

# Throughput and Range Characterization of IEEE 802.11ah

Victor Baños-Gonzalez, M. Shahwaiz Afaqui, Elena Lopez-Aguilera, Eduard Garcia-Villegas

**Abstract**— The most essential part of Internet of Things (IoT) infrastructure is the wireless communication system that acts as a bridge for the delivery of data and control messages. However, the existing wireless technologies lack the ability to support a huge amount of data exchange from many battery driven devices spread over a wide area. In order to support the IoT paradigm, the IEEE 802.11 standard committee is in process of introducing a new standard, called IEEE 802.11ah. This is one of the most promising and appealing standards, which aims to bridge the gap between traditional mobile networks and the demands of the IoT.

In this paper, we first discuss the main PHY and MAC layer amendments proposed for IEEE 802.11ah. Furthermore, we investigate the operability of IEEE 802.11ah as a backhaul link to connect devices over a long range. Additionally, we compare the aforementioned standard with previous notable IEEE 802.11 amendments (i.e. IEEE 802.11n and IEEE 802.11ac) in terms of throughput (with and without frame aggregation) by utilizing the most robust modulation schemes. The results show an improved performance of IEEE 802.11ah (in terms of power received at long range while experiencing different packet error rates) as compared to previous IEEE 802.11 standards.

**Keywords**— IEEE 802.11ah, Internet of Things, IoT, WLAN.

## I. INTRODUCCIÓN

La clave para el concepto y el éxito de las ciudades inteligentes (un área de aplicación del paradigma del Internet de las cosas, IoT), que tiene como objetivo mejorar la calidad de vida y mitigar los servicios públicos en centros urbanos, se basa particularmente en el crecimiento exponencial de tecnologías de diferente radio frecuencias. Las ciudades inteligentes toman la ventaja de las redes de comunicación y de los sensores (como dispositivos IoT) para optimizar la logística de varias operaciones (como transporte, electricidad, etc.) para mejorar la calidad de vida de las personas que residen en las ciudades. En las ciudades inteligentes de hoy en día, las redes de sensores celulares e inalámbricas son las tecnologías dominantes usadas para retransmitir información hacia una oficina central de procesamiento. Se asume que la cantidad de información generada sobre dicho escenario es inmensa y creciente (dado

el incremento de dispositivos conectados), generando la necesidad de adoptar una tecnología universalmente aceptada, con costos económicos viables y con la característica de que la tecnología de las comunicaciones sea escalable en el marco del IoT. Las redes inalámbricas de área local (WLANs) basadas en IEEE (dado su facilidad de implementación y eficiencia de costes) podría ser usada como una tecnología alternativa viable para las Ciudades Inteligentes solo si las limitaciones de energía y el limitado número de estaciones asociadas son mejoradas. En años recientes, hemos sido testigos de una tremenda proliferación de redes WLAN basadas en IEEE 802.11.

La aceptación mundial de IEEE 802.11 ha resultado en implementaciones masivas en diversos ambientes (casas, oficinas, calles, campus universitarios, etc.) donde diferentes dispositivos (teléfonos inteligentes, computadoras portátiles, tabletas, etc.) utilizan el antes mencionado estándar como su principal método de acceso para conectarse a Internet. El IEEE 802.11 en su versión actual 802.11 a/g, n ó ac no se ha enfocado en desarrollar ninguna especificación para IoT. Actualmente, un grupo de trabajo de IEEE 802.11 (llamado TGah) está trabajando en la versión preliminar [1] de un nuevo estándar, el IEEE 802.11ah se enfoca en el IoT. La intención de este estándar es proveer una operación de bajo costo, con amplias áreas de cobertura y miles de estaciones asociadas a un punto de acceso (AP). Para evaluar como este nuevo estándar IEEE 802.11ah agrega valor a la familia 802.11 en términos de cobertura y rendimiento en nuevos casos de uso, comparamos su desempeño contra las especificaciones actuales del IEEE 802.11.

### A. Trabajos Relacionados

IEEE 802.11ah, tiene por objeto organizar las comunicaciones entre varios dispositivos usados en aplicaciones IoT, como redes (eléctricas, contadores, casas y sistemas de cuidado de la salud, e industria) inteligentes.

Para exponer los mecanismos claves de la próxima especificación IEEE 802.11ah, los autores en [2] proveen un resumen entendible. Al igual que en [3] y [4] los autores detallan las distintas características del IEEE 802.11ah. En [5], los autores destacan la importancia del estándar IEEE 802.11ah como una de las tecnologías clave de bajo costo, eficiente energéticamente y con un desarrollo masivo para dispositivos IoT en el futuro. Además, los autores evalúan el rendimiento máximo alcanzado en tres diferentes Esquemas de Modulación y Código (MCS) de IEEE 802.11ah utilizando varias suposiciones. También en [3], los autores muestran los resultados del rendimiento en la medición de datos del IEEE 802.11ah en términos de tasas de transferencia y distancia

---

Victor Baños-Gonzalez, Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech. Barcelona, Spain. victor.banos@entel.upc.edu  
M. Shahwaiz Afaqui, Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech. Barcelona, Spain. shahwaiz.afaqui@entel.upc.edu  
Elena Lopez-Aguilera, Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech. Barcelona, Spain. elopez@entel.upc.edu  
Eduard Garcia-Villegas Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech. Barcelona, Spain. eduardg@entel.upc.edu

alcanzada. Ellos comparan IEEE 80.11ah con 802.11b y 802.11n para tres casos de uso en interiores sin tomar en cuenta escenarios exteriores, que es el caso más utilizable para IEEE 802.11ah, (en nuestro trabajo actual, incluimos comparaciones entre casos de uso tanto en interiores como en exteriores). El trabajo en [6], proporciona una revisión exhaustiva de IEEE 802.11ah. Además, los autores resumen los procedimientos estandarizados así como los desafíos técnicos esperados en la adaptación del estándar IEEE 802.11ah. En [7], los autores definen diferentes casos de uso innovadores para el estándar IEEE 802.11ah. Entre los casos de uso propuestos, los autores resaltan un caso interesante donde el estándar IEEE 802.11ah será capaz de proporcionar la función correspondiente como un enlace backhaul para acomodar el intercambio de tráfico en largas distancias (p. ej. sensores remotos y transmisiones de secuencias de imágenes o videos de cámaras de vigilancia). Nuestra contribución en este documento son, en primer lugar, una breve pero actualizada visión general del estándar IEEE 802.11ah, de acuerdo con la última versión del documento. Segundo, desarrollamos una novedosa comparación nunca antes realizada en el desempeño del estándar IEEE 802.11ah con previas especificaciones (p. ej. IEEE 802.11a/n/ac) en términos de alcance y rendimiento (con y sin agregación de tramas). Al hacer esto, resaltamos al estándar IEEE 802.11ah como una de las tecnologías más efectivas para proporcionar un buen rendimiento a grandes distancias y esto da importancia al caso de uso de backhaul de IEEE 802.11ah. El resto del documento es organizado como sigue: En la sección II presentamos un resumen general de la tecnología IEEE 802.11. La Sección III brinda detalles de los escenarios evaluados incluyendo también un modelo analítico para el análisis de rendimiento. En la sección IV la evaluación de desempeño en términos de rangos de cobertura y rendimiento son expuestos. Finalmente, en la sección V se concluye el documento y se presenta el trabajo futuro.

## II. CARACTERISTICAS NOTABLES DE LA CAPA FISICA (PHY) Y LA CAPA MAC DEL IEEE 802.11AH.

Esta especificación intenta modificar el estándar IEEE 802.11 actual (en las capas PHY y MAC) con el objeto de extenderlo a operar en frecuencias por debajo de 1GHz (S1G) para acceso ubicuo en bandas de frecuencias menos interferidas y para soportar grandes números de estaciones asociadas dentro de la red. Dada la deficiencia encontrada en la escasa disponibilidad de bandas S1G, las modificaciones a la capa física pretenden mejorar la eficiencia espectral. Además, dada la intención de tener numerosos dispositivos IoT conteniendo por los recursos compartidos, la capa MAC de la nueva especificación está diseñada para administrar operaciones escalables. Además, las características propuestas de la capa MAC ayudan a mejorar la eficiencia energética entre estaciones que tienen fuentes de energía limitadas. Las redes eléctricas inteligentes, la automatización del hogar, ciudades inteligentes y aplicaciones de salud inteligentes requieren un promedio de tamaño en los datos de 100Bytes, rangos de cobertura de hasta 1km, más de 1000 dispositivos

conectados por AP y un promedio de 100 kbps de velocidad de datos. Es pertinente mencionar aquí que, dado el rediseño de las capas MAC y PHY, el nuevo estándar no se prevé que sea compatible con versiones anteriores. La Tabla I resume las características principales de IEEE 802.11ah y le compara con especificaciones de IEEE 802.11 propuestas previamente.

TABLA I. COMPARACIÓN ENTRE LAS ESPECIFICACIONES IEEE 802.11.

	802.11 a/g	802.11n	802.11ac	802.11ah
<b>Configuración de las antenas</b>	1×1 SISO	4×4 MIMO	8×8 MIMO	4×4 MIMO
<b>Modulación máxima</b>	BPSK al 64-QAM	BPSK al 64-QAM	BPSK al 256-QAM	BPSK al 256-QAM
<b>Anchos de banda de canal</b>	5, 10 MHz (11a), 20 MHz (11a/g)	20 y 40 MHz	20, 40, 80 y 160 MHz	1, 2, 4, 8 y 16 MHz
<b>Tamaño FFT</b>	64	64 (20 MHz), 128 (40MHz)	64, 128, 256 y 512	32, 64, 128, 256 y 512
<b>Año de aprobación</b>	1999/2003	2009	2014	2016 (draft)
<b>Mín. y Max.tasa de transferencia</b>	6 y 54 Mbps	6.5 y 600 Mbps	6.5 y 6933.3 Mbps	0.15 y 347 Mbps
<b>Max. num. de STAs por AP</b>	2007	2007	2007	Más de 8000

En la siguiente sección, damos una breve descripción de las mejoras a las capas PHY y MAC propuestas por el estándar IEEE 802.11ah.

### A. Capa PHY.

La capa física de IEEE 802.11ah hereda sus principales características de IEEE 802.11ac, pero está adaptada para operar en la banda de frecuencia S1G. Está diseñada para operar utilizando Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) así como Múltiples Entradas, Múltiples Salidas (MIMO) incluyendo multiusuario MIMO (MU-MIMO) sobre el downlink, adicionalmente, soporta varios MCSs (por ejemplo desde MCS0 al MCS10), de cualquier forma, debido a las capacidades limitadas y a los requerimientos de transferencia de datos limitados para ciertas aplicaciones, las modulaciones más altas e incluso múltiples flujos no serán ampliamente soportados o requeridos para las primeras certificaciones Wi-Fi. La Tabla II resalta las principales características de la capa PHY del estándar 802.11ah. En la siguiente sección, exponemos las principales modificaciones a la capa física propuestas por 802.11ah que corrobora su operación en dispositivos IoT.

1) Espectro disponible: Dada la disponibilidad limitada del espectro libre en 1GHz y debido a la intención de permitir que los dispositivos Wi-Fi obtengan acceso al canal para transmisiones de corta duración, el ancho de canal básico utilizado en IEEE 802.11ah es 1MHz pero la unión de canales se puede aplicar para crear canales de hasta 16MHz de ancho (véase Tablas I y II). De cualquier forma, se espera que los

primeros dispositivos comerciales soporten hasta 4MHz.

2) Modos de transmisión: El principal requisito de esta modificación es extender el rango de operación y por lo tanto facilitar el acceso a dispositivos IoT (ubicados a grandes distancias) que requieren tasas de transferencias bajas.

TABLA II. PARÁMETROS DE LA CAPA PHY EN IEEE 802.11ah.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Frecuencia de portadora	863-868MHz Europa 902-928MHz EUA	Ancho de banda (MHz)	1, 2, 4, 8, 16
Número de datos /total de subportadoras por símbolo OFDM	24/32 (1MHz) 52/64 (2MHz) 108/124 (4MHz) 234/256 (8MHz) 468/512 (16MHz)	Tipo de preámbulo	Corto (1MHz). Largo (2,4,8,16MHz)
Número de secuencias espaciales (SS)	1 – 4	Distancia entre subportadoras	31.25 (kHz)

Este requerimiento antes mencionado se cumple introduciendo transmisiones de 1MHz de ancho y usando un nuevo índice MCS (llamado MCS10). Este esquema es efectivamente MCS0 con un añadido de 2x repeticiones (donde la repetición de los símbolos OFDM es desempeñada con permutación de subportadoras). Aparte de 1MHz, el estándar IEEE 802.11ah también soporta 2, 4 y 16MHz donde la capa PHY es efectivamente 10 veces menor a la versión de IEEE 802.11ac, por ejemplo el símbolo OFDM en el estándar IEEE 802.11ah es 10 veces más largo que en IEEE 802.11ac.

#### B. Capa MAC.

La capa MAC de IEEE 802.11ah incluye mejoras para cumplir específicamente los requerimientos para comunicaciones de largo alcance y casos de uso enfocados a IoT. Además, la capa MAC es optimizada para abarcar un modo de operación de bajo consumo de energía así como métodos para soportar grandes cantidades de dispositivos en una sola celda. En la siguiente sección describimos en detalle las mejoras propuestas por IEEE 802.11ah a la capa MAC.

1. Formato de trama compacto para aumentar el rendimiento: las estaciones IEEE 802.11ah en la mayoría de los casos de uso se espera que funcionen con velocidades de transmisión de datos bajos y con la intención de intercambiar tramas de datos pequeños. Específicamente para dispositivos IoT, la sobrecarga asociada con las cabeceras de las tramas (p. ej. la cabecera MAC) podría ser considerable cuando se compara con el tamaño de la carga útil. Con el fin de contrarrestar la sobrecarga de datos e incrementar la eficiencia y por lo tanto el rendimiento global, el diseño de MAC de IEEE 802.11ah introduce un formato de las tramas compactados.

##### a. Formato de la cabecera MAC corta.

El cambio significativo en el diseño de la nueva cabecera es

la inclusión de solo dos campos de dirección obligatorios en comparación con los cuatro campos de dirección presentes en la cabecera original MAC. Los campos de Calidad de Servicio (QoS) y alto rendimiento (HT) se desplazan a el campo SIG en la cabecera PHY y el campo Duración/ID es removido (porque la detección de portadora virtual no se utiliza mientras se utiliza la cabecera MAC corta). Así, la cabecera MAC corta es capaz de reducir la sobrecarga (de 30Bytes a 18Bytes).

##### b. Tramas de control MAC cortas.

Para reducir la sobrecarga inducida por las tramas de control IEEE 802.11ah utiliza Paquetes de Datos Nulos (NDP), los cuales contienen la cabecera PHY sin ningún otro dato. Diferentes tramas de control (p. ej. CTS, ACK, trama PS-Poll, etc.) son sustituidos por tramas NDP para reducir la sobrecarga de protocolo.

2) Restringir los efectos de desvanecimiento: Con el objeto de hacer frente al problema de desvanecimiento del tiempo y frecuencia selectiva a través de canales de banda estrechos, IEEE 802.11ah implementa una nueva característica llamada Transmisión Selectiva de SubCanal (SST). Este esquema permite a las estaciones cambiar rápidamente entre series de sub-canales específicas durante la transmisión donde el canal es seleccionado basado en medidas indicando las condiciones del desvanecimiento a corto plazo y/o el nivel de interferencia desde otras estaciones.

3) Grandes cantidades de estaciones con agrupamiento Jerárquico: Para incrementar el número de estaciones soportadas, IEEE 802.11ah utiliza una novedosa estructura de Identificador de Asociación jerárquico (AID). El AID asignado por el punto de acceso durante la asociación consiste en 13bits y por lo tanto el número de estaciones que se puede asociar va hasta  $2^{13} - 1$  (8,1911). La estructura AID consiste en cuatro niveles jerárquicos (página, bloque, sub-bloque, e índice de la estación en cada sub-bloque). IEEE 802.11ah utiliza la estructura antes mencionada para agrupar estaciones basándose en características similares (p. ej. patrón de tráfico, ubicación, nivel de batería, etc.).

##### 4) Acceso de Canal:

IEEE 802.11ah define un nuevo período de acceso al canal libre de contención llamado Ventana de Acceso Restringido (RAW). Este método de acceso es diseñado para reducir colisiones mejorando la eficiencia del canal. El AP coordina el uplink de acceso al canal de las estaciones definiendo los intervalos de tiempo de RAW en los cuales clases específicas de dispositivos reciben acceso exclusivo al medio compartido.

##### 5) Modo de Ahorro de Energía:

Con el objetivo de soportar numerosos dispositivos IoT, el TGah ha puesto primordial importancia en desarrollar y mejorar los mecanismos de ahorro de energía. IEEE 802.11ah propone usar el método de intercambio de tramas de velocidad que permita a un AP y a una estación no-AP intercambiar una secuencia de tramas de uplink y downlink durante una Oportunidad de Transmisión (TXOP) reservada. Este esquema ayuda a extender la vida de la batería de las estaciones manteniéndolas despiertas por periodos más cortos de tiempo.

En lugar de usar el mismo periodo máximo de inactividad<sup>2</sup> para todos los nodos (por ejemplo 18.64 horas), IEEE 802.11ah tiene como objetivo utilizar diferentes periodos para diferentes dispositivos (por ejemplo desde 18.64 horas hasta 186 horas). Además, IEEE 802.11ah permite a una estación informar al AP acerca del tiempo de duración que tiene la intención de permanecer en modo de sueño. Durante el modo de sueño, la estación no está destinada a escuchar beacons y entonces puede reducir su consumo de energía.

### C. Casos de Uso.

IEEE 802.11ah presenta tres casos de uso básicos [2]

#### 1) Sensores inteligentes y contadores:

En este caso de uso, el AP cubre un gran número de dispositivos (sensores). Hay miles de estaciones conteniendo por el canal, operando en largos rangos de transmisión junto con movilidad estacionaria. La relación de AP a la estación es de 1/6000. Los escenarios más comunes son grandes espacios interiores así como exteriores en ambientes urbanos, suburbanos y rurales. En estos escenarios, los dispositivos típicamente envían tráfico en el orden de 100kbps de tasa de transferencia de datos, consistiendo en tramas cortas.

2) La agregación Backhaul y el punto de acceso de rango extendido: Los dispositivos sensores de IEEE 802.15.4 muestran una duración de la batería extendida, de cualquier forma, el rango de transmisión y la velocidad de datos disponibles son muy bajos (algunos kbps). Así, un escenario en el que los ruteadores IEEE 802.15.4 reúnen los datos de los dispositivos (sensores) y transmiten la información a servidores usando enlaces IEEE 802.11ah resulta muy atractivo (Fig. 1). Este caso de uso se dirige a ambientes industriales externos y rurales con menos de 1Mbps de tasa de transmisión de datos por estación, junto con dispositivos estacionarios o de movilidad reducida. La relación del punto de acceso a la estación es de 10/500.

#### 3) Punto de acceso de rango extendido y descarga celular:

Tanto su alto rendimiento como su gran rango de transmisión hacen atractivas las transmisiones en la banda de frecuencia S1G para extender el rango del punto de acceso y como descarga del tráfico en redes móviles, lo cual es un problema significativo para operadores y vendedores dada la explosión de tráfico móvil. IEEE 802.11ah proporcionará valor adicional real, especialmente en países con un espectro S1G amplio disponible (como EUA). Este caso de uso está dirigido a usos exteriores en ambientes urbanos y suburbanos con menos de 20Mbps de velocidad de transferencia de datos, junto con la movilidad de los peatones. TGah deberá considerar los modelos de tráfico para las aplicaciones específicas para TGah como: Navegación web con 256kbps por enlace y un tamaño de MSDU de 1000Bytes en TCP, transmisión de vídeo/áudio en tiempo real desde 100kbps hasta 4Mbps por enlace y un tamaño de MSDU de 512Bytes en UDP y las transmisiones de audio en tiempo real de 64 kbps a 256kbps por enlace y un tamaño de MSDU de 418Bytes (UDP). La relación de AP a la estación es de 1/50.

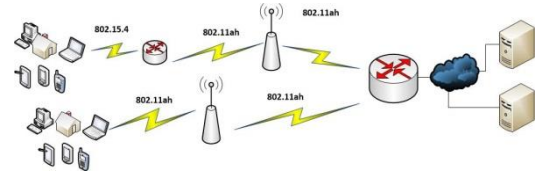


Figura 1. Backhaul en red de sensores.

## III. ESCENARIO DE EVALUACIÓN

Presentamos una comparación entre IEEE 802.11ah y las especificaciones 802.11(a, n, ac) en términos de rendimiento y rangos de transmisión. Nuestro escenario de evaluación consiste en un solo enlace de radio compuesto por dos estaciones (un transmisor y un receptor) que intercambian tramas de datos con diferentes tamaños de carga útil. La sección IV muestra en detalle la configuración usada en las estaciones. El MCS más robusto es considerado para las diferentes especificaciones IEEE 802.11. Específicamente, con respecto a 802.11ah, el MCS10 es tomado en cuenta (usando un ancho de banda de canal de 1MHz, 1 secuencia espacial, usando el intervalo de guarda larga en las transmisiones y 150kbps de tasa de transferencia de datos). Con respecto a IEEE 802.11(n y ac), usamos el MCS0 con un ancho de canal de 20MHz, 1 secuencia espacial, usando el intervalo de guarda larga y 6.5Mbps son considerados. La Tabla III muestra los parámetros PHY y MAC empleados.

### A. Modelo de canal

Consideramos los modelos de propagación elegidos por TGah [8]:

Macro implementaciones: escenarios en exterior con una antena sobre un techo a 15 metros de altura:

$$PL = 8 + 37.6 \log_{10}(d) \quad (1)$$

Donde  $d$  corresponde a la distancia en metros entre el transmisor y el receptor, la portadora modulada en la frecuencia de radio de 900MHz. Para otras frecuencias, un factor de corrección de  $21 \cdot \log_{10}(f/900\text{MHz})$  debe ser aplicado.

Pico implementación: es un escenario exterior con una antena colocada en el techo de un edificio:

$$PL = 23.3 + 36.7 \log_{10}(d) \quad (2)$$

Donde las mismas condiciones respecto a la distancia y frecuencia que en la ecuación (1) son aplicados. El modelo de propagación para escenarios interiores del TGah: Este se modela reduciendo las operaciones de frecuencia del modelo de propagación en el espacio libre del TGn. Este modelo consiste en el uso de una propagación de espacio libre (pendiente de 2) hasta una distancia de punto de quiebre (dBp), y emplea una pendiente de 3.5 después del punto de quiebre. Consideramos un escenario interior grande de espacio abierto sin líneas de visión (NLoS) (Modelo C con dBp de 5m), y con condiciones de líneas de visión (LoS) (Modelo D con dBp de 10m). Ambos modelos de interiores corresponderían a un ambiente de una fábrica/nave industrial.

<sup>2</sup> Tiempo durante el cual una estación no-AP puede abstenerse de transmitir al AP antes de ser desasociado por inactividad.

$$L(d) = \begin{cases} L_{FS}(d) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi f_c}{c} \right) d \leq d_{BP} \\ L_{FS}(d_{BP}) + 35 \log_{10} \left( \frac{d}{d_{BP}} \right) d > d_{BP} \end{cases} \quad (3)^3$$

Donde  $d$  corresponde a la distancia en metros entre el transmisor y el receptor,  $f_c$  es la frecuencia central de la portadora en MHz y  $c$  es la velocidad de la luz en m/s.

#### B. Modelo de medición del rendimiento

Inicialmente consideramos condiciones ideales de transmisión. Entonces, la expresión del rendimiento  $S$  en Mbps es como sigue [10]:

$$S = \frac{L_{data} \times 8}{T_{message}} \quad (4)$$

Donde  $L_{data}$  corresponde al tamaño de la carga útil y  $T_{message}$  es calculado como:

$$T_{message} = DIFS + T_{DATA} + SIFS + T_{ACK} + T_{BACKOFF} + 2\delta \quad (5)$$

$DIFS$  y  $SIFS$  son dados en la Tabla III,  $\delta$  es el retraso de propagación,  $T_{ACK}$  corresponde a la duración de una trama ACK y  $T_{DATA}$  representa el tiempo de transmisión de una trama de datos, la cual depende mayormente del tamaño de la carga útil y la tasa PHY. El cálculo de  $T_{DATA}$  y  $T_{ACK}$  también depende de las especificaciones de IEEE 802.11 usadas en la transmisión. Bajo condiciones ideales en el canal consideramos  $T_{BACKOFF}$  es, en promedio  $CW_{min}/2$  veces  $T_{Slot}$ .  $T_{DATA}$  es calculado de acuerdo a la ecuación (6). Los tamaños de trama son dados en bytes y la duración de la trama en  $\mu s$ .

$$T_{DATA} = T_{Preamble\&Header} + (T_{Sym} * N_{sym}) \quad (6)$$

Donde  $T_{Preamble\&Header}$  es dado en la Tabla III,  $T_{Sym}$  es la duración de un símbolo y  $N_{sym}$  es el número de símbolos del PSDU.  $N_{sym}$  para el MCS más robusto de los diferentes estándares es dado en las ecuaciones (7 y 8).

$$N_{symAH} = \left\lceil \frac{14 + (L_{Header} + L_{data}) * 8}{6} \right\rceil \quad (7)$$

$$N_{symAC/N2.4/N5} = \left\lceil \frac{22 + (L_{Header} + L_{data}) * 8}{26} \right\rceil \quad (8)$$

Los cálculos de  $N_{symA}$  son los mismos que en la ecuación (7) con valor constante de 22 en lugar de 14, y los cálculos de  $T_{ACK}$  emplea las ecuaciones previamente expuestas de  $T_{DATA}$  con 14Bytes en lugar de  $L_{Header} + L_{data}$ . Por otra parte, en caso de que NDP sea utilizado como ACK, no hay campo de datos y el número de símbolos ( $N_{sym}$ ) es igual a 0. Se debe Tomar en cuenta que todos los cálculos previos son presentados sin tomar en cuenta errores de recepción. Después consideramos un escenario propenso a errores y calculamos expresiones de rendimiento (en Mbps) como en la ecuación (4), simplemente multiplicando el numerador por  $(1 - PER)$ , donde  $PER$  corresponde a la Tasa de Error de Paquete y su valor depende del MCS usado y el número de bits transmitidos. Por otro lado, la presencia de errores causan retransmisiones y por lo

tanto, el efecto de IEEE 802.11 aumenta exponencialmente el mecanismo de backoff ahora debe ser considerado como sigue:

$$T_{BACKOFF} = \sum_{i=1}^{\infty} PDR(i) T_{backoff}(i) \quad (9)^4$$

Recordemos que el escenario consiste en un radio enlace con un transmisor y un receptor, es decir, que no hay disputas con otras estaciones y las retransmisiones se deben únicamente a los errores de bit causados por el ruido. Una transmisión con éxito requiere que ni la trama de datos ni el ACK se reciba con errores. Dado que la trama ACK es más corta y se envía utilizando la modulación más fiable, consideramos el  $PER$  correspondiente a las tramas ACK insignificante. Entonces  $PDR(i)$  es dado por:

$$PDR(i) = (1 - PER) * PER^{i-1} \quad (10)$$

$T_{backoff}(i)$  sigue la expresión

$$T_{backoff}(i) = \begin{cases} \frac{2^{i-1}(CW_{min} + 1) - 1}{2} T_{Slot} & , 1 \leq i < m \\ \frac{CW_{max}}{2} T_{Slot} & , i \geq m \end{cases} \quad (11)$$

Donde  $m$  es el número máximo de etapas de backoff y corresponde a 6 (i.e.  $CW_{max} = 2^6 CW_{min}$ ).  $CW_{min}$ ,  $CW_{max}$  y  $T_{Slot}$  son todos parámetros dependientes del estándar (véase Tabla III). Para cada retransmisión el rango de valores que puede ser dado a  $T_{backoff}(i)$  es doblado hasta que  $CW_{max}$  sea alcanzado. Para cálculos de A-MPDU, asumimos un intercambio de bloque ACK (BA) después de los datos, donde la trama de BA siempre es recibida sin importar el  $PER$ .

TABLA III: PARÁMETROS MAC/PHY

Especificación	SIFS ( $\mu s$ )	DIFS ( $\mu s$ )	Tpreamble &header ( $\mu s$ )	MAC& LLC Header Size (Bytes)	Signal Extensions ( $\mu s$ )	TSym ( $\mu s$ )	TSlot ( $\mu s$ )	CWmin	CWmax
802.11ah cabecera MAC corta	160	264	560	26	n/a	40	52	15	1023
802.11ah cabecera MAC larga	160	264	560	36	n/a	40	52	15	1023
802.11ac	16	34	40	36	n/a	4	9	15	1023
802.11n 2.4 GHz	10	28	36	36	6	4	9	15	1023
802.11n 5 GHz	16	34	36	36	0	4	9	15	1023
802.11a	16	34	20	36	n/a	4	9	15	1023

Consideramos el mismo escenario propenso a errores usado antes, teniendo en mente que estamos transmitiendo en la tasa de transmisión de datos más segura en todos los casos.

<sup>3</sup> Nótese que el modelo de propagación del canal en escenarios interiores ha sido modificado de acuerdo a [10].

<sup>4</sup> El número de transmisiones es  $i$ ,  $PDR(i)$  es la probabilidad de una recepción exitosa después de  $i$  transmisiones, y  $T_{backoff}(i)$  es el tiempo promedio de backoff después de  $i$  transmisiones consecutivas de la misma trama.

Consideramos las tramas de datos de un tamaño máximo de 1500Bytes en IEEE 802.11n/ac. Para 802.11ah, las tramas de datos son limitadas a 511Bytes a 1MHz usando MCS10 y una secuencia espacial [1] (incluyendo el preámbulo y la cabecera) y por lo tanto la carga útil máxima es 475Bytes para el caso de cabecera larga y 485Bytes para el caso de cabecera corta. Con A-MPDU, el rendimiento es calculado de acuerdo a la ecuación (4), modificando solo el numerador por  $(1 - PER)L_{data} \times 8 \times K$  donde K es el número de tramas agregadas (de igual tamaño). Se debe tomar en cuenta que ahora el número de símbolos  $N_{sym}$  es como sigue.

$$N_{symAH} = \left\lceil \frac{8 * K * (L_{Header} + L_{data}) + 14 + K * L_{deli} * 8 + L_{BAR} * 8}{6} \right\rceil \quad (12)$$

Los cálculos  $N_{symAC/N2.4/N5}$  son los mismo que en la ecuación (12) con el valor constante de 22 en lugar de 14, correspondiente al número de bits en el campo de servicio más la multiplicación del número de bits de cola por codificador de código convolucional binario (BCC) y el número de codificadores BCC. También el denominador se cambia de 6 a 26, que corresponde al número de bits por símbolo de la modulación más confiable,  $L_{deli}$  es el tamaño del delimitador entre tramas agregadas (4Bytes). Para el cálculo  $T_{ACK}$ , la trama BA de 32bytes es considerada.

#### IV. RESULTADOS

En esta sección seguimos las expresiones dadas en Sección III para comparar el alcance máximo y el rendimiento esperado para diferentes tecnologías IEEE 802.11. Como se mencionó antes, primero evaluamos la potencia recibida en diferentes escenarios de propagación y después proporcionamos rendimientos estimados en función a diferentes valores de PER. Para cada una de las tecnologías estudiadas (IEEE 802.11 ah/ac/n/a), utilizamos la configuración PHY que proporciona los rangos más largos; es decir, seleccionamos los MCS más fiables con el ancho de banda más estrecho posible (menor sensibilidad requerida) y establecemos la máxima potencia transmitida permitida para cada banda (véase Tabla IV). Los resultados son dados en la Tabla V. IEEE 802.11ah se beneficia de una banda de frecuencia más baja, incurriendo en menos pérdidas de propagación, un ancho de banda estrecho, mejorando la densidad espectral de potencia y un esquema de codificación más robusto. Por estas razones, IEEE 802.11ah tiene la cobertura más amplia. En todos los casos, IEEE 802.11ah muestra un rango de cobertura, por lo menos, un aumento de cinco veces en relación con IEEE 802.11a (segundo mejor rango), y más de diez veces el rango proporcionado por el estándar IEEE 802.11n en la banda de 2.4GHz (caso menos favorable). Ninguno de los escenarios interiores considerados en los casos de uso establecidos para IEEE 802.11ah (por ejemplo fábrica, almacén, oficinas abiertas, etc.) requerirá una cobertura tan extensa. En esos casos, el aumento del rango de cobertura ofrecida por IEEE 802.11ah no puede compensar el sacrificio en el rendimiento, como se explica a continuación.

Se debe tener en cuenta que en la ecuación (3), no se considera el efecto de las paredes. También hacemos notar que no consideramos los beneficios de las técnicas de diversidad espacial disponibles gracias a la tecnología MIMO. Estas técnicas podrían aumentar el rango de alcance de IEEE 802.11 n/ac/ah entre 10 y 30m, dependiendo del escenario y la configuración de las secuencias espaciales. A continuación, en las Fig. 2 a la 4, se muestra el rendimiento que puede lograrse entre un único par de transmisor y receptor en los límites de su cobertura. Mostramos valores de rendimiento para diferentes tamaños de carga útil (entre 12 y 1500Bytes) y diferentes PER. Los valores de sensibilidad indicados en la Tabla IV garantizan PER <10%, pero un enlace puede ser utilizable en proporciones más altas de error; por lo tanto, proporcionamos valores de rendimiento para PER entre 0 y 50%.

TABLA IV. CONFIGURACIÓN PHY PARA EL ENLACE MÁS ROBUSTO<sup>5</sup>.

Especificación	802.11ah	802.11ac	802.11n	802.11a
Frecuencia (GHz)	0.9	5.15, 5.45	2.4	5.15, 5.45
Ptx (mW)	1000	200, 1000	100	200, 1000
Sensibilidad (dBm)	-98	-82	-82	-88
Ancho de banda (MHz)	1	20	20	5
Modulación	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK
Velocidad de codificación	1/2 with 2x rep.	1/2	1/2	1/2
Velocidad de transmisión (Mb/s)	0.15	6.5	6.5	1.5
Intervalo de guarda (ns)	8000	800	800	800

Lógicamente, el aumento de la carga útil reduce la sobrecarga, lo que permite un mayor rendimiento efectivo. Tener en cuenta que el uso de la agregación aumentaría la eficiencia de IEEE 802.11 n/ac/ah aún más cerca del límite impuesto por la velocidad PHY (véase Tabla IV). Sin embargo, el impacto de la agregación es limitada ya que, utilizando las modulaciones más lentas; no podemos tomar ventaja de un alto nivel de agregación sin exceder la duración máxima permitida para una trama en la capa física.

TABLA V. MÁXIMOS RANGOS DE COBERTURA.

Especificación	802.11ah	802.11ac	802.11n	802.11a
Frecuencia (GHz)	0.9	5.15, 5.45	2.4	5.15, 5.45
Distancia máxima (metros)				
Macro implementación	1561	151,221	191	211,311
Pico implementación	721	65,93	81	91,141
Interior C	1138	94,142	118	140,211
Interior D	1531	125,191	158	185,283

<sup>5</sup> Nótese que el estándar IEEE 802.11 provee soportes de media y un cuarto de operación (p. ej. 10 y 5MHz) solamente en la cláusula 18 (11a).

También considerar que, dado que los escenarios de interés son al aire libre o espacios interiores abiertos, consideramos el intervalo de guarda largo en todos los casos.

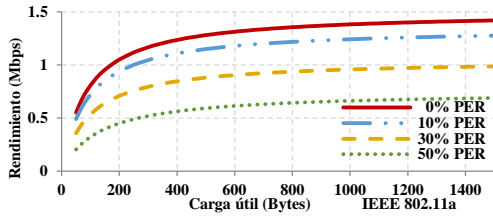


Figura 2. Rendimiento vs. Carga útil para IEEE 802.11a.

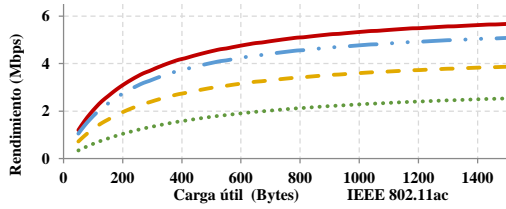


Figura 3. Rendimiento vs. Carga útil para IEEE 802.11ac.

La Figura 2 muestra la evolución de IEEE 802.11a que funciona a una PHY de 1.5 Mbps. Proporciona un rendimiento máximo de 1.43Mbps (sin hay errores y carga útil de 1500Bytes), que es más de la mitad (0.70Mbps) cuando el PER aumenta a 50%. Con carga útil de 50Bytes, el rendimiento máximo se reduce a 0.60Mbps sin errores y a 0.22Mbps con PER de 50%. Debido a las limitaciones de espacio y dado que las diferencias entre el rendimiento obtenido por IEEE 802.11n y 11ac son mínimas, a razón de 6.5Mbps, sólo se muestran los resultados para IEEE 802.11ac en la Fig. 3. En tanto para IEEE 802.11ac y para 11n, el máximo rendimiento con 1500Bytes de carga útil es de alrededor de 5.6Mbps, que se reduce a 2.5Mbps cuando el PER es 50%. En el otro extremo, es decir, con tamaño de carga útil de 12Bytes, el rendimiento obtenido con PER = 50% es de menos de un cuarto del rendimiento sin errores (de 0.33 a 0.08Mbps). IEEE 802.11ah permite el uso de una cabecera MAC más corta para reducir la sobrecarga. Sin embargo, hemos observado mejoras de rendimiento mínimos (es decir, menos de 1%) cuando se utilizaron las cabeceras cortas y NDP ACK.

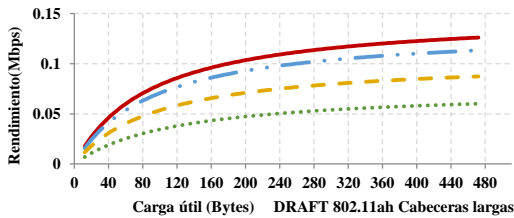


Figura 4. Rendimiento vs. Carga útil para IEEE 802.11ah (Cabecera MAC larga y ACK normal).

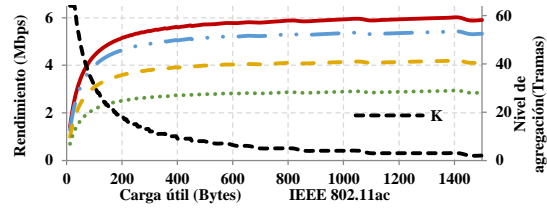


Figura 5. A-MPDU Rendimiento vs. Carga útil para IEEE 802.11ac.

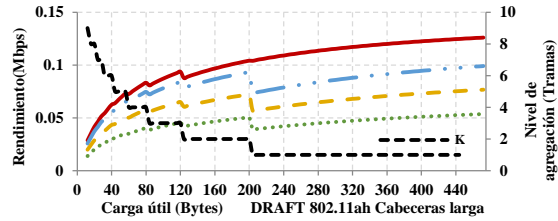


Figura 6. A-MPDU Rendimiento vs. Carga útil para IEEE 802.11ah.

Es por esto que en la figura 4, representamos gráficamente los resultados de rendimiento utilizando cabeceras largas y ACK normal. Está claro que el enlace más confiable de IEEE 802.11ah es mucho más lento que en las otras tecnologías (150kbps). Algunas de las características que dan a 802.11ah el mayor alcance se convierten en un inconveniente cuando se compara el rendimiento. Los resultados denotan un rendimiento máximo en 475Bytes-carga útil de 126kbps (reducidos a 60kbps cuando PER = 50%). Con 12Bytes, el rendimiento varía de 17.6kbps (sin errores) para 6.9kbps (PER = 50%). En la Fig. 5, la agregación de tramas A-MPDU (IEEE 802.11ac y 11n) proporcionan un rendimiento máximo (PER = 0%) de 6.71Mbps con 1500Bytes (K=3). PER de 50% se reduce a 3.35Mbps. Con la trama más corta probada, es decir 12Bytes, obtenemos 1.56Mbps de rendimiento con 64 MPDUs (K=64) con el 0% PER y 0.78Mbps a 50% PER (x4 y x8 veces el rendimiento sin agregación). Teniendo en cuenta 11ah y A-MPDU (Fig. 6) con la carga útil mínima (12Bytes de datos), logramos 36.9kbps con 9 MPDUs (K=9) y el PER es igual a 0%. Nótese que usando la carga útil máxima, es decir, 475Bytes, no hay agregación posible. También tener en cuenta que el rendimiento frente a las líneas de tamaño de carga útil se rompen cada vez que el número de tramas agregadas se reduce con el fin de no exceder la trama física máxima permitida [1] (es decir, menos tramas pueden ser agregadas a medida que aumenta su tamaño).

## V. CONCLUSIONES

En este documento, proporcionamos una comparación entre IEEE 802.11ah y los actuales estándares IEEE 802.11 a/n/ac en términos de alcance y rendimiento. Los resultados detallados indican que IEEE 802.11ah se beneficia de una cobertura más amplia, debido a la banda de frecuencia inferior, el ancho de banda más estrecho y un esquema de codificación más robusto. Este muestra, por lo menos, un aumento de cinco veces con respecto al segundo mejor rango (IEEE 802.11a), y más de diez veces de mejora con respecto al peor de los casos (IEEE 802.11n en la banda de 2.4GHz). Por



otro lado, IEEE 802.11ah presenta el rendimiento más bajo, en comparación con otras especificaciones; un rendimiento máximo de 144kbps (reducido a 71kbps cuando PER = 50%) se puede lograr en los límites de su cobertura estimada, lo cual es suficiente para los casos de uso de esta tecnología busca cubrir. Teniendo en cuenta los escenarios de casos de uso en el que el tamaño de las tramas de datos es inherentemente pequeño, el uso de la característica de agregación mitiga un poco el exceso de sobrecarga, pero su impacto es limitado por las bajas tasas de datos que los dispositivos 802.11ah soportan. En nuestro trabajo futuro, tenemos previsto ampliar nuestra comparación mediante simulaciones de escenarios más complejos.

## REFERENCIAS

- [1] IEEE P802.11ah/D 6.0 Draft Part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications – amendment draft.
- [2] E. Khorov, A. Lyakhov, A. Krotov, A. Guschin. A survey on IEEE 802.11ah: An enabling networking technology for smart cities. Elsevier Computer Communications, 58(1): 53-69, March 2015.
- [3] V. Jones, H. Sampath. Emerging technologies for WLAN. IEEE Communications Magazine, 53(3): 141-149, March 2015.
- [4] T. Adame, A. Bel, B. Bellalta, J. Barcelo, M. Oliver. IEEE 802.11ah: the WiFi approach for M2M communications IEEE Wireless Communications, 21(6):144-152, December 2014.
- [5] O. Raeesi, J. Pirskanen, A. Hazmi, J. Talvitie, M. Valkama. Performance Enhancement and Evaluation of IEEE 802.11ah Multi-Access Point Network Using Restricted Access Window Mechanism. In Proc. of IEEE DCOSS 2014, pp.287-293, May 2014.
- [6] Aust, S.; Prasad, R.; Niemegeers, I.G.M.M., "Outdoor Long-range WLANs: A Lesson for IEEE 802.11ah," Communications Surveys & Tutorials, IEEE , no.99, pp.1,1 /COMST.2015.2429311
- [7] R. de Vegt. Potential compromise for 802.11ah use case document. IEEE 802.11-11/0457r0, March 2011.
- [8] R. Porat. TGah channel model. IEEE 802.11-11/0968r1, Jul 2011.
- [9] E.Garcia-Villegas. Corrections to TGah Channel Model. IEEE 11-15-0425-01-00ah, March 2015.
- [10] E. Garcia-Villegas, J.L. Ferrer, E. Lopez-Aguilera, R. Vidal, J. Paradells. Client-driven load balancing through association control in IEEE 802.11 WLANs. European Transactions on Telecommunications, 20(5):494–507, August 2009.



Víctor Baños-González es Ingeniero Electrónico por el Instituto Tecnológico de la Laguna, México. Realizó la maestría en tecnologías de la información en la UNID (2009), México y está llevando a cabo su investigación como estudiante de Doctorado (desde 2014) en la Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech (UPC), bajo la dirección de la Dr. Elena Lopez-Aguilera y el Dr. Eduard Garcia-Villegas. Actualmente es parte del grupo de redes inalámbricas (WNG) y su área de investigación incluye redes inalámbricas de largo alcance y tecnologías habilitadoras del Internet de las Cosas.



Muhammad Shahwaiz Afaqui es ingeniero en computación por parte de la University, Pakistan COMSATS, obtuvo la maestría en ingeniería eléctrica (Sistemas Inalámbricos) del Royal Institute of Technology (KTH), Suecia, en los años 2004 y 2009 respectivamente. En 2012 se unió al grupo de redes inalámbricas (WNG) de la Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech (UPC) como estudiante de doctorado, y está llevando a cabo su investigación bajo la dirección del Dr. Eduard Garcia-Villegas y la Dr. Elena Lopez-Aguilera. Su área de interés incluye seguridad de las redes computacionales y el análisis de rendimiento y optimización de las redes inalámbricas actuales y de próxima generación.



Dr. Elena Lopez-Aguilera recibió el título de ingeniero de Telecomunicaciones en 2001 y el de Doctor en 2008 por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Compagina su labor docente en la UPC con tareas de investigación en el seno del grupo de redes inalámbricas (WNG) del Departamento de Ingeniería Telemática. Su área de investigación se centra en el estudio de las redes de área local inalámbricas en entornos heterogéneos, redes de sensores y tecnologías asociadas a la Internet de las Cosas. Ha publicado más de 30 artículos en revistas y conferencias, además de estar involucrada en proyectos en colaboración con empresas e instituciones académicas del sector.



El Dr. Eduard Garcia-Villegas es ingeniero de Telecomunicaciones por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) y obtuvo en 2010 el título de doctor en la misma universidad tras sus trabajos de investigación sobre la optimización de redes Wi-Fi. Actualmente, participa activamente en el desarrollo de nuevos estándares en el grupo de trabajo del IEEE P802.11 mientras lleva a cabo actividad docente en la UPC y colabora en la investigación del grupo de redes inalámbricas (WNG) y la Fundació i2CAT en campos como las redes 5G, redes de sensores, aplicaciones para ciudades inteligentes y otras tecnologías facilitadoras de la Internet de las Cosas.