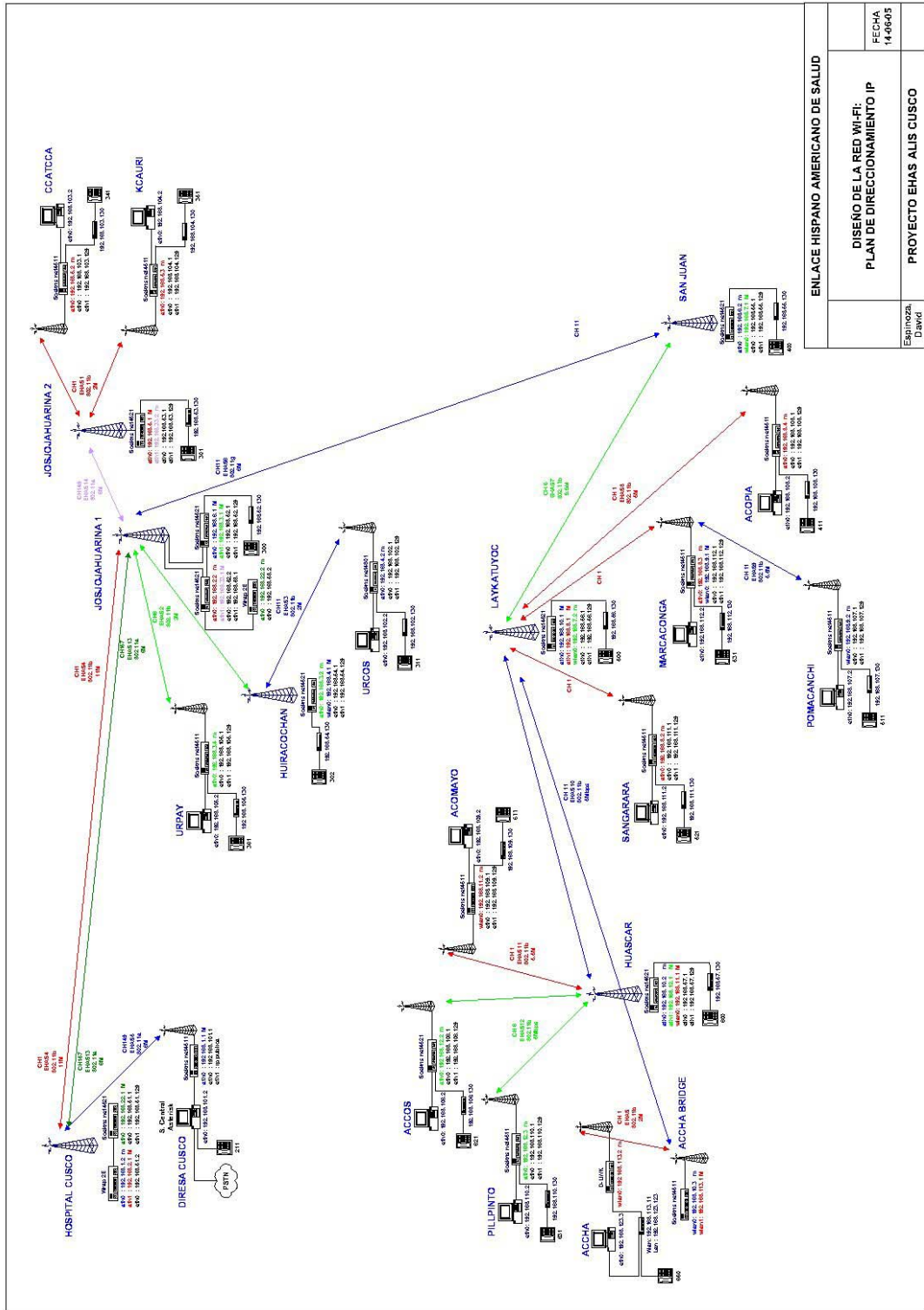
1. Hospital Regional Cusco (Red de Servicios Cusco Sur y teléfono IP del Hospital)
2. Josjojauarina1 (Ccatca y Kcauri)
3. Josjojahuarina2 (Urcos)
4. Huiracochan (Urcos)
5. Don Juan
6. Laykatuyoc (Pomacanchi, Acopia, Marcaconga y Sangrará)
7. Huascar (Acomayo, Acos y Pillpinto)

Cabe mencionar que a esta red le fue agregada una estación cliente ubicada en el centro de salud de Accha y si bien este cliente no pertenece al diseño original del proyecto @LIS (fue instalado por la cooperación de estudiantes de la UPC en Agosto de 2006) ha sido incorporado a la red en las mismas condiciones que los demás establecimientos. Para acceder a él fue necesaria la instalación de un repetidor adicional que se conecta a la red troncal a través del repetidor Huáscar. Por lo tanto la red queda conformada por 13 estaciones cliente y 8 repetidores.

Todo lo mencionado anteriormente se puede notar con mayor claridad en la Figura 2.1 donde además se muestra el direccionamiento IP para esta red.

Algunos datos importantes sobre la red:

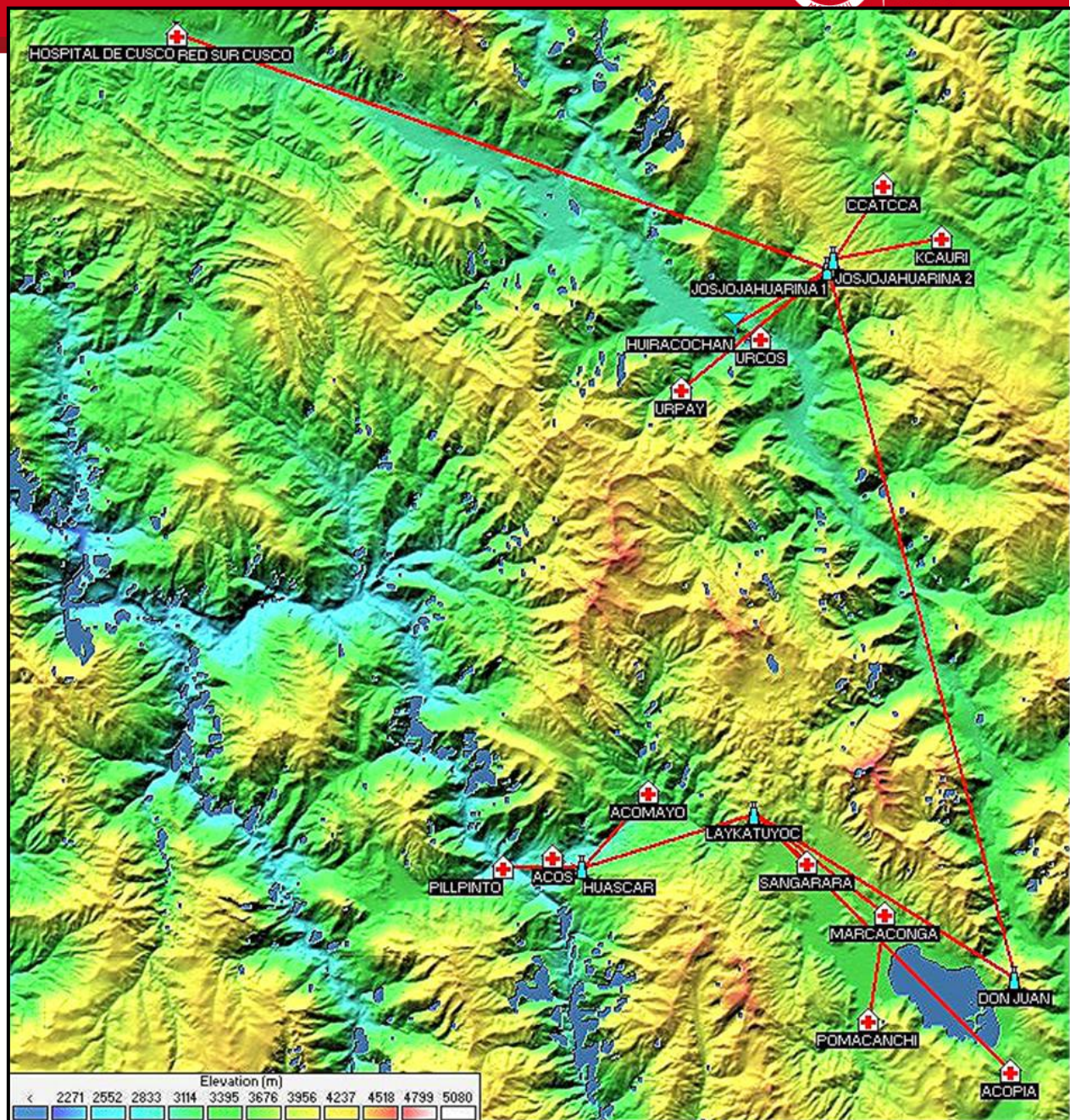
- El enlace más largo es de 42 km para el caso de PtP y para PtMP tiene una longitud de hasta 20 km.
- Se modificaron parámetros de la capa MAC de 802.11.
- El throughput promedio entre los nodos fluctúa entre 122 a 181 kbps de 2 Mbps.
- En el caso de los enlaces PtP donde los nodos se encuentran a más de una salto de distancia, se observó que el throughput efectivo corresponde al enlace más restrictivo en términos de ancho de banda entre esos 2 puntos.
- En cuanto a los enlaces PtMP se observó que el throughput entre clientes es aproximadamente la mitad del enlace más restrictivo.
- Los usuarios finales reciben alrededor de 50 kbps correspondiente al tráfico de Internet. En cuanto al servicio de VoIP, se detectaron problemas de retardo por lo que se planteó la idea de implementar un modelo de QoS. Asimismo, clientes conectados a enlaces PtMP experimentaron este tipo de problemas con mayor frecuencia debido a problemas de protocolo en la capa MAC.
- Tras la culminación de la red y después de realizar varios análisis de rendimiento se vio la necesidad de mejorar el caso de los enlaces PtMP así como también la necesidad de implementar un modelo de QoS( ya que 802.11b no lo soporta ) a fin de proporcionar verdaderamente comunicaciones en tiempo real(VoIP, videoconferencia).



ENLACE HISPANO AMERICANO DE SALUD	
DISEÑO DE LA RED WI-FI: PLAN DE DIRECCIONAMIENTO IP	
EMPRESA:	David
FECHA:	14.06.05
PROYECTO EHAS ALIS CUSCO	

**FIGURA 2.1: DIRECCIONAMIENTO IP DE LA RED EHAS@LIS**  
Fuente: [7]



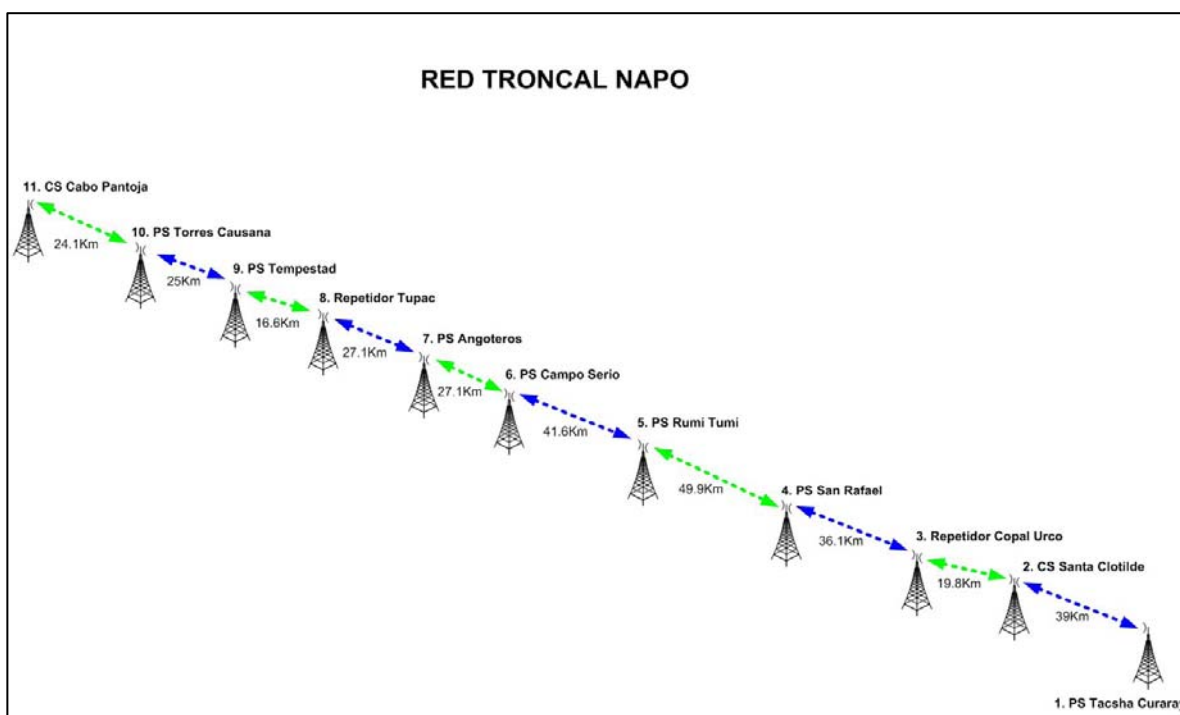


**FIGURA 2.2:** DISEÑO RADIO MOBILE DE LA RED EHAS-@LIS  
Fuente: [7]



### 2.4.2 Red WiFi PAMAFRO EHAS

En el marco del “Proyecto de Control de la Malaria en las zonas fronterizas de la Región Andina: Un Enfoque Comunitario – PAMAFRO” se desplegó una red en 2007 en la micro red de salud del Napo, ubicada en el departamento de Loreto, en la selva amazónica peruana. Esta red está compuesta por 11 establecimientos de salud a lo largo de una jurisdicción de 2 distritos, Napo y Torres Causana. Esta micro red está administrada por congregaciones sacerdotales desde hace más de 20 años y recientemente tiene apoyo del MINSA.



**FIGURA 2.3: REPETIDORES QUE CONFORMAN LA RED TRONCAL NAPO**  
**Fuente: [7]**

La red de telecomunicaciones se basa en el uso del estándar 802.11g en 2.4GHz de la banda ISM. En los 11 poblados, que forman parte de la red inalámbrica, se encuentran dos tipos de estaciones: estaciones cliente y repetidores. La estación repetidora se encuentra instalada en las torres y la estación cliente se encuentra instalada en el establecimiento de salud excepto en Copal Urco (en el botiquín comunal) y Túpac (en la escuela). Los 11 poblados mencionados son:

- |                   |              |
|-------------------|--------------|
| 1. Tacsha Curaray | 7. Angoteros |
| 2. Santa Clotilde | 8. Tempestad |
| 3. Copal Urco     | 9. Túpac     |

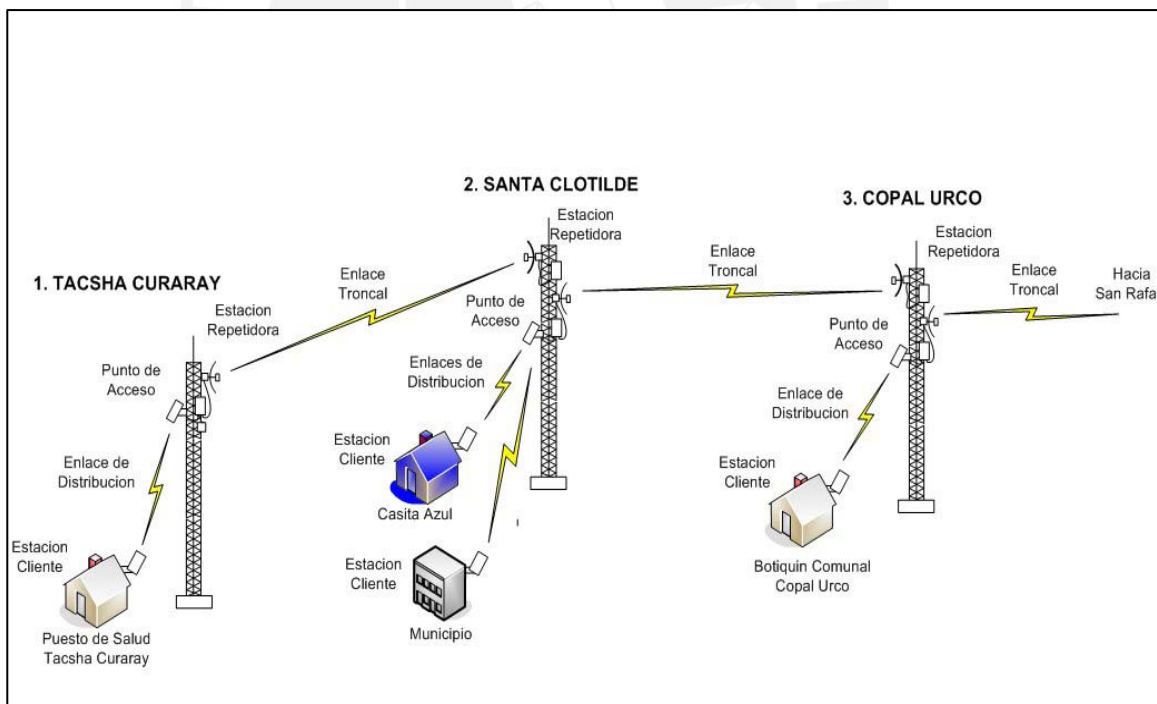
- 4. San Rafael
- 5. Rumi Tuni
- 6. Campo Serio
- 10. Torres Causana
- 11. Cabo Pantoja

Los enlaces que interconectan las estaciones repetidoras formando la red troncal, se presentan en la Figura 2.3, donde se indica también la distancia que los separa. Esta red troncal es la encargada de transportar el tráfico de datos generado por las comunicaciones entre las estaciones cliente.

Asimismo, en cada poblado existe un enlace inalámbrico entre la estación repetidora y la estación cliente, que permite a las estaciones clientes acceder a la red troncal.

Los enlaces entre las estaciones repetidoras (ubicadas en las torres) y las estaciones clientes (ubicadas en los puestos de salud) son llamados red de distribución. Por lo tanto, los repetidores que se encuentran en cada torre forman parte, a la vez, de la red troncal y la red de distribución, como se aprecia en la Figura 2.4.

**FIGURA 2.4: ESQUEMA DE LA RED TRONCAL Y RED DE DISTRIBUCIÓN**



Fuente: [7]

## 2.5 Observaciones

- Las redes implementadas utilizan una tecnología que si bien es una alternativa tecnológica interesante para áreas rurales, por temas de costo y porque trabaja en la banda ISM que es libre, ésta no fue creada para este tipo de aplicaciones. El estándar 802.11 fue creado para ambientes *indoors*; por lo tanto lo que se está haciendo es una *adaptación* de esta tecnología. Por este hecho es que se trata de una solución limitada ya que no soporta calidad de servicio(QoS), importante para aplicaciones en tiempo real.

- En la red Cusco el throughput promedio no alcanza para soportar más aplicaciones. Éste solo es el estrictamente necesario para el browsing y VoIP (con best-effort). [9]

- Ya que el protocolo WiFi no soporta QoS [2] no se puede asegurar buena calidad para el servicio de VoIP ni tampoco otros servicios como videoconferencia (el cual sería muy útil para telemedicina), e-learning, entre otros. [9]

Se ha demostrado empíricamente que se necesita más información e investigación acerca de utilización del estándar 802.11 para largas distancias. Recordar que esta tecnología no fue creada para este tipo de aplicaciones. Tal como se expresa en [8].

- La performance de WiFi para grandes distancias disminuye con la distancia debido a un exceso de colisiones. Este hecho se acentúa en enlaces PtMP[1]. Más acerca de las limitaciones del estándar 802.11 para enlazar grandes distancias se verá en el siguiente capítulo.

A pesar de todas las falencias que se presentaron en la implementación de estas dos infraestructuras es un hecho que el empleo de la tecnología WiFi *adaptada* ha servido para proveer comunicaciones para las zonas rurales antes mencionadas y así se demuestra que es una alternativa más para dar solución al problema de incomunicación y exclusión de este tipo de escenarios.

## Capítulo III

### *Evolución de las Telecomunicaciones Rurales*

#### 3.1 Acceso Universal y Telecomunicaciones Rurales en el Perú

- Definiciones

El **Acceso Universal** a las telecomunicaciones se puede definir como el acceso al servicio de telecomunicaciones básico (de voz) y sería la definición que más se ajusta a las decisiones de políticas en los países en desarrollo donde la penetración telefónica rural es baja [10].

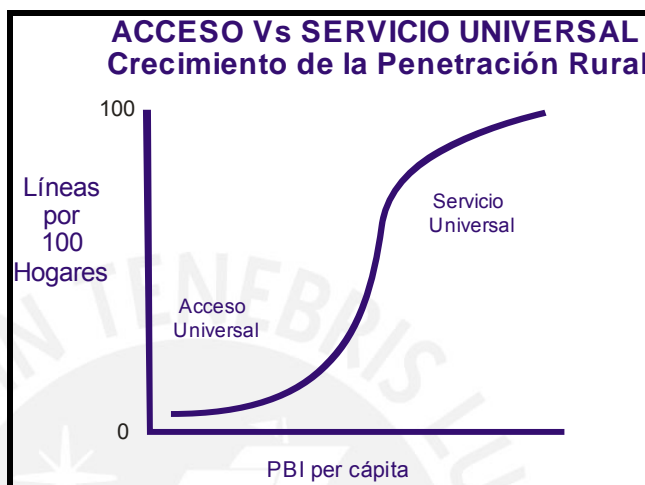
La idea sustancial detrás de este concepto es que se busca priorizar la cobertura geográfica del servicio antes que el nivel del mismo a brindar. Se busca primero alcanzar una cobertura adecuada al escenario y luego pensar en los servicios que se pueden brindar.

Por otro lado, existe otro concepto llamado **servicio universal**. Si bien la definición de este término es tratada de manera diferente en los distintos países de acuerdo a sus decisiones políticas nacionales, este nace de un principio fundamental: el de todo poblador a acceder a por lo menos un servicio básico de telecomunicaciones. En este sentido, el **servicio universal** lo entendemos como el uso del servicio de telecomunicaciones no solo básico de voz sino también de los diferentes niveles de servicios avanzados.

Estos dos términos nacieron en Estados Unidos y fueron usados indistintamente en el contexto de un país desarrollado. Sin embargo, estos 2 conceptos, los cuales se refieren esencialmente al nivel de penetración y al grado económico alcanzado en los países, tienen denotaciones diferentes en un contexto mundial las cuales se definieron anteriormente [11 y 12].

El alcance de “acceso universal” y “servicio universal” dependerá de las características socio económicas de cada país de acuerdo al grado de desarrollo e integración alcanzado por ellos. En los países en desarrollo (como el Perú) donde el desarrollo económico y la penetración telefónica es mucho menor, la decisión del **servicio universal** y por tanto la política de telecomunicaciones asociada a ésta resulta ser una decisión de **acceso**

**universal** ya que no está asociada a definir el “nivel de servicios accesibles” sino a la definición de ‘acceso al servicio’ vinculado a la mayor cobertura geográfica del servicio unida a ciertos criterios de equidad distributiva. El gráfico siguiente puede ayudar a comprender la idea de acceso y servicio universal:



**FIGURA 3.1: ACCESO VERSUS SERVICIO UNIVERSAL**  
Fuente: [12]

Para que un país pueda hacer una política a seguir en el sector Telecomunicaciones es necesario que defina tanto el acceso como el servicio universal de acuerdo a su realidad; para lograrlo necesitará analizar 5 componentes :

Segmentos de clientes a los que puede dirigirse el servicio, niveles de servicio, acceso geográfico, acceso equitativo y capacidad de acceso.

Es importante señalar que las definiciones varían con el tiempo y el lugar de acuerdo al nivel de desarrollo del sector de Telecomunicaciones y del país [12].

- Realidad nacional

A partir del año 1993 el desarrollo de la infraestructura del país cobra una importancia visible en la política del gobierno. Como parte de este renovado interés, se dictaron medidas para impulsar su expansión, tales como la dación del marco regulatorio del sector y la privatización de los servicios públicos de telecomunicaciones (mayo, 1994). El atraso en el que se encontraba el Perú hasta antes del 93 era básicamente debido a su

orografía, desigual distribución de la población dentro del ámbito rural además de la crisis económica que experimentó.

El Sector entró en reestructuración para mejorar la situación definiéndose un nuevo marco regulatorio para que el sector privado nacional y extranjero invierta en el desarrollo de las telecomunicaciones y **el Estado** se reserve el rol de **regulador**. Los principales objetivos de la regulación eran: expandir y mejorar la calidad de servicio, promover inversión privada, pasar del monopolio a la libre competencia, **desarrollar las telecomunicaciones rurales** (ampliando la cobertura en esas áreas), nuevas tarifas y contribuir a la economía.

En la legislación peruana de telecomunicaciones se contempla el concepto de 'acceso con equidad' como una forma de definir el acceso universal. La ley de telecomunicaciones señala que:

“Toda persona tiene derecho a usar y prestar servicios de telecomunicaciones en la forma señalada por las disposiciones que la regulan” (art. 3)

y que:

“Las telecomunicaciones se prestan bajo el principio de servicio con equidad. El derecho a servirse de ellas se extiende a todo el territorio nacional promoviendo la integración de los lugares más apartados de los centros urbanos” (art. 5)

El gobierno a través de OSIPTEL es el encargado de atender las necesidades de servicios de telecomunicaciones de los centros poblados más pobres para solucionar el problema generado por la escasa comunicación y el fuerte grado de aislamiento en que se encuentra para así **poder integrarlos a la economía nacional y que sean partícipes de los beneficios que traen las telecomunicaciones [13]**. Asimismo, mediante Fitel se busca financiar servicios de telecomunicaciones en áreas rurales y en lugares considerados de preferente interés social. Osiptel tiene la función de administrar este fondo, seleccionar proyectos a ser financiados por este y finalmente presentarlos al MTC para su aprobación. En cuanto a la estrategia de acceso universal que sigue actualmente el país para las telecomunicaciones rurales, ésta tiene como características:



a) maximizar la eficiencia económica en un contexto de equidad, b) promover la competencia, la inversión privada y el acceso de la población de las zonas rurales y c) maximizar el impacto social, para lograrlo es necesario contar con una serie de criterios para usar los recursos de la mejor manera. Estos son: selección de beneficiarios, nivel de cobertura geográfica, determinación del nivel mínimo de servicio, focalización del financiamiento (se refiere básicamente a qué subsidiar).

Cabe señalar que la Gerencia OSIPTEL-Fitel considera necesario que los proyectos de mediano y largo plazo para zonas rurales y de preferente interés social tengan servicios de valor añadido (telemática, teleeducación, telemedicina, etc) [12 y 13]

### 3.2 Necesidad de la banda ancha en zonas rurales

Más de 2.5 billones de personas-casi el 40% de la población mundial- viven en áreas remotas y aisladas de países en desarrollo. De los pocos que tienen acceso a las telecomunicaciones, tienen a la radiodifusión y a la telefonía por voz como los únicos servicios provistos en la mayoría de los casos. Actualmente, existe una amplia variedad de aplicaciones en telecomunicaciones como e-mail(correo electrónico), e-commerce (comercio electrónico), tele-education(educación a distancia), telehealth(TIC al servicio de la salud), telemedicina, entre otros; la cual hace ver la importancia que tiene el acceso a servicios interactivos y en tiempo real en comunidades rurales y no solo la conectividad por voz. En el mundo actual, este tipo de aplicaciones presuponen banda ancha y esta es una tendencia que se intensifica tal como hace referencia [14].

Ya que cada comunidad rural requiere de una diferente combinación de voz, texto, imagen, video y audio en sus comunicaciones para satisfacer mejor sus necesidades es crucial que los operadores sean capaces de dar esta gama de servicios, aplicaciones y niveles de ancho de banda apropiados a un costo razonable.

El Grupo 7 de la UIT encontró que el Internet es la plataforma más usada para llevar aplicaciones multimedia en áreas rurales de países en desarrollo. La importancia actual del internet está en que tiene el potencial para mejorar el flujo de recursos económicos y educacionales entre las comunidades rurales y las ciudades. Como se mencionó anteriormente entre las áreas de aplicación para Internet están: telemedicina, educación en salud pública, educación, y también ayudaría a mejorar los servicios del gobierno para los agricultores [5].

Por otro lado, es evidente que la necesidad de instrucción básica, habilidades computacionales y entrenamiento en el uso de las aplicaciones de las TIC representa un reto importante para las áreas rurales. Asimismo, se ha demostrado que el lenguaje y la complejidad en el manejo de computadores personales son algunas de las causas que retrasaron la difusión del Internet en zonas rurales. Por eso a través de muchos esquemas y técnicas (correo de voz, traducción de contenido) se ha intentado vencer estas barreras lográndose resultados que demuestran que el analfabetismo y lenguajes foráneos no son barreras totales contra el uso de servicios TICs [5].

Por lo visto en un subcapítulo anterior está claro que se puede aplicar el principio de acceso universal a la banda ancha puesto que: La banda ancha ofrece diferentes formas de comunicación debido a las aplicaciones que la usan y, lo más importante, porque es una forma extraordinaria y potencialmente igualitaria de acceder al conocimiento. Es por eso que la banda ancha puede ser pensada a la luz del mencionado principio.

Entonces hablar de una verdadera revolución en el mundo rural en materia de acceso a servicios de telecomunicaciones a través de la banda ancha conllevaría a un enorme impacto en el desarrollo productivo del país.

Por lo escrito líneas arriba acerca de las aplicaciones multimedia que se podrían emplear en zonas rurales y esto agregado al hecho de que la telefonía IP implica menores tarifas vemos que la banda ancha resulta ser, en efecto, una alternativa más que interesante para lograr un desarrollo económico-social en las zonas rurales.

Es importante señalar que es necesario un mayor compromiso (el cual el Estado debe propiciar) por parte del sector privado y visión de largo plazo que contemple la creación de demanda en zonas que actualmente presentan bajo tráfico pero alto potencial de crecimiento [15].

### 3.3 Tecnologías aplicadas en zonas rurales

En esta sección se presentará una lista de algunas de las tecnologías inalámbricas utilizadas en zonas rurales tomando como base [7].

Se darán principalmente concepciones generales acerca de cada una indicando además las ventajas y desventajas que presentan de acuerdo a su flexibilidad e idoneidad para su uso en zonas rurales.

#### 3.3.1 Conexión satelital (VSAT)

El mercado de las telecomunicaciones satelitales bidireccionales de voz y datos está prácticamente copado en Hispanoamérica por una única tecnología: VSAT (Very Small Aperture Terminals). Las redes VSAT son redes de comunicación de datos vía satélite para el intercambio de información punto-punto, o punto-multipunto (broadcast o interactiva).

El componente principal de este sistema es el hub, que es la estación central terrestre de la red. Éste permite realizar la comunicación entre dos terminales VSAT, es decir, que todo intercambio de información tiene que pasar por el hub. Esta estructura de red logra que las estaciones terminales sean simples, baratas y fáciles de instalar.

Las antenas usadas tienen un diámetro relativamente pequeño (menores de 2.4 m, típicamente 1.3 m) y los sistemas un bajo consumo de energía. Con esta tecnología se consiguen diseñar redes muy densas con altas velocidades de transmisión si hay pocos usuarios conectados simultáneamente, permitiendo la transferencia de voz, datos y vídeo. Normalmente se contratan enlaces asimétricos, con mayor capacidad en el enlace de bajada para el usuario. Últimamente, muchos sistemas VSAT están utilizando el protocolo DVB-RCS como plataforma de soporte para el acceso bidireccional a Internet en emplazamientos aislados, con lo cual se

consigue un mayor ancho de banda. Sus ventajas e inconvenientes se presentan a continuación:

### Ventajas:

- Gestión centralizada de la red, lo cual simplifica los terminales de usuario.
- Servicio independiente de la distancia.
- Cobertura global e inmediata.
- Fácil y rápida implantación en lugares de difícil acceso.
- Los enlaces asimétricos se adaptan a los requerimientos de transferencia de datos entre una estación central que transmite mucha información a estaciones lejanas que responden con poca información (si es que responden).
- Facilidad de reconfiguración y de ampliación de la red. El uso de un satélite hace que se pueda establecer contacto con cualquier punto dentro de su área de cobertura con lo que los receptores pueden cambiar de ubicación sin más cambio que la reorientación de su antena.
- Del mismo modo, la introducción de un nuevo terminal no afecta significativamente al funcionamiento de los demás.
- Se suele diseñar para tener una disponibilidad de la red del 99.5% del tiempo y con una BER (Bit Error Rate) de  $10^{-7}$ .
- Estabilidad de los costos de operación de la red durante un largo periodo de tiempo. Una organización puede ser propietaria de prácticamente todos los segmentos de la red. Esto hace que el presupuesto dedicado a comunicaciones se pueda establecer con gran exactitud. El único segmento del que la organización no puede ser propietario es el segmento espacial, pero sus precios son muy estables.
- Evita las restricciones que impone una red pública en cuanto a costos y puntos de acceso.

### Desventajas:

- Las inversiones iniciales son elevadas y en algunos países no son claramente competitivas frente a redes basadas en recursos terrestres. Este problema puede ser atenuado recurriendo al alquiler del hub. Esto sólo es viable para

muchos usuarios, prácticamente de cobertura nacional, por lo que sólo puede ser asumido por una organización con gran capacidad económica.

- El punto más crítico de la red está en el satélite. Toda la red depende de la disponibilidad del transpondedor. Si éste pierde la conexión, toda la red pierde la conexión con él. Aún así, el problema no es muy grave si la empresa proveedora del servicio dispone de más de uno (cambio de frecuencia de uso de los terminales). En caso de perder la conexión a todo el satélite bastaría con reorientar las antenas a otro satélite.
- Como todo sistema basado en satélites, es sensible a interferencias provenientes tanto de la tierra como del espacio.

### 3.3.2 VHF

Las redes privadas de comunicación de voz en banda VHF utilizan la banda de frecuencia de 30-300 MHz. En ellos se alcanzan distancias de enlace en torno a los 70 Km, limitados por la potencia de transmisión y la altura de las antenas. Éstas deberán compensar la curvatura de la tierra y salvar los obstáculos que se presentan en el camino, aunque tiene bastante tolerancia a los mismos.

En la propagación directa desde la antena transmisora a la antena receptora es recomendable que exista “línea de vista” entre ellas, es decir, que exista visibilidad óptica entre ambas. Sin embargo, se soportan obstáculos vegetales o invasiones no muy profundas de la línea de vista por elevaciones del terreno.

El inconveniente de no lograr un enlace debido a obstrucción severa de la línea de vista puede superarse utilizando equipos intermedios o repetidores, usualmente ubicados en zonas elevadas, de forma que permitan la comunicación, a través de ellos, entre dos o más puntos que no tienen visibilidad directa. En Perú, por ejemplo, prácticamente toda la costa y toda la selva baja son apropiadas para la comunicación en VHF. Además, incluso en los valles serranos y/o corredores interandinos también es posible la comunicación en VHF, directamente o a través de repetidores.

Aunque esta banda está pensada solamente para la transmisión de voz y, por tanto, los equipos de radio se diseñan y fabrican para ese fin, mediante software se puede conseguir utilizar este medio para comunicaciones de datos. Existen diferentes tipos de herramientas software para la transmisión de datos. El más eficiente de ellos es el protocolo AX.25 que incluso permite instalar el protocolo TCP/IP sobre él. AX.25 es un

protocolo de nivel de enlace habitualmente usado por radio aficionados para bandas VHF/UHF y HF. Aunque la velocidad que se consigue es muy baja, apenas comparable a la velocidad de un módem telefónico, puede aumentar con la compresión que incorpora el sistema de correo, permitiendo utilizar aplicaciones de correo electrónico, mensajería y navegación (restringida) en Internet a velocidades aceptables.

Para poder ofrecer ambos servicios, se eligen radios VHF convencionales que se utilizan normalmente para voz, pero que, intermitentemente, pasan a intercambiar datos entre un ordenador cliente y su servidor de referencia.

A continuación se presenta un listado de las ventajas y desventajas que presenta esta tecnología.

#### **Ventajas:**

- Enlaces a largas distancias. Aunque requiere línea de vista pueden salvarse algunos obstáculos vegetales o no muy profundos. Estos enlaces suelen implicar menor número de emplazamientos aislados necesarios para conectar establecimientos.
- Fácil reutilización de frecuencias.
- Tecnología de radio muy conocida en los entornos rurales.
- La calidad de los enlaces es similar 24 horas al día al no verse especialmente afectada la propagación por los cambios climatológicos.

#### **Desventajas:**

- El uso de la banda VHF requiere de la obtención oficial de una licencia de servicio.
- Velocidades menores que para otras tecnologías como WiFi.
- Mayor consumo en torno a los 100 W en transmisión frente a los menos de 10 W requeridos para transmitir con una tecnología WiFi (considerando el consumo completo de un enrutador inalámbrico).
- Al requerirse potencias mayores, se tiene que proveer al sistema de paneles solares de superficie mucho mayor y baterías de mayor capacidad, lo que eleva su costo.
- Mayor costo: Una radio VHF tiene un precio en torno a 500 USD, frente a los 150 de una tarjeta WiFi.



### 3.3.3 HF

La transmisión en banda HF tiene un rango de frecuencias de operación de 3 a 30 MHz y permite comunicaciones de centenares y hasta miles de kilómetros. El método de propagación para la banda HF es el conocido por “Onda Ionosférica”, por el cual las ondas se transmiten y luego se reflejan hacia el punto de recepción. La propagación depende de las capas de la Ionósfera, que poseen un comportamiento aleatorio en cuanto a estructura y densidad, afectando directamente a las frecuencias de trabajo. Para tener en cuenta estas características y poder configurar los equipos a una frecuencia adecuada para las condiciones climatológicas, época, hora y lugar se determinan frecuencias mínimas.

LUF y máximas MUF de trabajo. Por debajo de la LUF no se podría realizar propagación por la Ionósfera, debido a que hay gran absorción y la señal quedaría enmascarada por el ruido, a frecuencias mayores de la MUF, las ondas atraviesan la ionosfera y no son reflejadas a la tierra.

Por el gran recorrido de las ondas, desde el punto de transmisión hasta el punto de reflexión (la Ionósfera está ubicada entre los 60 y los 500 Km sobre la superficie terrestre) y luego al punto de recepción, se producen considerables pérdidas en el espacio libre y además surge el desvanecimiento multirayecto de la señal.

Por lo tanto, los sistemas de radio de onda corta HF habilitan comunicaciones a través de terrenos planos, elevados o montañosos, sin la necesidad de dispositivos de retransmisión, como los repetidores.

Al igual que la banda VHF, la banda HF también está destinada a la transmisión de voz y por sus características no es recomendable para la transmisión de datos.

El canal HF tiene características (ruido, bajo ancho de banda, etc.) que hacen difícil trabajar con él, por lo que los módems de HF hasta ahora han sido extraordinariamente caros o muy lentos (típicamente de 100 a 300 bps para los de radioaficionados).

Para aprovechar el escaso espectro disponible, los canales suelen ser de 3 KHz y la modulación en banda lateral única, mucho menos robusta que la de FM y sometida además a desvanecimientos ocasionados por las incertidumbres de la propagación ionosférica.

La investigación en esta materia se ha dirigido al desarrollo de nuevos tipos de modulación, como OFDM y nuevos protocolos que han permitido alcanzar velocidades alrededor de los 2.400 bps al precio de una tarjeta de sonido.

A continuación se indican las ventajas e inconvenientes que presenta el uso de esta tecnología:

#### **Ventajas:**

- La distancia no es limitante, pueden obtenerse enlaces a distancias muy largas (miles de Km).
- Se pueden alcanzar lugares con ubicaciones complicadas sin necesidad de repetidores (ya que no es necesaria la visibilidad directa de las antenas).
- Es una solución viable para cualquier situación, ya que no requiere de estudios concretos de propagación.

#### **Inconvenientes:**

- Limitaciones técnicas por la baja velocidad obtenida.
- Enlaces de peor calidad con mucha variabilidad en cortos intervalos de tiempo. Además, sólo puede usarse a ciertas horas, dependiendo del canal, y con protocolos y modulaciones especiales.
- Entorno muy sensible a errores por los desvanecimientos ocasionados por las incertidumbres de la propagación ionosférica.
- Consumo de energía ligeramente mayor que VHF y mucho mayor que WiFi (normalmente se utilizan transceptores de 100 W)

#### **3.3.4 WiFi**

La familia de estándares IEEE 802.11 (802.11a, 802.11b y 802.11g), más conocida como WiFi (Wireless Fidelity), tiene asignadas las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) 902-928 MHz, 2.400-2.4835 GHz, 5.725-5.850 GHz para uso en las redes inalámbricas basadas en espectro ensanchado con objeto de lograr redes de área local inalámbricas (WLAN).

WiFi comparte la mayoría de su funcionamiento interno con Ethernet, sin embargo difiere en la especificación de la capa física (PHY) utilizando señales radio en lugar de cable y en su capa de control de acceso al medio (MAC), ya que para controlar el acceso al medio Ethernet usa CSMA/CD, mientras que WiFi usa CSMA/CA.

El gran ancho de banda (entre 1 y 11 Mbps para 802.11b y hasta 54Mbps para 802.11a/g) a un precio reducido, lo presenta como una de las mejores opciones para la transmisión de datos y redes de telefonía empleando VoIP (voz sobre IP).

No obstante, pueden ser utilizadas (bajo ciertas restricciones legales de potencia) en exteriores, si se introducen antenas externas, amplificadores adecuados, etc. Las regulaciones vigentes en Hispanoamérica permiten establecer enlaces de decenas de kilómetros a potencias muy bajas, con un ancho de banda mucho mayor que otras soluciones tecnológicas, lo que abre el camino a servicios como aplicaciones de tiempo real (con ciertas limitaciones). Como la comunicación punto a punto sólo puede darse entre estaciones con perfecta línea de vista, en muchos contextos, no suelen lograrse alcances mayores de unos 40 Kms. No obstante, pueden salvarse obstáculos con el uso de emplazamientos aislados intermedios o las propias estaciones cliente utilizadas como repetidores, para interconectar dos estaciones que se encuentren a una mayor distancia.

Las ventajas e inconvenientes que presenta el uso de esta tecnología se indican a continuación:

#### **Ventajas:**

- Uso de frecuencias sin licencia de las bandas ISM 2.4 / 5.8 GHz con ciertas limitaciones de potencia.
- Velocidades desde 1 hasta 54 Mbps, siempre teniendo en cuenta que el throughput neto obtenido está alrededor de un 50-70% de esos valores.
- Tecnología con estándar ampliamente conocido y fácil de configurar, lo que favorece los bajos costos de los equipos.
- Flexibilidad: un nodo puede adherirse a la red si puede ver a uno de los nodos vecinos (las zonas rurales aisladas normalmente no siguen una distribución geométrica ordenada alrededor de un punto central).
- Hardware fácilmente integrable en un sistema impermeable que soporte condiciones meteorológicas adversas.

**Inconvenientes:**

- Requiere línea de vista directa (esto podría elevar, en algunos casos, el número de repetidores necesarios aumentando demasiado el costo).
- Al ser una tecnología creada para redes de corto alcance (de área local), hay que solventar ciertos problemas relacionados con su utilización para distancias de decenas de Km.
- El número de colisiones aumenta en relación con el número de usuarios.
- Tiene un número limitado de canales no interferentes, 3 en 2.4 GHz y 8 en 5.8 GHz.

**3.3.4.1 Problemática del uso de WiFi para enlaces largos**

Dado que la que la tecnología WiFi fue en su inicio diseñada para redes locales, la mayor dificultad reside en su aplicación para largas distancias. Para analizar la problemática de esta tecnología para usarse en enlaces largos se utilizó fundamentalmente [1].

- **Capa Física**

Una cuidadosa revisión del estándar no deja entrever ningún elemento de la capa física que limite el alcance de las comunicaciones WiFi en términos de distancia si no es el balance de enlace. Los límites físicos de distancia alcanzable con WiFi dependerán, por lo tanto, de los siguientes parámetros:

- La máxima potencia que podamos transmitir (PIRE).
- Las pérdidas de propagación.
- La sensibilidad de recepción.
- La mínima relación señal a ruido que estemos dispuestos a aceptar como suficiente.

El propio estándar determina que los límites de potencia que se pueden transmitir dependen de la legislación que concierne a la banda de frecuencias ISM para cada región geográfica, éstas se mostraron en la Tabla 2.1.

Además, hay algunos aspectos de la capa física que deben ser tenidos en cuenta para obtener una mayor estabilidad en el enlace:

\*Velocidad. El protocolo IEEE 802.11 recoge distintas velocidades según el modo de funcionamiento: 1, 2, 5.5 y 11 Mbps para 802.11b; 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps para 802.11a; y el conjunto de todas las anteriores para el modo 802.11g. Estos modos usan diferentes tipos de modulación y codificación, de forma que cuanto mayor sea la velocidad, mayor es la potencia necesaria en recepción para mantener un enlace con una BER baja. *Esta potencia, llamada sensibilidad, obliga a usar velocidades bajas si se quiere lograr enlaces de larga distancia con una cierta estabilidad.* Hay que tener en cuenta que la banda ISM 2.4 GHz impone limitaciones en cuanto al nivel de potencia que es legal transmitir, es fácil comprobar que para *enlaces muy largos normalmente deben usarse las velocidades más bajas de 802.11b para tener estabilidad y buena calidad.*

La aparición de tarjetas con mejores sensibilidades o la tecnología 802.11g pueden ayudar a lograr velocidades mayores. Así, por ejemplo en el modelo de tarjeta Ubiquity SR2 802.11b/g de 400mW, la diferencia de sensibilidad entre el modo b en 1 Mbps y el modo g en 6 Mbps es de sólo 3dB.

Añadir también que en términos de estabilidad y prestaciones resulta mejor configurar la velocidad del canal a un valor fijo. La experiencia recomienda ser conservadores para soportar una cierta pérdida en el rendimiento del enlace que sin duda se va a dar con el tiempo por pérdida de alineación de las antenas, cambios climáticos y otros factores.

\*Fenómenos meteorológicos. En las zonas rurales es frecuente encontrar condiciones meteorológicas adversas. Aunque tradicionalmente se suele decir que las lluvias influyen “de forma sensible” a partir de los 10GHz, cuando los enlaces son muy largos una pequeña atenuación en dB/Km acaba siendo importante. Los estudios consultados no parecen conceder mucho peso a la atenuación de nubes y nieblas, pero todo depende de la distancia.

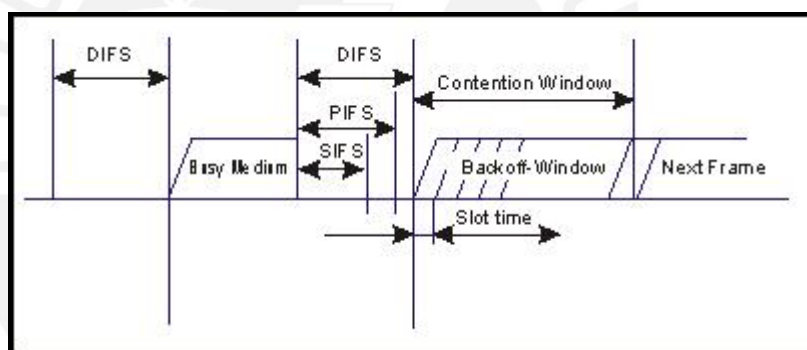
\*Polarización. El mejor comportamiento se da con polarización vertical, pero las condiciones atmosféricas y el terreno pueden producir una cierta

despolarización, con lo que la recepción de la señal empeora y su atenuación aumenta.

\*Interferencias. Si bien en las zonas rurales aisladas esto no suele suceder, los enlaces que conectan zonas aisladas con zonas urbanas se pueden ver afectados por este problema.

### • Capa MAC

Asimismo, aparte de las restricciones que impone el balance de enlace, también existen restricciones explícitas de distancia ya que los resultados lo demuestran y, además, porque la capa MAC tiene tiempos constantes definidos que tienen diferente efecto en función de la distancia que haya entre estaciones. Estos tiempos se pueden apreciar en la Figura siguiente.



**FIGURA 3.2:** ESQUEMA TEMPORAL DE FUNCIONAMIENTO EN EL NIVEL MAC  
Fuente: [7]

Tras una revisión cuidadosa del estándar IEEE 802.11 se pueden extraer tres tipos de limitaciones: el temporizador de espera de los ACKs, la definición de tiempos relacionados con el Slottime, y el cálculo del vector que se encarga de controlar el tiempo que se debe esperar cuando el canal está reservado para la detección de portadora virtual (NAV). Para mayor detalle consultar [1].

- ACKtimeout: Este parámetro se define en el texto del estándar como el tiempo en que la estación transmisora espera la llegada del ACK una vez que ha terminado la transmisión de un paquete. Entonces, para que una comunicación WiFi funcione a una determinada distancia se tiene que cumplir que el ACKtimeout sea mayor que el tiempo de propagación de ida y vuelta más el



SIFS; siendo este último un tiempo fijo que define la separación temporal entre la recepción del paquete de la transmisión de su ACK en el receptor. No obstante, el estándar no da un valor claro a este parámetro, y los equipos WiFi del mercado varían mucho en su implementación del ACKtimeout; algunos sistemas tienen un valor por defecto de aproximadamente DIFS+SIFS pero que se puede modificar, y otros tienen valores no modificables pero más grandes. DIFS es el tiempo que cada estación espera una vez que detecta que el canal ha quedado libre. Cuando una estación intenta enviar un paquete a otra que está demasiado distante como para recibir de ella el ACK antes de que transcurra el ACKtimeout, se interpretará que la transmisión falló y se retransmitirá; como lo mismo le sucede a cada retransmisión, cada paquete se retransmitirá el máximo número de retransmisiones antes de descartarse y dejar paso al siguiente. La capa WiFi de la estación transmisora “creará” que no logró mandar el paquete, pero de hecho lo probable es que hayan llegado correctamente varias copias de éste, de las que la primera se pasará a la capa superior en el receptor. El resultado es que el enlace funciona, pero con un rendimiento ínfimo debido a que todo se retransmite varias veces, por defecto 7.

- Slottime. Los valores de Slottime, SIFS y DIFS imponen restricciones al funcionamiento del MAC de WiFi a partir de ciertas distancias. El estándar prevé que las estaciones que transmiten son oídas por las otras dentro del mismo slot en que se ha producido la transmisión, lo cual impone un límite de unos **3 Km**. Más allá de esa distancia, las prestaciones de los enlaces empeoran con la distancia, aunque aún resultan utilizables si el número de nodos activos es suficientemente bajo.
- La vulnerabilidad con nodos ocultos. En IEEE 802.11 se emplea el mecanismo RTS/CTS para evitar colisiones entre nodos ocultos; no obstante, ese mecanismo funciona si el cálculo del NAV se corresponde con el tiempo que verdaderamente el canal va a permanecer ocupado. Puesto que el NAV no se calcula teniendo en cuenta el tiempo de propagación, a medida que la distancia aumenta su efectividad empeora; particularmente, en enlaces PtMP con distancias del orden de kilómetros, el RTS/CTS es prácticamente inservible, y no hay un mecanismo alternativo.

Como consecuencia de lo anterior, y dependiendo del tipo de enlace que define la arquitectura de red 802.11, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- PtP. Cuando la distancia es mayor de 3 Km, se incrementa proporcionalmente con la distancia, en saltos de 3 Km, el número de slots en que una estación puede empezar a transmitir y colisionar con un paquete cuya transmisión se inició en un slot determinado; esto tiene relativamente poco impacto cuando la carga ofrecida es baja, pero es importante cuando el enlace está próximo a la saturación, ya que en ese caso casi siempre hay un paquete listo para ser transmitido tan pronto como se considere libre el canal, y para ventanas de contención pequeñas la probabilidad de colisión será significativa. También será necesario cuidar el ajuste del ACKTimeout fijándolo a un valor ligeramente superior a dos veces el tiempo de propagación.
- PtMP. Además de darse las mismas anomalías de comportamiento del MAC entre la estación transmisora y receptora de un paquete que se han comentado para PtP, las otras estaciones que observan pasivamente el canal esperando que se desocupe tomarán decisiones equivocadas al considerar el canal libre cuando no lo está. Por ejemplo, si la distancia hace que los ACK se reciban más tarde que DIFS, la estación transmisora todavía podrá esperar por el ACK si el ACKTimeout es lo suficientemente grande, pero las otras estaciones cercanas a ésta que esperan a que el canal se libere optarán a ocupar el canal de inmediato, pudiendo colisionar con cierta probabilidad con el ACK que está en camino. Por lo que hay que fijar el ACKtimeout para el enlace más largo que conforme ese PtMP.

En definitiva, WiFi puede servir, aunque con cierta pérdida de prestaciones: para enlaces PtP de larga distancia si los equipos terminales permiten configurar el ACKtimeout y el Slottime; en cambio, para PtMP, aún modificando esos parámetros, el funcionamiento es notablemente peor a menos que la carga ofrecida y el número de nodos sean muy bajos.

### 3.3.5 WiMAX

IEEE 802.16, más conocido como WiMAX, es el fruto del trabajo realizado entre 2002 y 2005 en el IEEE para la definición de nuevas propuestas tecnológicas que permiten cubrir las lagunas de las redes inalámbricas de banda ancha. Es decir, posibilitar redes inalámbricas de altas prestaciones en áreas metropolitanas sin línea de vista; viabilizar la distribución de conectividad por medios inalámbricos a distancias del orden de decenas de kilómetros en zonas semiurbanas y rurales; soportar calidad de servicio (QoS) y usuarios con requerimientos de servicio heterogéneos.

El estándar IEEE 802.16d plantea dos rangos de frecuencias de funcionamiento de los equipos. Por un lado, las bandas licenciadas de 10 a 66 GHz proporcionan un entorno físico en el que debido a la reducida longitud de onda es imprescindible disponer de línea de vista. Se prevé su uso para proporcionar acceso en pequeñas oficinas y casas. Por otro lado, las bandas por debajo de los 11 GHz proporcionan un entorno físico en el que no es imprescindible disponer de línea de vista. El estándar proporciona soporte para escenarios con y sin línea de vista en dicha frecuencia. Se prevé su uso para proporcionar acceso en entornos metropolitanos así como en enlaces a gran distancia. De esta forma los proveedores de servicios podrán utilizar equipos que sigan este estándar (equipos WiMAX) para ofrecer acceso de banda ancha a redes IP con capacidades de hasta 120 Mbps a los abonados privados sin necesidad de llevar la red cableada hasta cada emplazamiento final.

IEEE 802.16-2004 se diseñó, al igual que el IEEE 802.11, de forma tal que su apariencia e interacción para con las capas superiores fuera la misma que la que presenta Ethernet; también al igual que toda la familia 802, define la capa PHY y la MAC.

Por otra parte, su funcionamiento es similar al de una red GSM, en la que una malla de estaciones base permite el acceso a múltiples usuarios, pudiendo manejar múltiples sectores independientes de forma simultánea.

Todas las comunicaciones tienen que pasar por una estación base, siendo imposible la comunicación directa entre dos estaciones suscriptoras. WiMAX es orientado a conexión, por lo que las estaciones suscriptoras deben solicitar servicio

a la misma. Cuando la estación base recibe una solicitud de incorporación de una nueva estación suscriptora calcula si es posible garantizarle un servicio mínimo manteniendo los compromisos con otras estaciones suscriptoras. Sólo en el caso de cumplir ambas condiciones se le concede el acceso, de forma que la estación base puede garantizar el servicio comprometido con todas las estaciones suscriptoras (throughput mínimo, retardo máximo etc.).

A continuación se indican las ventajas e inconvenientes que presenta el uso de WiMAX:

#### **Ventajas:**

- Fue creado y diseñado como estándar para redes metropolitanas **exteriores** desde su concepción.
- Su rango normal de operación se encuentra entre los 7 y los 10 Km, pero puede llegar hasta 50 Km sin modificaciones.
- No sufre el problema del nodo oculto, ni aumentan las colisiones con el número de usuarios, ya que la estación base va asignando slots a cada estación, evitando así las colisiones que conllevan a una importante pérdida de paquetes.
- No necesita línea de vista para realizar un enlace.
- Utiliza antenas inteligentes las cuales optimizan su patrón de radiación automáticamente en función de la demanda.
- Tiene la posibilidad de asignar diferente ancho de banda a cada canal de radio, desde 1.5 MHz a 20 MHz Esto permite la posibilidad de reutilizar frecuencias y de una mejor planificación de la celdas y hace que el número de canales no interferentes entre sí dependa únicamente del ancho de banda disponible.
- En una red WiMAX se puede proporcionar QoS, lo cual es muy importante para algunas aplicaciones (en tiempo real e interactivas por ej.) y para la gestión de las redes en general.

#### **Desventajas:**

- Los costos de las instalaciones están fuera del alcance de muchos entornos rurales (entre los 10000 y los 30000 USD por estación base), sin contar las antenas, las torres, etc.[7]

### 3.4 Aplicaciones de la Banda Ancha en zonas rurales

Cabe resaltar que para esta sección se extrajo casi toda la información de [5].

#### 3.4.1 Desarrollo comunitario y comercial

Se está realizando un gran progreso en el desarrollo comunitario y comercial mediante la introducción de la telefonía, telecentros, email y radiodifusión. Eventualmente se pueden desarrollar programas del tipo e-commerce (comercio electrónico) para así ayudar a artesanos de zonas rurales a vender sus productos y con esto mejorar la calidad de vida de estas personas.

Sin embargo, para que este desarrollo económico-social de las zonas rurales mediante aplicaciones TIC pueda suceder son necesarios 2 elementos: tiene que usarse el lenguaje local y contenido relevante a la situación en la que viven. Las tecnologías de la información tendrán un aporte importante solamente si la comunidad en sí está dispuesta a usarla para realizar sus objetivos sociales. Se pueden mencionar algunas aplicaciones puntuales para desarrollo comunitario y comercial : creación de sitios web con contenido local como páginas web para niños y jóvenes sobre últimas técnicas agrícolas, entrega de mensajes mediante radiodifusión a zonas sin servicio telefónico, difusión de información sobre programas del gobierno así como subsidios, mejora en la cooperación regional mediante intercambio de información entre estaciones de radio locales, mantener contacto con familiares y amigos en zonas urbanas; se podría navegar por internet para explorar nuevos mercados, comercio electrónico para artesanos locales, mejora en temas de logística(asuntos de entrega de algún tipo de bienes y pagos previos a un viaje), entre otros.

#### 3.4.2 Telemedicina

La motivación y el compromiso que existen hacia la implementación de la telemedicina en zonas rurales son muy fuertes. Esta motivación es frecuentemente respaldada por una disposición a invertir en sistemas que tengan como objetivo mejorar la situación de la salud de la gente así como aminorar costos médicos a largo plazo. Los servicios que la telemedicina trae consigo son percibidos como una necesidad en países en desarrollo no siendo



este el caso en países industrializados. Algunas aplicaciones que se podrían implementar en entornos rurales:

- Envío de información de salud preventiva a zonas rurales.
- Envío y manejo de información de pacientes usando bases de datos remotas (fichas médicas electrónicas).
- Acceso a médicos especialistas mediante teleconsulta.
- Teleradiología, ultrasonido remoto, electrocardiograma, etc.
- Clases a distancia desde centros médicos (e-learning).

### 3.4.3 Tele-educación (e-learning)

Como sabemos la instrucción básica y la educación son factores críticos para el desarrollo económico. Este es un término usado para referirse a una forma de aprender en la cual el instructor y el estudiante se encuentran separados tanto en tiempo como en distancia y la idea es que esta brecha sea suprimida mediante el uso de tecnologías de la información. Entre algunas aplicaciones que se obtienen de e-learning:

- Entrega de contenido multimedia a zonas rurales (DVD, video).
- Clases en línea mediante videoconferencia.
- Acceso bibliográfico en línea (Internet por defecto).
- Establecimiento de una red de educadores mediante email, foros, blogs.
- Rendición de exámenes vía email.

Como se ha visto a lo largo del presente capítulo, las telecomunicaciones tienen un rol importante en el desarrollo económico-social de la realidad rural en el país pues permite no solo la comunicación sino también el acceso a otros beneficios sociales como la salud y la educación. Así, resulta innegable que todos los ciudadanos, en atención al principio de acceso universal, tienen derecho a acceder a los servicios de telecomunicaciones en el territorio nacional. Es por ello que el Estado -a través de Osiptel como administrador de los recursos de Fitel- está asumiendo el papel subsidiario que le corresponde en las zonas rurales y áreas de preferente interés social, donde los mecanismos de mercado no responden. Es importante destacar que para alcanzar sociedades de la información no es suficiente garantizar el acceso a la infraestructura de las TIC, las personas también requieren capacidades para aprovechar la tecnología y convertir el acceso a la información en creación de conocimientos.

## *Capítulo IV*

### *Impacto de IEEE 802.16 sobre IEEE 802.11*

Para el desarrollo de este capítulo se empleará la herramienta analítica llamada Análisis FODA la cual permitirá evaluar de una manera más concisa ambas tecnologías inalámbricas: IEEE 802.16 y IEEE 802.11, a fin de poder determinar cuál de ellas resulta más adecuada para zonas rurales.

#### **4.1 Análisis FODA**

##### **Fortalezas de WiMAX**

- Permite conectividad de datos con QoS a largas distancias así como requerimientos de servicio (SLA).
- Estándar nativo para redes inalámbricas de banda ancha en áreas metropolitanas lo cual implica una capacidad para cubrir varios km sin línea de vista para zonas semiurbanas y rurales.
- Ofrece control sobre el reparto de prestaciones entre las distintas unidades suscriptores, mientras que WiFi no puede.
- Es capaz de ofrecer caudales hasta 4 veces mayores a cada usuario (en comparación con WiFi) y con retardos sensiblemente inferiores.
- Varias topologías y tecnologías de backhaul son soportadas por WiMAX.
- WiMAX ofrece mayor ancho de banda para grandes distancias que WiFi.
- Estaciones base se instalan rápidamente y los CPEs en menos de un día.
- Debido a su capa MAC es una tecnología apropiada para soluciones PtMP la cual es aplicable en zonas rurales.

### Oportunidades de WiMAX

- Dada la necesidad de conectividad inalámbrica para enlaces largos y conectividad de la última milla y ante las limitaciones que presenta WiFi, WiMAX se presenta como una tecnología más que atractiva en zonas rurales.

### Debilidades de WiMAX

- Se sabe que se tardará en disponer de soluciones WiMAX tan asequibles como lo son las WiFi, sobre todo en términos de **costo**.

### Amenazas de WiMAX

- Es previsible que, incluso en el largo plazo, WiMAX no cubra un escalón de costo y flexibilidad que podrá seguir cubriendo WiFi si se averigua lo suficiente de cómo usarlo en escenarios rurales.
- El mercado al que se dirige la tecnología WiMAX es el de nuevos operadores, los cuales podrán desplegar rápida y económicamente una infraestructura de la que carecen algunas zonas donde el despliegue de infraestructura fija puede ser muy caro o imposible. Esto parece pronosticar que la evolución en el tamaño de la oferta y en los precios va a ser lenta.

### Fortalezas de WiFi

- Usa las frecuencias de las bandas ISM (sin licencia) con ciertas limitaciones de potencia.
- Tecnología estandarizada y de fácil configuración lo cual favorece los bajos costos de los equipos.
- Bajo consumo de potencia, menor a 10 W por router.
- Flexibilidad: un nodo puede adherirse a la red si puede ver a uno de los nodos vecinos (las zonas rurales aisladas normalmente no siguen una distribución geométrica ordenada alrededor de un punto central).
- Hardware fácilmente integrable en un sistema impermeable que soporte condiciones meteorológicas adversas.

### **Oportunidades de WiFi (factores externos)**

- Se presenta como una buena alternativa para países en desarrollo por la abundancia de productos en el mercado, el bajo costo del material de recambio y fácil integración en toda clase de plataformas.
- En los países en desarrollo se muestra como una tecnología interesante ya que presenta costos muy reducidos y suele ser de bajo consumo además de usar una banda de frecuencias de uso libre.
- WiFi para distancias largas requiere el ajuste de algunos parámetros más allá de lo que permiten los estándares, algo que numerosos transceptores WiFi disponibles en el mercado permiten.
- Los precios actuales de WiFi le permiten mantener una posición de dominio en cuanto a los datos inalámbricos.

### **Debilidades de WiFi**

- La capa MAC presenta importantes limitaciones en enlaces largos (problema de distancia) así como también en enlaces PtMP.
- La tecnología WiFi no fue diseñada para rangos de aplicación propios de las redes metropolitanas y redes rurales extensas. Por este motivo hay que solventar ciertos problemas relacionados con su utilización para distancias de decenas de km.
- Las prestaciones disminuyen de forma importante con la distancia.
- No soporta QoS lo que dificulta prestaciones como VoIP y videoconferencia (fundamental para la telemedicina )
- Las soluciones para distancias largas son en su mayoría propietarias.( problemas de interoperabilidad y costos )
- El número de colisiones aumenta en relación con el número de usuarios.
- Tiene un número limitado de canales no interferentes, 3 en 2.4 GHz y 8 en 5.8 GHz.

### **Amenazas de WiFi (Factores externos)**

- La industria por una parte y los usuarios por otra han encontrado en ocasiones la

forma de obtener soluciones parcialmente adaptadas a las distancias largas empleando material WiFi pero modificando su comportamiento de forma no estándar.

- Para lograr comunicaciones en tiempo real es necesario QoS. Ninguna red inalámbrica con 802.11 soportará QoS completamente; pero se pueden usar ciertos procedimientos a nivel IP para diferenciar ciertos tipos de tráfico.

#### 4.2 WiMAX como solución tecnológica en zonas rurales

De lo visto en el subcapítulo anterior se corrobora que el empleo de la tecnología WiMAX, en comparación con WiFi, resulta más idónea para el despliegue de infraestructura de telecomunicaciones de banda ancha en zonas aisladas o deficientemente comunicadas como es el caso de las áreas rurales del Perú. Este hecho debido a que sus fortalezas superan a sus debilidades principalmente; en el caso de WiFi, se trata de una tecnología *adaptada* para entornos rurales y que presenta ciertas limitaciones ( ancho de banda, no soporta QoS en largas distancias ) en su rendimiento.

La tecnología WiMAX por su gran cobertura y su característica de ser NLOS la hace muy atractiva para este tipo de entornos donde las redes cableadas de banda ancha no son viables por su alto costo de instalación y poca o nula rentabilidad [17]. Asimismo, la instalación de WiMAX también resulta relativamente económica ya que como se induce de lo expresado líneas arriba se necesita un reducido número de estaciones base para cubrir cientos de kilómetros y sin realizar costosas obras civiles para tender cables de cobre o fibra óptica. En cuanto a su capacidad de transmisión, una de sus ventajas clave es que utiliza OFDM lo que permite altas velocidades de transferencia para el usuario, equivalentes a las obtenidas con tecnologías de cable o XDSL incluso en condiciones NLOS y efecto multicamino (multipath) como se describe en [16]. Asimismo IEEE 802.16 también considera calidad de servicio (QoS) que permite una adecuada transmisión de datos, voz y video [18].



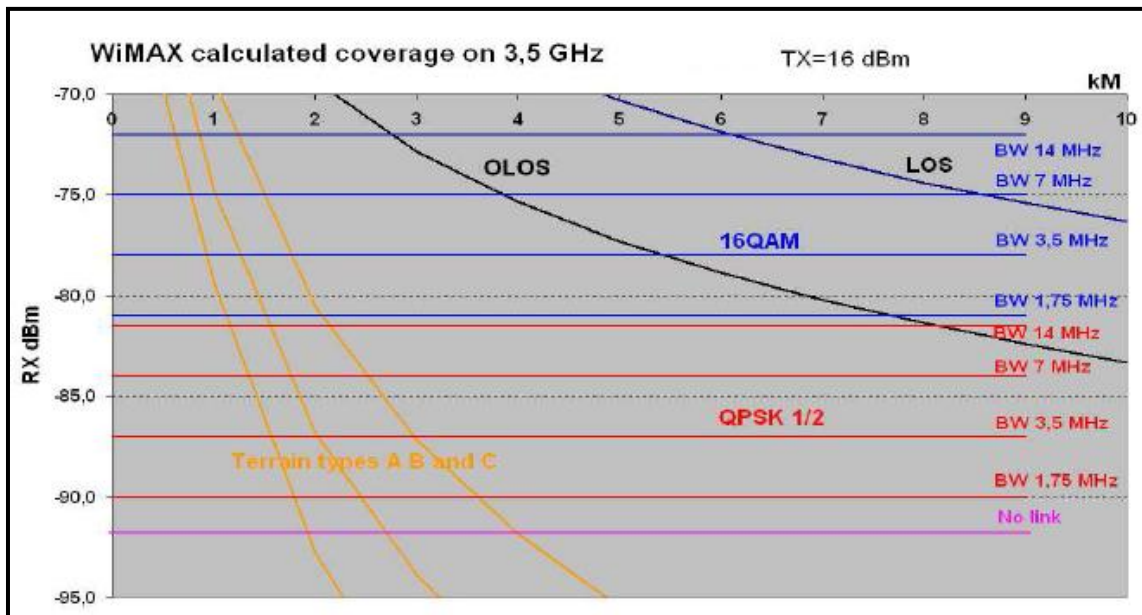


FIGURA 4.1: COBERTURA DE IEEE 802.16 EN ZONAS RURALES

Fuente: [19]

Los resultados de un estudio de cobertura realizado para áreas rurales [19] son mostrados en la figura 4.1 para corroborar la alternativa de comunicación propuesta. El rendimiento en diferentes tipos de terreno fue revisado en dicho estudio, llevándonos a los siguientes resultados [19] mostrados en Tabla 4.1.

TABLA 4.1: RENDIMIENTO CUASI PRÁCTICO EN DIFERENTES ÁREAS

Ambiente	Rango de Celda	Máxima Tasa de Salida
Terreno suburbano tipo A (NILOS)	0.7 km	11,6 Mb/s en canal de 7 MHz
Terreno suburbano tipo A (NILOS)	1.2 km	11,6 Mb/s en canal de 7 MHz
Terreno suburbano tipo A (NILOS)	1.7 km	11,6 Mb/s en canal de 7 MHz
Suburbano OLOS	4.7 km	11,6 Mb/s en canal de 7 MHz
Línea de vista	10 km	11,6 Mb/s en canal de 7 MHz

Fuente: [19]

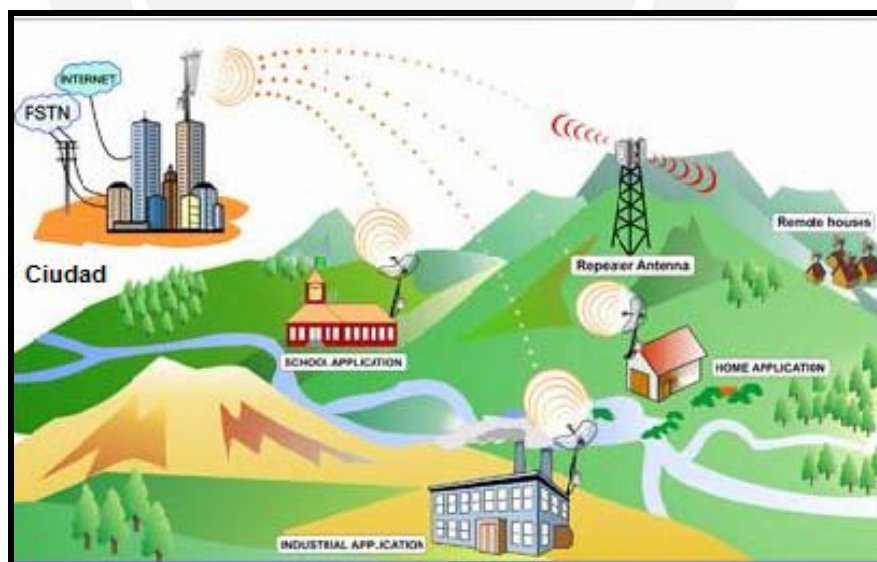
Una descripción breve de las características de cada tipo de terreno es indicada a continuación:

- Tipo A: Terrenos montañosos con moderado-alta densidad de árboles.
- Tipo B: Intermedias condiciones de pérdidas de camino.
- Tipo C: Terreno mayormente plano con poca densidad de árboles.

En virtud de lo expuesto líneas arriba se ratifica que WiMAX es, en efecto, una solución para conexiones a áreas rurales o a áreas poco accesibles tal como lo señala Intel en una de sus recomendaciones en [20].

IEEE 802.16 se está usando con éxito en otros países, como solución a la deficiencia de comunicación en áreas rurales, como son los casos de España (a través de Iberbanda, miembro del WiMAX Fórum), México y Estados Unidos (a través de WiMAX Rural por ejemplo); el empleo de WiMAX para comunicar áreas rurales (pueblos, municipios, etc.) es una realidad. La idea fundamental de estas iniciativas fue llevar la banda ancha y las TICs a estas zonas de difícil acceso y así mediante el internet la población rural tendrá acceso a todo tipo de información y una mejor comunicación lo que le permitirá desarrollarse e integrarse virtualmente a las zonas urbanas logrando más y mejores oportunidades[21].

A continuación se muestra un esquema básico de una solución usando WiMAX para un entorno rural donde la idea es proveer de Internet y telefonía desde la ciudad.



**FIGURA 4.2:** WiMAX PARA PROVEER INTERNET Y TELEFONIA RURAL  
Fuente: WiMAX Rural-Internet Solutions. Gráfico de esquema de solución

## 5. CONCLUSIONES

1. Por lo expuesto en los capítulos anteriores, se ratifica que tecnológicamente hablando la tecnología WiMAX se adapta mejor en zonas rurales que la tecnología WiFi, debido a que WiMAX fue diseñada para usarse en escenarios MAN y concebida como una solución para la última milla lo que la hace idónea para zonas de tipo rural; en el caso de WiFi a pesar de que no fue diseñada para redes MAN ni para zonas rurales, se viene aplicando en dichas zonas pero con ciertas limitaciones respecto a WiMAX.
2. Con respecto a la migración de IEEE 802.11 a IEEE 802.16, ésta es perfectamente factible desde el punto de vista tecnológico debido a todas las características y capacidades que presenta WiMAX permitiendo soportar de manera satisfactoria diversas aplicaciones (e-learning, telemedicina, VoIP, e-commerce, etc.), dicha migración contribuirá a mejorar la calidad de vida de los pobladores de las zonas rurales así como potenciar sus posibilidades de desarrollo.
3. La implementación de la infraestructura de redes de acceso para WiMAX es más costosa que la infraestructura para WiFi, por lo que probablemente no sea atractiva para el operador por un tema natural de rentabilidad ya que se orienta a personas con escasos recursos. Por tanto, existe un aspecto de fondo muy importante que es el económico el cual, en mi opinión, se puede traducir en 4 criterios que condicionarían la migración: el volumen de clientes que maneje cada operador, servicios y/o aplicaciones que se pretendan brindar, la capacidad adquisitiva del poblador rural y el precio de los equipos.
4. Teniendo en cuenta que el Estado vela por el desarrollo de la infraestructura básica en todo el país, particularmente en aquellas zonas donde no hay presencia de la empresa privada por cuestiones de orden económico, sería conveniente que el Sector Transportes y Comunicaciones mediante FITEL materialice el rol subsidiario del Estado subsidiando el costo de implementación de la infraestructura que permita implementar una red de acceso WiMAX en zonas de preferente interés social, lo que favorecería su desarrollo promoviendo además la disminución de la brecha digital en el Perú.

5. Para desplegar infraestructuras con WiMAX en zonas rurales se plantean dos posibles soluciones. Una posible solución es que en los lugares donde existe WiFi se migre a WiMAX cuando aumente la cantidad de clientes lo que dará lugar a una necesidad de más ancho de banda. Otra solución sería implementar WiMAX solo en lugares donde haya mayor densidad poblacional y de acuerdo a estudios del operador se vea que existe una demanda atractiva que pueda ofrecer una mayor rentabilidad. En este escenario se podría llegar exteriormente con WiMAX y distribuir interiormente con WiFi (siendo este un escenario donde ambas tecnologías podrían coexistir sin problemas ya que son compatibles).

Asimismo resulta pertinente mencionar que en el mes de octubre del presente año se licitará el espectro para la prestación de servicios WiMAX en nuestro país. Este hecho no hace sino ratificar lo que está ocurriendo no solo en otras partes de la región sino en otras partes del mundo: el empleo de WiMAX como una solución de acceso de banda inalámbrica. El cual se aplica perfectamente tanto en zonas urbanas como en zonas de difícil acceso como son las zonas rurales.

## 6. BIBLIOGRAFIA:

- [1] Simó Reigadas, Francisco  
“Modelado y optimización de IEEE 802.11 para su aplicación en el despliegue de redes extensas en zonas rurales aisladas de países en desarrollo”  
Tesis Doctoral en Telecomunicaciones  
Año 2007
- [2] “IEEE 802.11b-1999 Standard: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band”.  
IEEE Computer Society  
Año 1999
- [3] “IEEE. 802.16: IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Part 16: Air Interface for Fix Broadband Wireless Access Systems”  
IEEE Computer Society,  
Año 2004.
- [4] Ponce, Fátima  
“Caracterización socio-económica de los centros poblados rurales del Perú”  
Documento de Discusión No 1 de Osiptel  
Año 1996
- [5] Grupo 7 de la ITU  
“New Technologies for Rural Applications”  
Reporte Final del FG 7 de la ITU  
Año 2000
- [6] Stern Peter A  
“New Models for Universal Access in Latin America”  
Regulatel  
Año 2006
- [7] Simó Reigadas, Javier  
“Redes Inalámbricas en zonas rurales”  
GTR-PUCP  
Año 2008
- [8] Dulcey, Maria Fernanda; Martínez Fernández, Andrés  
“Implementación de IEEE 802.11 en enlaces largos para zonas rurales aisladas”  
IV Congreso Iberoamericano de Telemática  
Año 2006
- [9] Simó Reigadas, Francisco  
“Application of IEEE technology for health isolated rural environments”  
EHAS  
Año 2006



- [10] Hank, Intven; Oliver, Jeremy; Sepúlveda, Edgardo  
“Manual de Reglamentación de las Telecomunicaciones”  
ITU  
Año 2000
- [11] Townsend, David  
“Universal Access in Latin America”  
Regulatel  
Año 2006
- [12] Ponce, Fátima  
“Acceso Universal y Telecomunicaciones Rurales en el Perú”  
Documento de Discusión No 3 de Osiptel  
Año 1996
- [13] Gaviria, José  
“Rol del Estado y del Fondo de Inversión en Telecomunicaciones en la provisión de la infraestructura de Telecomunicaciones en el Perú”  
OSIPTEL  
Año 2002
- [14] Mingos, Michael  
“Informe sobre el Desarrollo Mundial de las Telecomunicaciones”  
ITU  
Año 2003
- [15] San Román, Edwin  
“Políticas para las comunidades rurales”  
Osiptel  
Año 2005
- [16] Andrews, Jeffrey  
“Fundamentals of WiMAX- Understanding Broadband Wireless Networking”  
Prentice Hall  
Año 2007
- [17] Stanley, Joseph  
“IEEE 802.16 and WiMAX- Broadband Wireless Access For everyone”  
INTEL  
Año 2003
- [18] Fili, Senga  
“Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e WiMAX networks”  
WiMAX Forum  
Año 2005

- [19] Saemundur E. Thorsteinsson  
*WiMAX in Backhaul and Access Networks. Proyecto P1446*  
“European Institute for Research and Strategic Studies in Telecommunications”  
Año 2006
- [20] Smith, G.  
“Understanding WiFi and WiMAX as Metro Access Solutions”  
Paper de Intel  
Año 2004
- [21] Navas-Sabatar, Juan, Andrew Dymond; Niina Juntunen  
“Servicios de Telecomunicaciones e información para los pobres-*Hacia una estrategia de acceso universal*”  
Documento de discusión Banco Mundial Nro. 432  
Año 2003
- [22] Ponce, Fátima  
“Caracterización socio-económica de los centros poblados rurales del Perú”  
Documento de Discusión No 1 de Osiptel  
Año 1996
- [23] Simó Reigadas, Javier; Martínez Fernández, Andrés  
“Implementación de IEEE 802.11 en enlaces largos para zonas rurales aisladas”  
EHAS  
Año 2005
- [24] Lloréns, José  
“Tecnologías de la Información y Comunicaciones en los Hogares”  
INEI  
Año 2005
- [25] Gaviria, José  
“Rol del Estado y del Fondo de Inversión en Telecomunicaciones en la provisión de la infraestructura de Telecomunicaciones en el Perú”  
OSIPTEL  
Año 2002
- [26] Simó Reigadas, Javier  
“Redes Inalámbricas en zonas rurales”  
GTR-PUCP  
Año 2008
- [27] Estevans, Jorge; San Román Edwin  
“Políticas para las comunidades rurales”  
OSIPTEL  
Año 2005
- [28] Finneran, Michael  
“WiMAX versus WiFi- A comparison of technologies, markets and business plans”  
Artículo de Business Communications Review  
Año 2004

- [29] WiMAX Forum  
[www.wimaxforum.org](http://www.wimaxforum.org)  
Año 2008  
Última fecha de acceso: 11 de junio,2008
- [30] LatinWiMAX, Banda Ancha en América Latina  
[www.latinwimax.com](http://www.latinwimax.com)  
Año 2008  
Última fecha de acceso: 3 de septiembre ,2008
- [31] Banda ancha para zonas rurales de España  
[www.bandaancharural.com](http://www.bandaancharural.com)  
Año 2006  
Última fecha de acceso: 25 de mayo,2008
- [32] Von Hesse, Milton  
“Telecomunicaciones para el desarrollo de las áreas rurales y de preferente interés social del Perú: estrategia y política de financiamiento”  
Documento de Discusión de Osiptel  
Año 1996
- [33] WiMAX Rural, Internet Rural Solutions  
[www.wimax-rural.us](http://www.wimax-rural.us)  
Año 2008  
Última fecha de acceso: 19 de junio,2008