

WiMAX: banda ancha para todos

Por Ing. Gustavo López Cruz

Jefe del Grupo de Mercadotecnia, Filial de Clientes. Gerencia Territorial Sancti Spíritus,
ETECSA

gustavo@ssp.etcasa.cu

Introducción

La sociedad mundial de ingenieros eléctricos y electrónicos agrupados bajo el acrónimo IEEE —*Institute of Electrical and Electronics Engineers*— ha desarrollado diversos estándares para el crecimiento y la interoperabilidad de las redes de datos, entre los que se destacan el ampliamente conocido 802.3 (Ethernet) y más recientemente 802.11 (WiFi). El grupo de trabajo para Acceso Inalámbrico de Banda Ancha IEEE 802.16 inició sus actividades en 1999 y dio lugar, 3 años después, al estándar 802.16, el cual reúne todas las especificaciones para la interfaz aérea de acceso inalám-

brico de banda ancha en redes metropolitanas (WMAN).

El nuevo estándar se promueve por el Forum de interoperabilidad mundial para acceso a través de microondas —WiMAX Forum— fundado en el 2001 y tiene, entre otros objetivos, impulsar el empleo y desarrollo del estándar mediante la certificación de interoperabilidad entre los diferentes productos, similar a lo que la alianza WiFi hizo del estándar IEEE 802.11.

La versión original del estándar 802.16 para operar en las frecuencias comprendidas entre los 10 y los 66 GHz se publicó en el año 2002. Este es, esencialmente, un sistema punto multipunto que re-

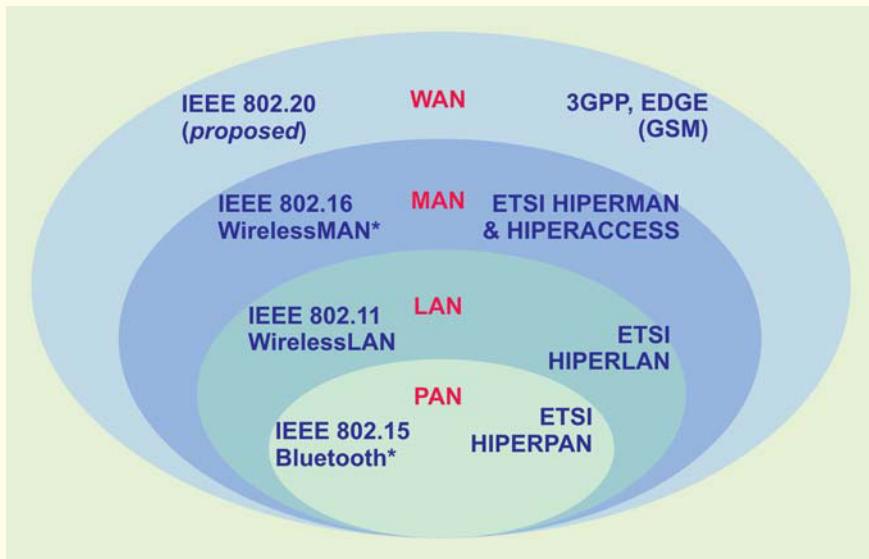
quiere línea de visibilidad directa o línea de vista (LOS) para su funcionamiento. Posteriormente, fue modificado para operar en la banda de frecuencias comprendida entre 2 y 11 GHz, en la que es posible establecer enlaces sin línea de vista (NLOS) y se encuentra en fase de prueba con el nombre 802.16-2004.

El estándar 802.16e es una avanzada versión que se encuentra en desarrollo y debe estar disponible para el año 2006. Pretende añadir novedosas características que le permitirán un buen desempeño en entornos NLOS que posibilite, además, movilidad y *roaming* dentro de las redes metropolitanas.

Revisión	Características relevantes	Destinado fundamentalmente
802.16a	Requiere antena exterior (LOS) Equipo terminal exterior a la PC Modulación OFDM	Aplicaciones de última milla Servicios similares a E1/T1, DSL Fijo
802.16d	No requiere antena exterior —Near LOS—	Acceso de banda ancha para interiores Fijo
(802.16-2004)	Equipo terminal exterior con antena incluida Mejoras en la subcanalización OFDMA Mejoras en la implementación de OFDM	
802.16e	No requiere antena exterior (NLOS) No requiere terminal exterior —tarjeta interior al PC— Más seguro —sistema de encriptación avanzado— Acceso avanzado con técnica SOFDMA Permite Roaming	Servicios de banda ancha para subscriptores móviles

Tabla 1 Evolución del estándar 802.16

La figura 1 muestra varios estándares propuestos para cubrir desde las redes personales, hasta las redes de área extensa. WiMAX está diseñado para un desempeño óptimo —incluso en interiores— en un área cercana a los 5 km, no obstante es posible extender su alcance hasta los 50 km con una velocidad de conexión superior a 1 Mbps.



Fuente: Intel White Paper

Figura 1 Tecnologías para redes inalámbricas

Los desarrolladores de tecnologías para el acceso inalámbrico de banda ancha persiguen diversos objetivos entre los que se destacan:

- ♦ Crear un estándar único, que permita interoperabilidad total entre los diferentes proveedores.
- ♦ Garantizar el ancho de banda requerido, para usuarios fijos y móviles.
- ♦ Lograr un bajo costo de despliegue.
- ♦ Garantizar un alto nivel de seguridad y escalabilidad.
- ♦ Satisfacer las necesidades de transporte para altos volúmenes de tráfico (*backhauling*).

WiMAX en el mercado de banda ancha

El WiMAX Forum está integrado por prestigiosos miembros de la industria de la electrónica y las telecomunicaciones, entre los que se destacan Intel, Nokia, Motorola, Siemens, Huawei y Samsung, los cuales trabajan intensamente con el propósito de promover el desarrollo de soluciones basadas en 802.16 para buscar su aceptación global.

Un fuerte impacto en el mercado de banda ancha inalámbrica tuvo WiFi que alcanzó popularidad aceleradamente con la creación de los puntos de acceso público conocidos como *hotspots*. Su éxito pudo considerarse un detonador de este mercado y del desarrollo tecnológico que,

rápidamente, dio lugar a WiMAX. WiFi tiene excelente acogida en cafeterías, hoteles y aeropuertos, entre otros sitios muy concurridos donde los usuarios pueden acceder a Internet desde sus dispositivos portátiles, que incluyen compatibilidad con la norma 802.11. WiMAX y WiFi se complementan, no son tecnologías excluyentes. WiFi está diseñado para ofrecer servicios de redes LAN fundamentalmente —con la topología *mesh* es posible extender su cobertura—, mientras WiMAX es una tecnología para redes metropolitanas o de área más extensa y, por lo tanto, debe competir con sus similares.

Para WiMAX se presentan grandes oportunidades de mercado, se destacan las empresas que basan su conectividad en sistemas T1/E1 ó DSL, de limitada capacidad y elevado costo; el sector residencial donde predominan los servicios DSL sobre pares de cobre; los proveedores de servicios de Internet inalámbrico (WISP) que utilizan el estándar 802.11 (WiFi) para el acceso y evacúan el tráfico a través de líneas DSL o enlaces T1/E1; y *backhauling* para sistemas celulares 3G.

WiMAX es muy atractivo para brindar cobertura en zonas semiurbanas o rurales donde la red de cobre no existe y su construcción es económicamente imposible. En estos lugares las soluciones se basan en enlaces satelitales y sistema de microondas punto a punto; ambos, por lo general, muy costosos o de baja escalabilidad y elevado tiempo de despliegue.

WiMAX emerge como una alternativa para los servicios DSL, los cuales dominan actualmente el

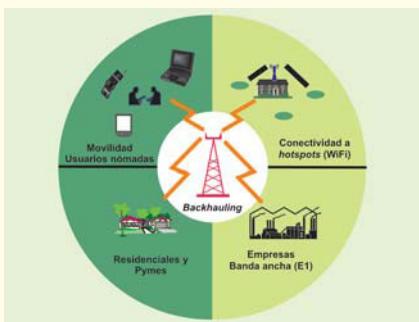


Figura 2 Oportunidades de mercado para WiMAX

mercado de banda ancha residencial y Pymes, permite ofrecer mayor capacidad de transmisión a menores costos con mayor cobertura y rapidez de implementación. Los sistemas DSL dependen directamente de la infraestructura de cobre existente, que en muchas ocasiones no cumple los requerimientos técnicos necesarios y se limita sólo a zonas urbanas.

En Cuba, WiMAX se presenta como una opción muy favorable para extender los accesos de banda ancha hacia zonas donde no existe red de cobre y solucionar, además, los problemas de conectividad existentes en importantes zonas urbanas, donde la calidad de los pares de cobre no es la requerida. Muchas instalaciones científicas, educacionales e industriales que precisan de accesos de banda ancha, se ubican en la periferia de la ciudad, lo cual es otra alternativa importante para responder a las exigencias de la conectividad social que se propone el país.

El dilema de la visibilidad

El diseño de las tecnologías inalámbricas depende, en gran medida, de que exista o no visibilidad entre las antenas transmisoras y receptoras. De esta situación pueden surgir dos escenarios (Figura 3) que difieren notablemente en cuanto a las exigencias tecnológicas. Un enlace

con visibilidad, prácticamente exige que al menos la primera zona de Fresnel esté libre; en condiciones donde no existe visibilidad, este tiene que ser concebido con habilidades para sobreponerse a diversos obstáculos asociados a la reflexión, dispersión y difracción de la señal transmitida, lo que da lugar al problema conocido como multirayectoria (*multipath*). Debido al fenómeno de multirayectoria, la señal recibida es una mezcla de señales con retardo, cambio de polarización y atenuación, respecto a la señal directa (Figura 3) y dificulta al receptor descifrar la información original.

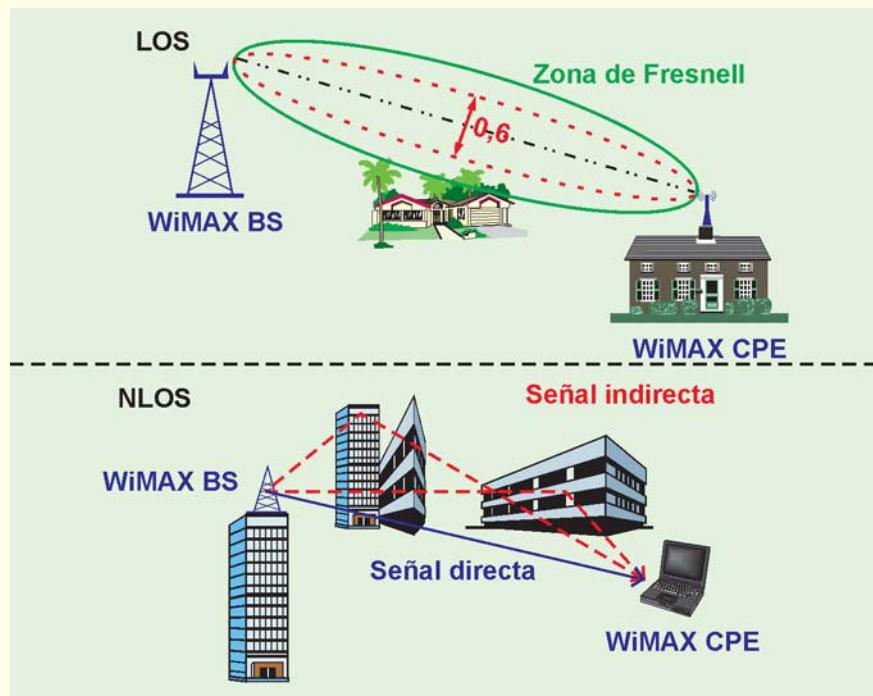
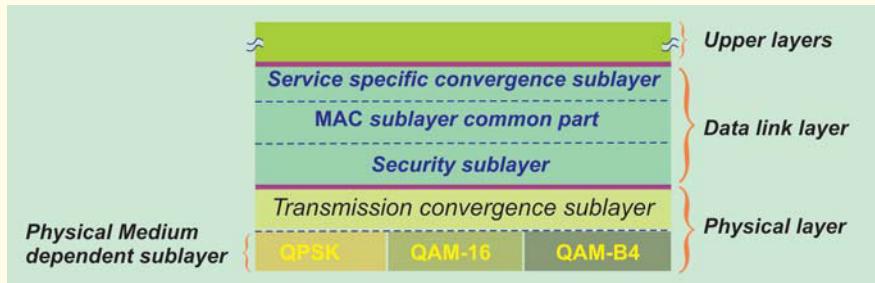


Figura 3 Desempeño en condiciones LOS y NLOS

Solución tecnológica de WiMAX

El estándar 802.16 está soportado por una novedosa capa física (PHY) y una capa de control de acceso al medio (MAC) que garantiza la calidad requerida para cada tipo de servicio, así como el óptimo aprovechamiento de los recursos.

La capa física se ha diseñado con gran flexibilidad que le permite operar con diversos esquemas de modulación, sistemas avanzados de antenas, radiocanales de diferente magnitud y con gran capacidad de adaptación a las exigencias impuestas por cada una de las aplicaciones, pues admite Duplexado por División en el Tiempo (TDD) y Duplexado por División de Frecuencias (FDD). El empleo de FDD permite enlaces simétricos apropiados para servicios de banda ancha de última milla, mientras el método TDD es más flexible y posibilita satisfacer demandas asimétricas que son más comunes en el mercado masivo.



Fuente: Tanenbaum. Computer Networks 4 Ed.

Figura 4 Stack de protocolos 802.16

Otra característica importante de WiMAX es la habilidad de cambiar el esquema de modulación de forma independiente para cada usuario, a esto se le conoce como modulación adaptativa, con lo cual se logra mantener la estabilidad y la calidad requerida en la comunicación en función de la relación señal a ruido (SNR) siempre a expensas del aprovechamiento del canal.

Esquema de modulación	SNR (dB)	Eficiencia espectral (Bits/s/Hz) *Valor teórico
64 QAM	22	6
16 QAM	16	4
QPSK	9	2
BPSK	6	1

Tabla 2 Esquema de modulación de WiMAX

Cuando la comunicación se efectúa en condiciones favorables, generalmente a corta distancia del transmisor, se emplean esquemas de modulación de elevada eficiencia espectral como es el caso de 64QAM que permite alcanzar velocidades hasta de 75Mbps en un canal de 20 MHz. A medida que el terminal se encuentra más distante del transmisor, se deterioran las condiciones de radiopropagación y disminuye la relación señal a ruido, el sistema reduce la capacidad del enlace con la utilización de la modulación QPSK ó BPSK de menor eficiencia espectral, que permite mantener la comunicación con la calidad requerida a pesar de existir un deterioro en la SNR.

El grupo de trabajo de 802.16, además, centra su atención en el soporte de avanzadas técnicas de antenas. WiMAX soporta antenas inteligentes y sistemas de antenas múltiples —Sistemas de Antenas Adaptativas (AAS), Técnicas de Codificación de Espacio Tiempo (STC) y Sistemas de Múltiple Entrada Múltiple Salida (MIMO)—. Con el empleo de estas, se obtiene ganancia por diversidad, que es el resultado del intercambio de señales a través de diferentes trayectorias, reducen al mínimo la probabilidad de afectaciones serias en el enlace debido a las características de radiopropagación. Esto conlleva a una mayor eficiencia espectral y mejor reutilización de frecuencias, con el incremento de la capacidad y la confiabilidad del sistema.

La capa MAC fue diseñada para soportar diversas especificaciones de la capa física, lo que le otorga a WiMAX mayores posibilidades para la interoperabilidad entre diferentes tecnologías. El protocolo MAC puede operar a altas velocidades de bits —superior a los 250 Mbps— en enlaces ascendentes y descendentes, es capaz de gestionar tráfico IPv4,

IPv6, Ethernet, ATM, entre otros, y soporta diferentes servicios de forma simultánea, con la calidad (QoS) requerida. WiMAX permite transportar servicios en tiempo real, aplicaciones de velocidad de bits constante en tiempo real y no real, así como servicios de mejor esfuerzo (*best-efforts*), todos orientados a conexión, que le conceden un funcionamiento óptimo ante cualquier aplicación —audio, video, datos priorizados, etc.—.

Para el control de acceso al medio, WiMAX emplea un protocolo de temporización o programación que se encarga de garantizar que no ocurran colisiones por transmisiones simultáneas. Este método alcanza eficiencia y confiabilidad superior al método de contención CSMA/CA utilizado por WiFi. Con un método de acceso libre de colisiones, WiMAX garantiza que con el incremento del número de usuarios no se deteriore la QoS —algo imposible para las tecnologías de redes inalámbricas basadas en un protocolo de contención—.

WiMAX cuenta con algoritmos muy robustos de corrección de errores basados en FEC con *Red Solomon Code* implementado y codificación convolucional; incluye, además, técnicas de ARQ que le permite garantizar niveles aceptables de la tasa de error de bits (BER).

Mediante algoritmos de control de potencia, WiMAX optimiza el consumo de energía de los terminales, logra que estos transmitan a la potencia mínima requerida para garantizar el enlace —el control de potencia se realiza desde la estación base que es la encargada de enviar a cada terminal la información sobre la potencia a transmitir—. La potencia requerida depende, fundamentalmente, de la distancia entre los extremos de la comunicación y la visibilidad existente. El control de la potencia es un factor esencial para el buen desempeño de los terminales móviles.

La seguridad y la privacidad de la comunicación es otro aspecto de gran importancia en los sistemas inalámbricos, por las características abiertas del medio de comunicación empleado. WiMAX cuenta con una subcapa de seguridad que se encarga de garantizar la privacidad necesaria a cada comunicación, para lo cual implementa algoritmos de encriptación Triple DES (3DES) y AES, superiores al algoritmo WEP ampliamente utilizado en redes inalámbricas.

Un acercamiento a OFDM

WiMAX emplea Multiplexado por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) que constituye la clave del éxito del estándar en su propósito de brindar comunicación inalámbrica de elevada calidad y confiabilidad. OFDM es una novedosa técnica de modulación multiportadora y, a la vez, constituye un avanzado método para el multiplexado de señales. Con el empleo de OFDM se logra mitigar los problemas asociados a la multitrayectoria, la interferencia intersímbolo y el retardo de esparcimiento de la señal que se presentan en estas condiciones.

OFDM consiste en modular varios tonos o portadoras generados de forma ortogonal; esto significa que las frecuencias en que se divide la portadora son independientes matemáticamente, es decir, son escogidas de forma tal que los máximos de una de ellas coinciden con los nulos de la otra, para garantizar que no ocurra interferencia entre ellas. La generación de la señal OFDM se logra con gran precisión debido al desarrollo de técnicas basadas en la Transformada Rápida de Fourier (FFT). A pesar de ser esta una tecnología de elevada complejidad, su empleo se ha extendido por el éxito en la fabricación de

chips de gran escala de integración (VLSI) que permiten realizar cálculos de la FFT a gran velocidad. Con el empleo de OFDM se alcanza un mejor aprovechamiento del espectro y del ancho de banda disponible (Figura 5).



Figura 5 Diferentes técnicas de multiplexado de frecuencias

WiMAX emplea 256 subportadoras OFDM —WiFi emplea sólo 64—. A medida que se incrementa la cantidad de subportadoras, el período de duración de la señal OFDM (símbolo) se incrementa, y la hace más resistente a los problemas asociados con la multitrayectoria.

El Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA) es una técnica aún más novedosa basada en OFDM. Consiste en agrupar varias subportadoras OFDM para formar un subcanal de tráfico, que puede ser asignado de forma exclusiva en cualquier instante a un usuario determinado. Cada símbolo OFDM está formado por N_t portadoras que son divididas en N grupos (Figura 6), cada uno con n subportadoras, lo cual permite formar N subcanales de tráfico independientes. Para mitigar el desvanecimiento selectivo de frecuencias, las n subportadoras correspondientes a cada canal son distribuidas por los N grupos existentes, es decir, en cada grupo puede encontrarse una portadora que lleva información a un usuario determinado, asociada al canal correspondiente. En la figura 6 puede apreciarse cómo los sím-

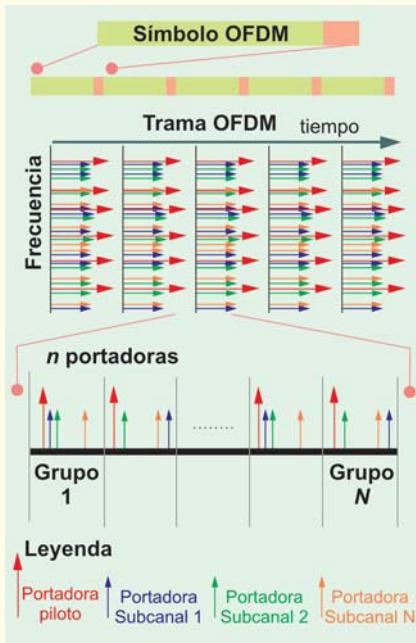


Figura 6 Subcanalización en OFDMA

bolos OFDM son multiplexados en el tiempo, mientras los canales de datos son multiplexados en frecuencia.

En la práctica, para un canal de 6 MHz se emplean valores de $N_t = 2048$, con los cuales se forman $N = 48$ subcanales con $n = 32$ subportadoras cada uno para el enlace descendente y, similar, para el enlace ascendente pero con $N = 53$ subcanales. Es válido señalar que la igualdad $N_t = n \times N_t$ no se cumple, pues las 2048 subportadoras no son empleadas para transmitir información.

La subcanalización posibilita que varios usuarios usen el canal de forma simultánea, además permite colocar las portadoras en la posición adecuada para evadir el desvaneamiento (*fading*) presente a determinadas frecuencias —la estación base se encarga de determinar el perfil de *fading*, es decir, que a cada usu-

rio se le asignan las subportadoras menos vulnerables según las condiciones de radiopropagación—. La subcanalización garantiza, además, que en el enlace ascendente el terminal de usuario transmita, a niveles de potencia similares, a la estación base WiMAX; pero en intervalos de tiempo más distantes para mantener el consumo de energía a niveles requeridos.

El nuevo estándar 802.16e estará basado en Acceso por Multiplex de Frecuencias Ortogonales Escalables (SOFDMA). Este método consiste en asignar, de forma dinámica, el número de subcanales requerido para cada usuario, y hace más flexible el sistema. Al añadir escalabilidad a OFDMA, se incrementa el rendimiento y se reducen los costos al permitir un diseño apropiado de la FFT, según el ancho de banda disponible para

el canal —los canales pueden ser de 1,25; 2,5; 5; 10 y 20 MHz—. En este aspecto, WiMAX es superior a WiFi que sólo utiliza canales fijos de 20 MHz.

WiMAX en acción

WiMAX puede ser implementado de forma efectiva en un entorno de acceso inalámbrico total, que permite ampliar la cobertura hacia toda el área metropolitana y su periferia. Con la introducción de WiMAX se añade, además, la posibilidad de movilidad —usuarios nómadas— y se favorece el despliegue de redes LAN. La figura 7 muestra el aforo de WiMAX para brindar conectividad a empresas con grandes volúmenes de datos y complejas estructuras internas de redes Ethernet, WiFi, entre otras, así como hotspots, zonas rurales y usuarios nómadas.

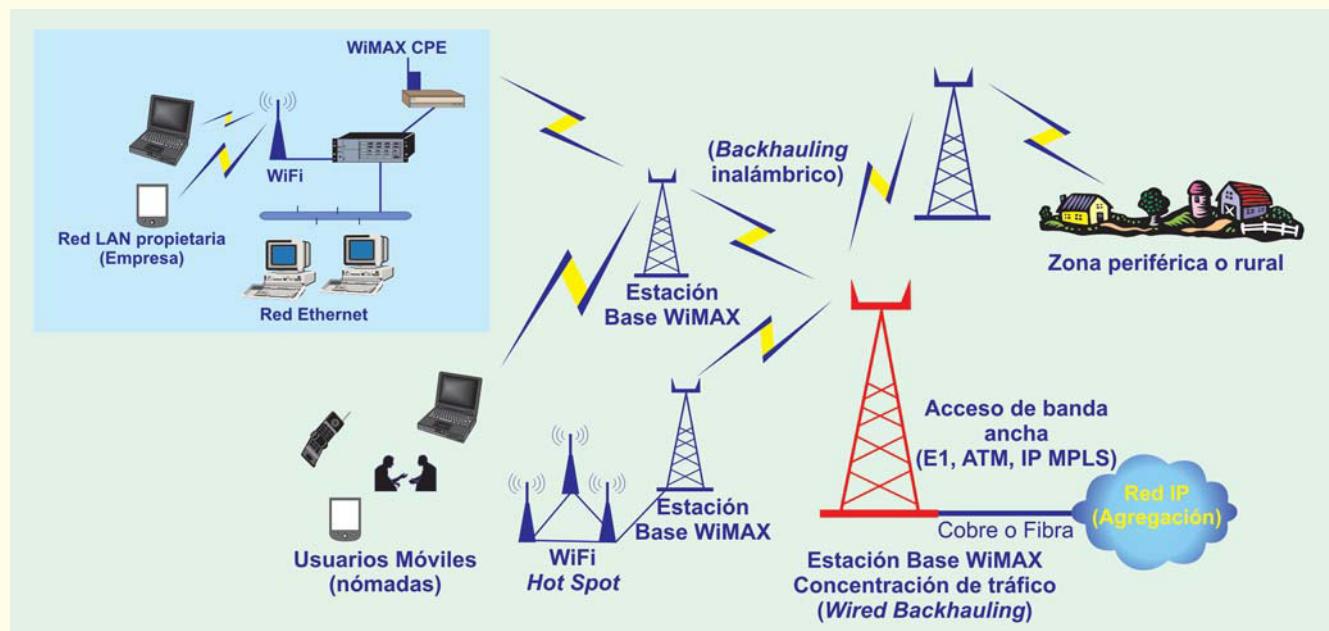


Figura 7 WiMAX en un entorno de aplicaciones múltiples

WiMAX y la 3G

Un aspecto que ha generado un fuerte debate es lo referente al vínculo entre WiMAX y las redes 3G que evolucionan aceleradamente. Los fundadores de la 3G han trabajado por una red de voz capaz de transportar datos, mientras WiMAX es una red de datos a la cual puede añadirse tráfico de voz (VoIP). Ambas redes pueden complementarse para satisfacer las demandas crecientes de datos y posibilitar a los operadores móviles una solución rápida e integral muy atractiva. Desde ese punto de vista, WiMAX y la 3G no son competidores: ambos poseen características diferentes y evolucionan a partir de propósitos distintos; sin embargo, en países con mercados altamente competitivos y desregulados, WiMAX, sin dudas, puede afectar a los operadores móviles.

Aparentemente, no es necesario centrar la solución de datos en WiMAX u otra tecnología similar, pues las redes 3G evolucionarán hacia el Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS) y Acceso a Descargas de Paquetes de Datos a Alta Velocidad (HSDPA) entre otras soluciones, que garantizarán velocidades de aproximadamente 1 Mbps, suficiente para la mayoría de los usuarios. WiMAX ofrece la posibilidad de operar en bandas de frecuencias exentas de licencia que existen en varios países y cuenta, además, con la ventaja de permitir una interoperabilidad total a corto plazo entre los diferentes fabricantes. Estas ventajas pueden ser aprovechadas por los operadores móviles con la integración de WiMAX dentro de la arquitectura actual de sus redes y extender sus posibilidades.

Una solución integral es posible centrada en el desarrollo de una potente red de agregación, que permita integrar todas las redes de acceso inalámbricas (Figura 8) que posea el operador, y garantizar la conectividad de esta con las restantes redes públicas y privadas. Aun cuando una integración total sea demasiado compleja para determinado operador o este mantenga sus esfuerzos centrados en brindar servicios de datos basados en su arquitectura de red actual, WiMAX puede ser muy conveniente para el *back-hauling* del tráfico proveniente de sus células HSDPA.

Después de WiMAX

WiMAX, a pesar de ser un estándar bien definido para los servicios móviles de banda ancha, aún no cumple en su totalidad los requerimientos del mercado pues su movilidad es reducida, es decir, no está preparado para garantizar conectividad a terminales móviles de usuarios que se desplazan a altas velocidades; además, sus posibilidades de *roaming* son limitadas a áreas no muy extensas. Estas limitantes dejan abiertas las puertas para la entrada de un nuevo estándar.

El estándar IEEE 802.20, Acceso Inalámbrico Móvil de Banda Ancha (MBWA), se encuentra en desarrollo. Está diseñado para admitir terminales móviles que se desplazan a velocidades cercanas a los 250 km/h y permitir un servicio *roaming* global similar a como lo hace la 3G, entre otras ventajas. Este debe estar listo para finales del año 2007. Con 802.20, la IEEE completará una excelente familia de tecnologías para el acceso inalámbrico que se extiende desde el hogar hasta la esperada cobertura mundial.

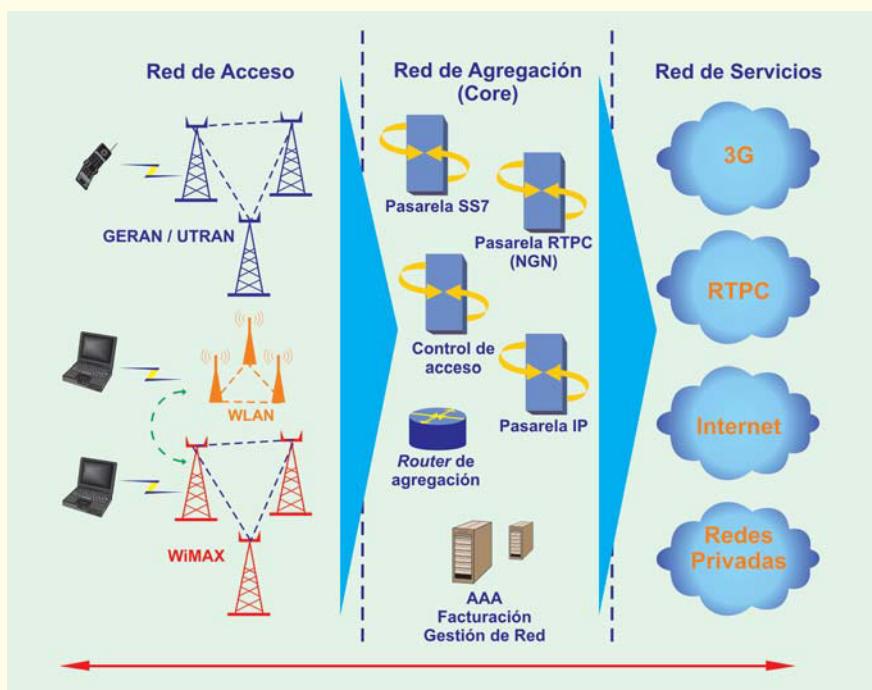


Figura 8 Integración de redes inalámbricas

Conclusiones

El estándar IEEE 802.16 está respaldado por una tecnología novedosa, que alcanza un funcionamiento exitoso ante los retos de la comunicación inalámbrica. El empleo de OFDM con su excelente desempeño, flexibilidad y potencialidades crecientes, incitan notablemente al estudio y seria valoración de WiMAX. Desde el punto de vista comercial, este cuenta con el respaldo de los grandes de las telecomunicaciones y la electrónica, quienes han sabido promocionar, de forma excelente, sus potencialidades y se encargarán de garantizar que WiMAX esté disponible a precios altamente competitivos. Nuevas tecnologías emergen y cada vez serán más las ventajas y prestaciones. WiMAX tendrá un lugar en el mercado de los servicios de banda ancha, contribuirá al desarrollo de la ansiada Internet inalámbrica y podrá coexistir con las nuevas generaciones, pues responde oportunamente a los desafíos de los operadores para el desarrollo de las redes futuras.

En Cuba se presenta un escenario muy favorable para esta tecnología, por lo tanto, es preciso seguir de cerca su evolución. Aún no han concluido importantes

pruebas de campo que dirán si WiMAX cumple sus promesas; pero, al parecer, muy pronto WiMAX estará en todas partes. ■

Bibliografía

- Documentación del estándar IEEE 802.16. Disponible en: <http://www.ieee802.org/16/> (Consultado: septiembre de 2005).
- Eklund, Carl et al. "IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the Wireless MAN Air Interface for Broadband Wireless Access". *IEEE Communications Magazine* (junio de 2002): 98-107.
- "How to Implement WiMAX in a Mobile Network". Cisco White Paper. Disponible en: http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/netsol/ns616/c647/cdccont_0900aecd80334a23.pdf (Consultado: noviembre de 2005).
- Husel, J. L. "Acceso universal de banda ancha: inalámbrico y móvil". *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel* (2^{do} trimestre de 2005): 99-106.
- Koffman, Israel; Roman, Vicentino. "Broadband Wireless Access Solutions Based on OFDMA in IEEE 802.16". *IEEE Communications Magazine* (abril de 2002).
- Leiba, Yigal. "OFDMA Tutorial, Theory, Principles, Design, Considerations and Applications". Disponible en: <http://www.runcom.com/> (Consultado: septiembre de 2005).
- Renaudeau, D. et al. "WiMAX: de acceso inalámbrico a Internet en el bolsillo". *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel* (2^{do} trimestre de 2005): 144-149.
- Sargeant, Paul. "The Promise of WiMAX". Disponible en: <http://www.motorola.com/networkoperators/> pdfs/Wi4-the-promise-article.pdf (Consultado: septiembre de 2005).
- Shen, Manyuan et al. "Design Tradeoffs in OFDMA Uplink Traffic Channels". Disponible en: <http://www.performancemanagementknowhow.com/abstract.aspx?scid=109&x=120&docid=102972> (Consultado: octubre de 2005).
- Tanenbaum, Andrew S. "Broadband Wireless" in *Computer Networks*. 4^{ta} Edición. EE.UU: Prentice Hall, 2003.
- "Understanding WiFi and WiMAX as Metro-Access Solutions". Intel White Paper. Disponible en: <http://www.intel.com/netcomms/technologies/wimax/304471.pdf> (Consultado: octubre de 2005).
- "WiMAX, Making Ubiquitous High Speed Data Services a Reality". Alcatel White Paper. Disponible en: <http://www.alcatel.com/publications/abstract.jhtml?repositoryItem=tcm%3A172-44851635&abstractLanguage=English> (Consultado: septiembre de 2005).
- "WiMAX's Technology for LOS and NLOS Environments". Disponible en: <http://www.wimaxforum.org/news/downloads/WiMAXNLOSgeneral-versionaug04.pdf> (Consultado: noviembre de 2005).
- "WiMAX: The Business Case for Fixed Wireless Access in Emerging Markets". Disponible en: http://www.wimaxforum.org/news/downloads/Business_Case_for_Emerging_Mkts_Rev1_2.pdf (Consultado: noviembre de 2005).
- "WiMAX – Unwiring the Last Mile". Siemens, 2004. Disponible en: http://www.siemens-mobile.de/repository/729/72939/Backgrounder_WiMAX.pdf (Consultado: octubre de 2005).