

# 10

Fecha de presentación: marzo, 2016 Fecha de aceptación: junio, 2016 Fecha de publicación: agosto, 2016

## LA COMUNICACIÓN INALÁMBRICA A TRAVÉS DE LA BANDA DE LOS 60 GHZ

### WIRELESS COMMUNICATION THROUGH THE 60 GHZ BAND

Ing. Jansel Leyva Bravo<sup>1</sup>

E-mail: [jbravo@ucf.edu.cu](mailto:jbravo@ucf.edu.cu)

MSc. David Beltrán Casanova<sup>1</sup>

E-mail: [dbeltran@uclv.edu.cu](mailto:dbeltran@uclv.edu.cu)

<sup>1</sup>Universidad de Cienfuegos. Cuba.

<sup>1</sup>Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. Cuba.

#### ¿Cómo referenciar este artículo?

Leyva Bravo, J., & Beltrán Casanova, D. (2016). La comunicación inalámbrica a través de la banda de los 60GHz. Revista Universidad y Sociedad [seriada en línea], 8 (2). pp. 89-96. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/>

#### RESUMEN

El constante desarrollo de las comunicaciones provoca que surjan aplicaciones que demandan cada vez más velocidades de transferencia de los datos. En este sentido las redes de acceso inalámbricas han estado en desventaja respecto a las cableadas hasta hace poco que la norma IEEE 801.11ac sobrepasó los Gbps, operando a 5GHz. No obstante, el ancho de banda disponible en esta frecuencia es limitado para soportar la gran cantidad de aplicaciones de alto rendimiento y el elevado número de usuarios que existirán en los venideros años. Por tal motivo se desarrollan investigaciones para la explotación de las ondas milimétricas, debido a su amplio ancho de banda disponible; donde la banda de los 60 GHz es la pionera para las comunicaciones inalámbricas de próxima generación (5G). Este trabajo tiene por objetivo analizar las potencialidades y desafíos de la comunicación a través de dicha banda, así como de su proceso de estandarización, en el resalta la última especificación de las WLAN: IEEE 801.11ad.

#### Palabras clave:

Comunicación inalámbrica, ondas milimétricas, banda de 60 GHz, IEEE 801.11ad, WLAN.

#### ABSTRACT

The constant development of communications leads to the creation of applications that demand higher data transfer rates. In this sense, wireless access networks have been at a disadvantage in relation to wired networks, until recently, when the IEEE 801.11ac standard exceeded 1Gbps, operating in the 5GHz band. However, the available bandwidth at this frequency is limited to support the large number of high performance applications and users that will exist in the coming years. For this reason, research is being conducted to exploit the millimeter wave due to its increased bandwidth; where the 60 GHz band is the pioneer for next-generation wireless communications (5G). This paper aims to analyze the potential and challenges of communication through the aforementioned band, as well as its standardization process, in which the latest IEEE 801.11ad WLAN specification stands out.

#### Keywords:

Wireless communication, millimeter waves, 60GHz band, IEEE 801.11ad, WLAN.

## INTRODUCCIÓN

El gran desarrollo de las tecnologías inalámbricas rompió la barrera de los gigabits por segundo (Gbps), con la norma IEEE 801.11ac, hace a un lado una de las principales desventajas de este medio de comunicación, la velocidad de los datos. Este estándar opera en la banda de los 5 GHz con un máximo ancho de banda de canal de 160 MHz. El ancho de banda es el rango de frecuencias en el que se concentra la mayor parte de la potencia de la señal. A pesar de los avances obtenidos con 801.11ac, su banda de frecuencias constituye un recurso limitado pues su espectro es utilizado por otras aplicaciones como los sistemas de radares del gobierno de los Estados Unidos y los climatológicos.

El crecimiento en el uso de servicios en tiempo real como telefonía, música, video y una amplia gama de juegos en internet, así como la transmisión de video de alta resolución sin compresión en los hogares, han incrementado exponencialmente el número de usuarios. Además las bandas de frecuencias de 1.4 y 5 GHz se han congestionados por la convivencia de varios estándares y están limitadas por el número de usuarios. Estos factores han propiciado la necesidad de investigar nuevas tecnologías que permitan alcanzar un mayor desempeño en las redes de acceso inalámbricas: Redes Inalámbricas de Área Local y Redes Inalámbricas de Área Personal. Es evidente la necesidad de una banda de frecuencias que brinde un amplio ancho de banda para lograr altas velocidades de transmisión y reduzca la interferencia entre usuarios. En este sentido las comunicaciones a través de las ondas milimétricas, especialmente la banda de los 60 GHz, han cobrado especial interés.

La explotación de la banda de 60 GHz fue posible luego de la liberación, por parte de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), de un ancho de banda de 7 GHz. La operación sin licencia significa que los dispositivos no deben causar interferencia perjudicial a otros usuarios y que deben aceptar cualquier interferencia recibida. Su liberación, unido al gran ancho de banda y sus características principales hacen que sea ideal para comunicaciones inalámbricas a velocidades ultra rápidas. Sustentan (Wang, Zhang, Lv & Gulliver, 2011) que ha emergido como una de las más prometedoras para el desarrollo de los futuros sistemas de comunicaciones inalámbricos de alta velocidad, denominados como la quinta generación (5G).

La razón principal de por qué esta banda del espectro había estado en desuso fue debido al elevado costo de producciones en masa de circuitos integrados para las frecuencias de las ondas milimétricas. Para su fabricación era necesario emplear Arseniuro De Galio y otros materiales costosos. Ingenieros de IBM desarrollaron un chip a

60 GHz con el primer transmisor y receptor experimental usando una aleación de alta velocidad basada en la tecnología de germanio de silicio (SiGe). Apuntan (Molisch & Tufvensson, 2014) que en los últimos años se han obtenido grandes logros en el desarrollo de las tecnologías basadas en el semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS, del inglés Complementar y Metal Oxide Semiconductor), en busca de manejar altas frecuencias.

Investigadores del Centro de Investigación Inalámbrica de Berkeley de la Universidad de California y otras universidades e institutos han logrado emplear la ampliamente disponible y barata tecnología CMOS para la confección de los componentes de transeptores a 60 GHz (Gustafson, Haneda, Wyne & Tufvesson, 2014). Zhu, et al. (2014), consideran que la industria del semiconductor está lista para producciones en masa y rentables en el campo de las comunicaciones a través de las ondas milimétricas. Ya en el mercado se encuentran disponibles dispositivos que operan en esta banda de frecuencia.

Desde hace varios años comenzó el proceso de estandarización por parte de organizaciones internacionales para establecer el empleo de esta banda de frecuencia. Entre los que se destacan especificaciones para las redes de acceso inalámbricas: Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN, del inglés *Wireless Personal Area Network*) y las Redes Inalámbricas de Área Local (WLAN, del inglés *Wireless Local Area Network*) a 60 GHz, IEEE 801.15.3c y 801.11ad respectivamente. Además de un estándar para aplicaciones de transmisión de video en alta resolución, WirelessHD.

El presente trabajo tiene como fin mostrar las potencialidades de la banda de los 60 GHz para las comunicaciones de la próxima generación, a partir de una revisión bibliográfica de los aspectos fundamentales de las ondas milimétricas. El análisis de estas tecnologías cobra gran importancia pues ya se ha comenzado la comercialización de dispositivos que operan a 60 GHz, mientras que otras bandas de las ondas milimétricas están en proceso de estudio. En el desarrollo del artículo, se abordan los temas referentes a la canalización de la banda de 60 GHz, así como las características de las ondas milimétricas. Además se profundiza acerca de las aplicaciones de estas y el proceso de estandarización.

## DESARROLLO

La banda Industrial, Científica y Médica (ISM, del inglés Industrial, Scientific and Medical), útil alrededor de 60 GHz está en el rango de 57 a 66 GHz, con un ancho de banda nominal de cada canal de 1160 MHz, pero no está

regulada uniformemente a nivel mundial. Al menos 3,5 GHz de espectro contiguo está disponible en todas las regiones que han asignado el espectro. El canal 1 está presente en todas las regiones y debido a ello se define como canal predeterminado. En la Unión Europea el espectro liberado va desde 57.00 GHz a 66.00 GHz, con los 4 canales habilitados sin solapamiento, mientras que 3 canales fueron regulados en EE.UU., Canadá, Corea del Sur y Japón; China presenta 1 canales, al tiempo que Australia el canal predeterminado y una gran porción del canal 3 (Wang, Zhang, Lv & Gulliver, 2011; Gustafson, 2014).

Al igual que para todas las ondas electromagnéticas, para las ondas milimétricas en el espacio libre, la intensidad de la radiación disminuye con el cuadrado de la distancia. Para el doble de la distancia, la intensidad de la radiación en la antena del receptor será disminuida por un factor de cuatro. Este efecto es debido a la propagación esférica de las ondas radiofónicas cuando se reproducen. La pérdida en el espacio libre para las ondas electromagnéticas relaciona la frecuencia y la distancia, está dada por la expresión de Friis (Huang & Edwards, 2008):

Donde  $P_L$  es la pérdida en el espacio libre,  $d$  es la distancia entre la antena transmisora y la receptora,  $\lambda$  es la longitud de onda en operación;  $n$  es el exponente de pérdida en el espacio libre que en el interior de una casa (de 5-15m) puede ser aproximado a 1.55 para canales con línea de vista directa (LOS, del inglés line-of-sight) y 1.44 en caso de que no haya línea de vista directa (NLOS, del inglés non-line-of-sight); en un salón de conferencia se aproxima a 1.77 para canales LOS y 3.85 en NLOS (Wang et al., 2011). Esta ecuación muestra que la pérdida en el espacio libre aumentará cuanto mayor sea la distancia o menor sea la longitud de onda. Para cálculos generales en exteriores, ( $n$ ) se aproxima a 1, tomando este valor y una distancia de 1 m, a continuación se calcula la pérdida en el espacio libre para 1.4, 5 y 60 GHz:

Tabla 1. Cálculo de las pérdidas en el espacio libre a 1 m para 1.4, 5 y 60 GHz.

1.4 GHz; $\lambda = 11,5 \text{ cm}$	5 GHz; $\lambda = 6 \text{ cm}$	60 GHz; $\lambda = 5 \text{ mm}$
$P_L = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{(0,115 \text{ m})} \right)^2 = 40 \text{ dB}$	$P_L = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{(0,06 \text{ m})} \right)^2 = 46 \text{ dB}$	$P_L = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{(0,005 \text{ m})} \right)^2 = 68 \text{ dB}$

Cuanto mayor es la frecuencia, menor es la longitud de onda ( $\lambda$ ), y como se puede apreciar a 60 GHz,  $\lambda = 5 \text{ mm}$ , se obtiene 18 y 11 dB más de pérdidas en el espacio libre que en las bandas de comunicación comunes hasta el momento, por tanto las pérdidas en el espacio libre son

realmente altas. Un ejemplo de resultados de mediciones en ambientes exteriores para enlaces a 3m de distancia a 60 GHz se exponen en (Rappaport, Ben-Dor, Murdock & Qiao, 2011), se obtienen una pérdida de 77.5 dB. Ello es una muestra de que la transmisión en exteriores y a las largas distancias empleando 60 GHz, se dificulta.

En los sistemas de comunicaciones a más bajas frecuencias, la pérdida de transmisión está dada por las pérdidas en el espacio libre. Sin embargo, en la banda de los 60 GHz factores adicionales de pérdida entran en juego. Entre las que se destacan la absorción del vapor de agua y el oxígeno, presentes en la atmósfera, conocidas como pérdidas atmosféricas. Además de obstáculos presentes en el ambiente como paredes, adornos y las propias personas, provocando la no penetración a través de estos.

Las ondas milimétricas son absorbidas por las moléculas de oxígeno, vapor de agua y otros gases atmosféricos. Las pérdidas por absorción de los gases son altas a determinados valores de frecuencia coincidiendo con la frecuencia de resonancia mecánica de las moléculas de los gases. Este es el caso del oxígeno, que a 63 GHz causa una pérdida de 15 dB/Km. En (Mac Cartney, Zhang, Nie & Rappaport, 2013; Zhu et al., 2014) se refiere que si se toma esta atenuación y además la provocada por lluvia, se alcanza un total de 36 dB/Km. Por esta razón, sus aplicaciones más comunes son en interiores donde las pérdidas por absorción de los gases son muy pequeñas. Sin embargo, dicho efecto permite el rehuso de la frecuencia en lugares pequeños, lo cual es de gran importancia pues la hace muy factible para comunicar múltiples usuarios dentro de una región geográfica con dimensiones reducidas.

En (Perahia & Gong, 2011), se compara en cuanto a pérdidas, el presupuesto de un enlace a 60 GHz respecto a uno a 5 GHz, algunos de los resultados se destacan a continuación. Hay un incremento de 11 dB en las pérdidas por trayectoria a 60 GHz, la figura de ruido es 3 dB peor que en 5 GHz. El ancho de banda del canal es considerablemente mayor para 60 GHz, aunque este incremento provoca que tenga 17 dB más de pérdidas por ruido. Las pérdidas en el espacio libre, en 1 m para 60 GHz son de 68 dB, mientras a 5 GHz son de 47 dB. Otros datos importantes, referidos en dicho estudio y en (Rappaport, 2014), son que la atenuación a través de paredes de ladrillos ha sido medida en 10 dB y con presencia de adornos 35 dB, a través de paredes de cemento puede encontrarse por encima de los 70 dB.

Un ejemplo del efecto de los materiales y de las condiciones de propagación (LOS o NLOS) en dependencia

de la frecuencia se observa en la figura 1. Se muestra la medición de la potencia de una señal a 60 GHz y otra a 1.4 GHz en un corredor de oficinas. Se aprecia que a lo largo del corredor en condiciones LOS, las características de propagación son muy similares pero al doblar una esquina en 90 grados la pérdida por ensombrecimiento para la señal de 60 GHz es de alrededor de 50 dB, 15 dB más de atenuación que a 1.4 GHz.

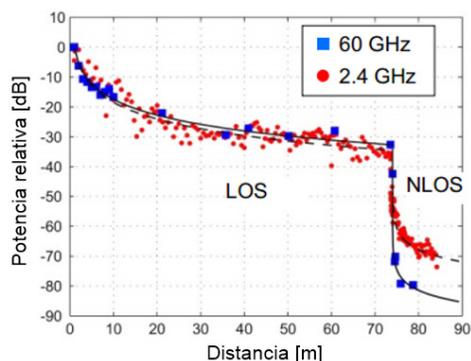


Figura 1. Comparación de la potencia de señales a 1.4 GHz y 60 GHz.

Fuente: Medbo, et al., 2014.

Debido a los altos valores de las pérdidas por penetración a través de la mayoría de los materiales, las componentes multitrayecto (MPCs, del inglés *multi-path components*) propagadas al atravesar paredes u otros objetos, presentan muy baja potencia. Varios autores como Pollok, 2010; Molisch & Tufvensson, 2014; Rangan, Rappaport & Erkip, 2014, refieren que la obstrucción producida por los humanos es también una importante fuente de pérdida de señal, provocando aproximadamente entre 10 y 35 dB de atenuación. Es de vital importancia que los sistemas que operan en esta banda tengan en cuenta el efecto del cuerpo humano, ya que es muy dañino en la transmisión de la señal.

#### Efectos de los fenómenos físicos de propagación de las ondas electromagnéticas

Los datos expuestos en el apartado anterior muestran que la propagación a 60 GHz mediante el fenómeno de la refracción (a través de objetos), es insignificante, ya que la potencia de la señal se degrada fuertemente. La mayor parte de la potencia transmitida se propaga entre el transmisor y el receptor a través de la línea de vista directa (LOS) y de rayos reflejados de primer o segundo orden, aunque estos presentarán una potencia menor. A pesar de estos inconvenientes los niveles de interferencia en esta banda son significativamente menos severos que

en los sistemas localizados en las congestionadas bandas de 1.4 y 5 GHz.

La dispersión de las ondas electromagnéticas es producida por la rugosidad de las superficies. Se categoriza en 1 modos diferentes, una cuando la rugosidad de la superficie es muy pequeña comparada con la longitud de onda de la señal emitida; en dicho caso, el fenómeno de la dispersión es equivalente a la reflexión especular que ocurre para superficies lisas, donde la onda reflejada distribuye su energía en una sola dirección; y de acuerdo con las reglas de la reflexión, los ángulos (de incidencia y reflejado) son iguales. El otro modo, que es el aplicable para las ondas milimétricas, es cuando la rugosidad de la superficie es comparable con la longitud de onda, además de la reflexión especular aparece el factor de la dispersión, en el cual las ondas reflejadas pierden su energía por la distribución de la señal en diferentes direcciones (Sadaghiyani, Shokouh & Keshavarz, 2014).

Otro efecto importante que incide sobre la propagación de las ondas milimétricas es la polarización. Autores como Maltsev, Maslennikov, Lomayev, Sevastyanov & Khoryaev (2011), apuntan que la degradación de la potencia producida por la incompatibilidad de polarizaciones entre la antena y el canal, puede llegar a alcanzar valores entre 10 y 10 dB. La razón física de este alto impacto es que, con la utilización de antenas altamente direccionales, típicamente solo un simple trayecto LOS o NLOS será empleado para la transmisión de la señal, incluso cuando señales NLOS permanezcan fuertemente polarizadas con el receptor.

Varios autores exponen que para mitigar la elevada atenuación y establecer una comunicación robusta ante el desvanecimiento se emplean antenas con alta direccionalidad y técnicas como el *beamforming* adaptativo, además, estas posibilitan el rehúso espacial de los recursos y solventan la interferencia entre dispositivos (Ho, Cheng & Liu, 2014; Li, Irnich & Shi, 2014). Si un sistema de ondas milimétricas usara antenas omnidireccionales (radiar en todas las direcciones, en los 360°), sufriría una severa Interferencia Intersímbolo (IIS) debido a la gran cantidad de señales reflejadas (MPC) que llegarían al receptor (Ben-Dor, Rappaport, Qiao & Lauffenburger, 2011; Rappaport, Heath, Daniels & Murdock, 2015).

#### Factor de forma

Una de las ventajas de la frecuencia de 60 GHz reside en el pequeño factor de forma de las antenas y componentes, al poseer una longitud de onda ( $\lambda$ ) de 5 mm, frente a los 6 cm de 5 GHz por ejemplo, ello hace que las antenas sean

mucho más pequeñas, pues se fabrican sobre la base de su longitud de onda. Los arreglos de antenas típicamente son diseñados con un espaciamiento entre elementos de  $\lambda/1$ , que en este caso serían 1.5 mm. Por consiguiente, una configuración de 4x4 (arreglo de 16 elementos) ocupará un área de tan solo 1cm<sup>2</sup>, con una ganancia de 11 dB (Perahia & Gong, 2011). Este efecto provoca que se logren arreglos de antenas de muchos elementos y muy pequeños. Zhu, et al., (2014), reportan que se han probado prototipos de arreglos de 16x16 (156 elementos).

El pequeño factor de forma permite además la construcción de arreglos formados por subarreglos de antenas, poniendo en práctica la arquitectura de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO, del inglés *Multiple Input Multiple Output*) con multiplexado espacial, tal y como se propone en Torkildson, Madhow & Rodwell, (2010), requiriendo una potencia de transmisión razonablemente pequeña por cada elemento transmisor; realizable a través de amplificadores de potencia CMOS de bajo costo. Por ejemplo, en Rappaport, et al. (2015), se expone un circuito integrado con: cuatro canales transmisores y receptores, un oscilador controlado por voltaje, PLL y oscilador local de distribución de red; además cada canal receptor con un mezclador de cuadratura en fase y un rotador de fase en banda base y cada canal transmisor con el rotador y amplificadores de potencia; que ocupa un área de tan solo 8.75 mm<sup>2</sup>.

### Aplicaciones de las ondas milimétricas

Como se ha mencionado anteriormente, la banda de 60 GHz ofrece un ancho de banda amplio, sin necesidad de licencia. Con 7 GHz de ancho de banda, existen muchas aplicaciones de alta velocidad de datos que pueden ser implementadas. Esta banda es adecuada para aplicaciones a gran velocidad y corta distancia, se puede utilizar principalmente para aplicaciones en interiores como transmisión de multimedia, conexión de escritorios inalámbricos y para el soporte de dispositivos portátiles.

Las WPANs brindan conectividad entre dispositivos móviles, computadoras, monitores inalámbricos, reproductores. Un enlace de 60 GHz podría usarse para reemplazar varios cables que se utilizan hoy en día en la oficina o en el hogar, incluyendo UTP Gigabit Ethernet (1000 Mbps), USB 1.0 (480 Mbps), USB 3.0 (~ 5 Gbps), IEEE 1394 (Firewire ~ 800 Mbps); las tasas de datos de estas conexiones requieren un alto ancho de banda. El rango de alcance de 10 metros cubre el tamaño de la mayoría de las oficinas, salas de conferencias de tamaño mediano y habitaciones (Huang & Edwards, 2008).

La Interfaz para Multimedia de Alta Definición (HDMI, del inglés *High Definition Multimedia Interface*) es la interfaz estándar para televisores de alta definición, dependiendo de la resolución de la pantalla, las velocidades de datos requeridos para una señal HDMI sin comprimir pueden ser sustanciales. La transmisión de video a través de HDMI normalmente implica la compresión del video, lo que provoca pérdidas en la señal y el pago por el algoritmo de compresión. Con la transmisión sin compresión se evitan estos dos factores y se conserva la calidad de imagen en el enlace (Ruetsch, 2013).

Ya se cuenta con equipos destinados para la transmisión de video en alta resolución sin compresión desde un reproductor Blue-ray hacia un televisor de alta definición. Tal es el caso de los pares de transmisor y receptor Vizio XWH100 HDMI inalámbricos. Dichos dispositivos son transceptores inalámbricos que soportan un pico máximo de 3 Gbps de rendimiento en la capa de Control de Acceso al Medio (MAC, del inglés *Medium Access Control*). La transferencia de datos de un reproductor Blu-ray, con un disco de 50 gigabytes de memoria, a través de una conexión a 60 GHz demoraría tan solo alrededor de 50 segundos, a más de 1 Gbps (Tie, Ramachandran & Mahindra, 2011).

La seguridad es proporcionada a 60 GHz debido a las características de las ondas milimétricas, que sobre largas distancias, hay una pérdida significativa de la señal debido a la absorción de oxígeno, y que la propagación a través de la difracción es impráctica, ya que la señal sufre una atenuación significativa a través de las paredes. Estos dos hechos impiden que la señal de televisión de alta definición se filtre en las habitaciones y residencias adyacentes. Ello es un claro beneficio para los proveedores de contenido, para limitar la distribución al comprador legítimo de sus servicios.

Ya en el mercado están disponibles chips a bajos costos, por ejemplo la Laptop Dell Latitude 6430u puede ser ordenada con un integrado de la firma WiloCity (de las líderes en esta tecnología) para velocidades multi-Gbps a 60GHz por un costo adicional de tan solo 37.50 dólares. Otra de las firmas líderes, Silicon Image tiene en el mercado un chipset de tercera generación para el estándar WirelessHD en aplicaciones de tiempo real y baja latencia como juegos y video. Provee una velocidad de 3.8 Gbps, emplea un sistema de arreglo de antenas de 31 elementos (Zhu, et al., 2014; Rappaport et al., 2015).

### Estandarización

Debido al gran potencial que representan las comunicaciones a 60GHz, múltiples organizaciones han

desarrollado estándares orientados para la interconexión de dispositivos electrónicos como computadoras portátiles, cámaras, tabletas electrónicas o monitores inalámbricos. Las especificaciones dominantes son: IEEE 801.15.3c, WirelessHD (WiHD), Wireless, Gigabit Alliance (WiGig) e IEEE 801.11ad, en cada estándar se define la capa MAC y la capa física (PHY) de la red de acceso inalámbrica.

El estándar IEEE 801.15 define las WPAN a 1.4 GHz, en 2005 se forma el Grupo de Trabajo para IEEE 801.15.3c (TG3c, del inglés Task Group 3c) con el fin de desarrollar una alternativa en la banda de los 60GHz, y se lanza en 2009. Proporciona flujos de datos de 1 Gbps para aplicaciones como el acceso a internet, y un flujo opcional a 1 Gbps para permitir la transmisión inalámbrica de contenidos de multimedia en alta resolución (HD, del inglés High Resolution). Entre las especificaciones de la capa física están la transmisión en simple portadora, OFDM y soluciones de antenas inteligentes para condiciones LOS y NLOS (Nicolas, Jacob & Kürner, 2011; Shi, Zhang, Wang, Wang & Zhang, 2014).

El TG3c, desarrolla además un modelo de propagación para soportar la estandarización, basado en el modelo Saleh-Valenzuela Extendido. Al modelo se le señalan algunas limitaciones en (Gustafson, et al., 2014) como la no modelación de las características de propagación en elevación. Otra muy importante es que es un modelo aplicable a sistemas de Simple Entrada y Múltiples Salidas (SIMO, del inglés *Single Input Multiple Output*), ya que solo modela la dirección de arriba (el lado receptor). Los sistemas a 60GHz son sistemas MIMO, por lo que para modelar su canal de transmisión es necesario incluir las direcciones de partida (el lado transmisor), ya que sólo es detallado completamente por su Respuesta al Impulso de tipo doble direccional, que tiene presente las características espaciales en ambos terminales.

WiHD finalizó su estandarización en enero de 2008, es el estándar de comunicaciones milimétricas más maduro. Su principal aplicación es la transmisión inalámbrica de video HD. Uno de los miembros fundadores del Consorcio WirelessHD es SiBEAM, una compañía estadounidense fundada en 2004 por un grupo de investigadores del Centro de Investigaciones Inalámbricas Berkeley de la Universidad de California. El consorcio está formado además grandes trasnacionales electrónicas como Broadcom, Intel, Philips, Samsung, LG, Panasonic, Matsushita, NEC, Sony y Toshiba. Alcanza velocidades por encima de los 4 Gbps sobre distancias de 10 m. Implementa antenas inteligentes con búsqueda de haz y rastreo de dispositivos para sobreponerse al

cambiante ambiente de propagación como el movimiento de personas (Pollok, 2010).

En 2009 la Alianza Gigabit Wireless (WGA, del inglés *Wireless Gigabit Alliance*) se constituyó con la intención de desarrollar especificaciones que definen la transmisión de audio, vídeo y datos en la banda de frecuencia de onda milimétrica que operan tanto en LOS como en NLOS. El WGA posee la marca registrada "WiGig" para describir esta tecnología. En abril de 2011 lanzan la especificación 1.1 del WGA, publicada bajo la marca *WiGig*. Desde entonces el WGA y la IEEE establecieron una alineación entre sus especificaciones, de modo que las publicaciones IEEE 801.11ad y WiGig v1.1 son esencialmente idénticas. En diciembre de 2011, la Alianza Wi-Fi y WGA ejecutaron un Memorando de Entendimiento (Agilent, 2013).

El grupo de trabajo IEEE 801.11ad (TGad, del inglés IEEE 801.11ad *Task Group*) se conformó en 2009 y trabaja de conjunto con el estándar IEEE 801.15.3c para asegurar la coexistencia de ambos. 801.11ad presenta dos tecnologías de acceso OFDM y simple portadora en dos variantes simple y bajo consumo de potencia (Perahia & Gong, 2011; Niu, Li, Jin, Su & Vasilakos, 2015), permitiendo el ahorro de energía en los terminales móviles, característica vital en las tecnologías inalámbricas que vienen surgiendo en los últimos años para brindar movilidad al usuario. Soporta velocidades máximas teóricas por encima de los 6 Gbps con una modulación de 64QAM y un arreglo de 8x8.

El TGad desarrolló un molde de propagación que en contraste con el de 801.15.3c obtiene las características de espacio y tiempo del canal de 60 GHz, incluye la información de elevación y azimut, tanto en el transmisor como en el receptor, de esta forma soporta el uso de arreglos de antenas en ambos terminales (MIMO). El modelo de propagación de 801.11ad, es más amplio que el de 801.15.3c, modela fenómenos físicos como la polarización, reflexión y difracción; además incorpora un modelo para la obstrucción dinámica humana. Estos elementos provocan que el estándar IEEE 801.11ad sea más robusto que el 801.15.3c, por lo que se considera que será más exitoso.

## CONCLUSIONES

La banda de los 60 GHz está designada para encargarse de aplicaciones que demandan altos recursos, gracias al gran espectro disponible. Con su ancho de banda de 7 GHz, la interferencia entre dispositivos se reduce considerablemente, además de que aumenta considerablemente el volumen de usuarios que podrían ser interconectados

a través de un simple Punto de Acceso. Para las ondas milimétricas además de las altas pérdidas de la señal en el espacio libre, existen pérdidas adicionales debidas a la absorción de los gases atmosféricos, lo que provocan que sus aplicaciones sean preferentemente en ambientes interiores. Aunque varios investigadores consideran su empleo para comunicaciones en exteriores de corto alcance, lo cual está en fase de estudios. Además son seriamente dañadas por los mecanismos de propagación de las ondas, aunque la alta atenuación por difracción es una ventaja desde el punto de vista de seguridad.

La evolución de las tecnologías ha solventado los retos de implementar dispositivos que operasen con ondas milimétricas, y lo que en su momento constituyeron desafíos, el desarrollo humano los ha convertido en ventajas, como el pequeño factor de forma de los componentes, el cual posibilita el desarrollo de equipos que soporten comunicaciones en las bandas comunes de 1.4 y 5 GHz además de a 60 GHz. La última especificación para WLAN, la 801.11ad, se presenta prometedora, con un modelo de propagación que tiene en cuenta la obstrucción humana y demás efectos dañinos de las ondas milimétricas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agilent Technologies, Inc. (2013). Wireless LAN at 60 GHz - IEEE 801.11ad Explained *Agilent-Technologies* Recuperado de <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-9697EN.pdf>
- Ben-Dor, E., Rappaport, T. S., Qiao, Y., & Lauffenburger, S. J. (2011). Millimeter-wave 60 GHz Outdoor and Vehicle AOA Propagation Measurements using a Broadband Channel Sounder. *IEEE Globecom 2011*. Recuperado de <http://faculty.poly.edu/~tsr/Publications/60gz.pdf>
- Gustafson, C. (2014). *60 GHz Wireless Propagation Channels: Characterization, Modeling and Evaluation*. (Doctoral). Lund: Lund University. recuperado de <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=4810414&fileId=4810453> (69)
- Gustafson, C., Haneda, K., Wyne, S., & Tufvesson, F. (2014). On mm-Wave Multi-path Clustering and Channel Modeling. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61 (3), pp. 1445-1455. Recuperado de <http://ieeexplore.ieee.org/jiel7/8/4907013/06691914.pdf>
- Ho, K.-P., Cheng, S., & Liu, J. (2014). MIMO Beamforming in Millimeter-Wave Directional Wi-Fi. Recuperado de <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1403/1403.7697.pdf>
- Huang, K.-C., & Edwards, D. J. (2008). *Millimetre Wave Antennas for Gigabit Wireless Communications*. Hoboken: Wiley Online Library.
- Li, G., Irnich, T., & Shi, C. (2014). Coordination context-based spectrum sharing for 5G millimeter-wave networks. *CROWNCOM 2014*. Recuperado de <http://toc.proceedings.com/11746webtoc.pdf> doi:10.4108/icst.crowncom.1014.155741
- MacCartney, G. R., Zhang, J., Nie, S., & Rappaport, T. S. (2013). Path Loss Models for 5G Millimeter Wave Propagation Channels in Urban Microcells. *IEEE Global Communications Conference, Exhibition & Industry Forum (GLOBECOM)*. Recuperado de <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6831690&url=http%3A%1F%1Fieeexplore.ieee.org%1Fiel7%1F6811197%1F6831034%1F06831690.pdf%3Farnumber%3D6831690>
- Maltsev, A., Maslennikov, R., Lomayev, A., Sevastyanov, A., & Khoryaev, A. (2011). Statistical Channel Model for 60 GHz WLAN Systems in Conference Room Environment. *RADIOENGINEERING*, 10 (1), pp. 409-411. Recuperado de [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6107538&url=http%3A%1F%1Fieeexplore.ieee.org%1Fxppls%1Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D6107538](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6107538&url=http%3A%1F%1Fieeexplore.ieee.org%1Fxppls%1Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6107538)
- Medbo, J., et al. (2014). Channel Modelling for the Fifth Generation Mobile Communications. Recuperado de [https://www.metis1010.com/wp-content/uploads/publications/EuCAP\\_2014\\_Medbo\\_etal\\_ChannelModelling-for-5G.pdf](https://www.metis1010.com/wp-content/uploads/publications/EuCAP_2014_Medbo_etal_ChannelModelling-for-5G.pdf)
- Molisch, A. F., & Tufvesson, F. (2014). Propagation Channel Models for Next-Generation Wireless Communications Systems. *IEICE Transactions and Communications*, E97-B(10), pp. 1011-1034. Recuperado de <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=4697157&fileId=4697168>
- Nicolas, M. L., Jacob, M., & Kürner, T. (2011). Physical layer simulation results for IEEE 801.15.3c with different channel models. *Advances in Radio Science*, 9, pp. 173-177. Recuperado de <http://www.adv-radio-sci.net/9/173/1011/ars-9-173-2011.pdf>
- Niu, Y., Li, Y., Jin, D., Su, L., & Vasilakos, A. V. (2015). A Survey of Millimeter Wave (mmWave) Communications for 5G: Opportunities and Challenges. Recuperado de <http://arxiv.org/pdf/1501.07118.pdf>
- Perahia, E., & Gong, M. X. (2011). Gigabit Wireless LANs: an overview of IEEE 801.11ac and 801.11ad. Recuperado de [https://cs.uwaterloo.ca/~Brecht/courses/856/readings/recent-advances/gbit\\_wlan-r6.pdf](https://cs.uwaterloo.ca/~Brecht/courses/856/readings/recent-advances/gbit_wlan-r6.pdf)
- Pollok, A. (2010). *Multi-Antenna Techniques for Millimetre-Wave Radios*. (Doctorado de Filosofía en Telecomunicaciones), University of South Australia, Australia. Recuperado de [http://anteny.jeziorski.info/wp-content/uploads/2011/10/1010\\_Pollok.pdf](http://anteny.jeziorski.info/wp-content/uploads/2011/10/1010_Pollok.pdf)

- Rangan, S., Rappaport, T. S., & Erkip, E. (2014). Millimeter Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges. Recuperado de <http://arxiv.org/pdf/1401.1560.pdf>
- Rappaport, T. S. (2014). *Millimeter Wave Celular Communications: Channel Models, Capacity Limits, Challenges and Opportunities*. Paper presented at the IEEE Comm. Theory Workshop, Curacao. Recuperado de [http://www.ieee-ctw.org/2014/slides/session1/Ted\\_Rappaport\\_CTW1014.pdf](http://www.ieee-ctw.org/2014/slides/session1/Ted_Rappaport_CTW1014.pdf)
- Rappaport, T. S., Ben-Dor, E., Murdock, J. N., & Qiao, Y. (2011). *38 GHz and 60 GHz Angle-dependent Propagation for Cellular & Peer-to-Peer Wireless Communications*. Paper presented at the 1011 IEEE International Conference on Communications, Ottawa, Canada. recuperado de <http://faculty.poly.edu/~tsr/Publications/2011.pdf>
- Rappaport, T. S., Heath, R. W., Daniels, R. C., & Murdock, J. N. (2015). *Millimeter Wave Wireless Communications*. In T. S. Rappaport (Series Ed.) Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, P. P. Hall (Ed.) Recuperado de <http://ptgmedia.pearsoncmg.com/images/9780131171188/samplepages/9780131171188.pdf>
- Ruetsch, L. (2013). What's The Difference Between IEEE 801.11ac And 801.11ad? Recuperado de <http://www.mwrf.com/test-amp-measurement/what-s-difference-between-ieee-8011ac-and-8011ad>
- Sadaghiyani, A., Shokouh, J. A., & Keshavarz, H. (2014). Electromagnetic Waves Scattering Distribution of Rough Surfaces at 60 GHz: Numerical and Analytical Modeling. *Advances in Natural and Applied Sciences*, 8(11). Recuperado de <http://www.aensiweb.com/old/anas/September%102014/50-67.pdf>
- Shi, W., Zhang, H., Wang, X., Wang, J., & Zhang, H. (2014). Research on Channel Estimation Algorithm in 60GHz System Based on 801.15.3c Standard. *Journal of Communications*, 9(1). Recuperado de <http://www.jocm.us/uploadfile/1014/0113/20140113110358859.pdf>
- Tie, X., Ramachandran, K., & Mahindra, R. (2011). *On 60 GHz Wireless Link Performance in Indoor Environments*. Paper presented at the Capacitación en NEC Labs America, Inc., EE.UU. Recuperado de <http://pam1011.ftw.at/papers/PAM1011paper15.pdf>
- Torkildson, E., Madhow, U., & Rodwell, M. (2010). *On the Feasibility of Spatial Multiplexing for Indoor 60 GHz Communication*. Paper presented at the mmCom'10, Chicago, Illinois, EE.UU. Recuperado de [http://www.ece.ucsb.edu/wcsl/Publications/mmcom10\\_eric.pdf](http://www.ece.ucsb.edu/wcsl/Publications/mmcom10_eric.pdf)
- Wang, J., Zhang, H., Lv, T., & Gulliver, T. A. (2011). Capacity of 60 GHz Wireless Communication Systems over Fading Channels. *JOURNAL OF NETWORKS*, 7(1), pp. 103-109. Recuperado de [www.ojs.academy-publisher.com/index.php/.../4103](http://www.ojs.academy-publisher.com/index.php/.../4103)
- Zhu, Y., et al. (2014). *Demystifying 60GHz Outdoor Picocells*. Paper presented at the MobiCom'14, Maui, Hawaii, USA. Recuperado de <https://www.cs.ucsb.edu/~ravenben/publications/pdf/60pico-mobicom14.pdf>