

# Estudio, Pruebas y Simulación del Estándar IEEE 802.11ac Basándose en MU-MIMO (MIMO Multiuser)

Ricardo Llugsí, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador  
 Felipe Llangari, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador  
 Enrique Mejía, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador

**Resumen**—El objetivo de este artículo es el de presentar el estudio del estándar IEEE 802.11ac por medio de la simulación y pruebas prácticas por primera vez en el Ecuador. Por medio de Matlab® se simuló el efecto de una transmisión 802.11ac en donde se establecieron los modelos de canal partiendo de lo propuesto por el TGnChannelModels, se realizaron las modificaciones correspondientes para trabajar con anchos de banda de 80 y 160 MHz, además de simular el efecto MU-MIMO por medio de la suma de canales SU-MIMO originados por cada uno de los usuarios involucrados en la transmisión y finalmente se obtuvieron los valores de velocidades teóricas que establece el estándar por medio del uso del Punto de Acceso (AP) Cisco AIR-CAP3602I-A-K9, el módulo AIR-RM3000AC-A-K9 y de dispositivos finales compatibles con el estándar IEEE 802.11ac.

**Índices** – IEEE 802.11ac, WLAN, MU-MIMO, TGac, Matlab®.

## I. INTRODUCCIÓN

El IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos*) ha venido desarrollando durante muchos años modificaciones al estándar original 802.11 para lograr mayores prestaciones y utilidades, esto con el propósito de cubrir las necesidades de comunicación de los usuarios. Varias modificaciones se han propuesto para alcanzar velocidades del orden de los Gbps.

En el presente artículo se estudiaron las diferentes características y avances que diferencian a 802.11ac de sus antecesores, se analizaron las características de capa física, de sub-capas MAC, la técnica de transmisión MU-MIMO (MIMO Multi-usuario), entre otras particularidades que establece este estándar. Se desarrolló la simulación del estándar IEEE 802.11ac utilizando el software computacional MATLAB®, en donde se describen las funciones y parámetros empleados en la programación.

El estándar 802.11ac presenta dos fases denominadas Wave. Wave 1 ofrece 3 veces el rendimiento del estándar 802.11n. Próximamente se esperan los dispositivos de la fase denominada Wave 2, con los cuales se podrá alcanzar hasta 3.47 Gbps teóricamente (802.11ac, n.d.).

Se desarrollaron un conjunto de pruebas ejecutadas en diferentes ambientes, donde se analizaron las velocidades que se pueden alcanzar utilizando el AP (*Access Point*, Punto de Acceso) Cisco AIR-CAP3602I-A-K9 integrado con el módulo Cisco AIR-RM3000AC-A-K9.

Con el propósito de analizar cronológicamente el trabajo realizado a continuación se describe la organización de este artículo: en la sección II se explica el Marco Teórico, la Metodología para la simulación y las pruebas prácticas del estándar 802.11ac. La sección III presenta los Resultados y la pertinente discusión de lo obtenido en el apartado II, finalmente en la sección IV se muestran las conclusiones que se obtuvieron al realizar este artículo.

## II. MARCO TEÓRICO

El grupo de trabajo TGac (*Task Group 802.11ac*, Grupo de Trabajo 802.11ac) de la IEEE realizó cambios y enmiendas a los estándares WLAN (*Wireless Local Area Network*, Red de Área Local Inalámbrica) con miras a que 802.11ac mantenga la compatibilidad con sus predecesores y establece los parámetros del estándar considerando las fases (Wave 1 y Wave 2) presentado en la tabla 1.

La especificación 802.11ac posee 10 índices MCS (*Modulation and Coding Scheme*, Esquema de Codificación y Modulación), los MCS del 0 al 7 son obligatorios (similar a 802.11n) mientras que los MCS 8 y 9 son nuevos y serán habilitados de acuerdo al avance de la tecnología. El incremento en el orden de modulación de 64-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*, Modulación de amplitud en cuadratura) a 256-QAM, proporciona un incremento en las tasas de datos en un 33% con respecto al anterior estándar [1].

Esta variación se logra mediante la representación de ocho bits codificados por símbolo (en cada sub portadora) en vez de seis como en 802.11n. Sin embargo es importante señalar que se requiere una mayor SNR (*Signal to noise ratio*, Relación señal/ruido) debido a que los símbolos en el diagrama de constelación están más cerca uno del otro volviéndolos más susceptibles al ruido.

TABLA I  
ESPECIFICACIONES DEL ESTÁNDAR 802.11AC [1].

	802.11ac	802.11ac	802.11ac Especificación IEEE
	Wave 1	Wave 2	
<b>Frecuencia Operación</b>	5 GHz	5 GHz	5 GHz
<b>MIMO</b>	Single User (SU)	Multi User (MU)	Multi User (MU)
<b>Velocidad (Gbps)</b>	1.3	2.34– 3.47	6.9
<b>Ancho de banda (MHz)</b>	20,40, 80	20,40, 80,80+80, 160	20,40, 80, 80+80,160
<b>Modulación</b>	256 QAM	256 QAM	256 QAM
<b>Spatial Streams</b>	3	3-4	8

Se mantiene el intervalo de guarda de 802.11n, donde el intervalo de guarda de 800ns es de tipo mandatorio mientras que el de 400ns es opcional, (ver tabla 2). En 802.11ac OFDM funciona tal como lo hace en 802.11a y 802.11n, de hecho 802.11ac utiliza las especificaciones de 802.11n con las modificaciones necesarias para alcanzar sus objetivos, así el ancho de banda se divide en sub portadoras OFDM con anchos de banda de 312.4 KHz cada una [1].

TABLA II  
SUBPORTADORAS OFDM EN 802.11AC.

BW (MHz)	20	40	80	160
FFT Size	64	128	256	512
Subportadoras de Datos	52	108	234	468
Subportadoras Pilotos	4	6	8	16
Total Subportadoras	56	114	242	484
Índice Subportadoras	±(1-28)	±(2-58)	±(2-122)	±(6 - 126) ±(130 - 50)

El avance más significativo en 802.11ac es la tecnología MU-MIMO, que permite asignar múltiples flujos espaciales a diferentes usuarios de manera simultánea, lo que aumenta el rendimiento total y la capacidad del sistema WLAN. El estándar 802.11ac permite hasta 4 transmisiones MU-MIMO simultáneas.

#### A. Capa Física

Una de los puntos más importantes que surgió al momento de construir la trama 802.11ac, fue la necesidad de que ésta sea compatible con los estándares WLAN anteriores. Para cumplir con este requerimiento, el formato de la trama 802.11ac es similar al formato mixed-mode de 802.11n y empieza con los mismos campos que los de la trama 802.11a, pero se adicionan los campos para soportar VHT (*Very High Throughput*, Muy Alto Rendimiento) [2].

El estándar 802.11ac permitirá transmisiones MU-MIMO por lo cual el preámbulo debe ser capaz de describir el número de spatialstreams con el que se va a trabajar y permitir que varios receptores puedan prepararse para recibir dichas tramas.

Para alcanzar este requerimiento se necesita de una nueva cabecera, ya que el campo de HT-SIG usado en el estándar 802.11n no se puede aplicar a los nuevos tamaños de ancho de

banda de canal o para un elevado número de spatialstreams.

La trama 802.11ac se muestra en la Fig. 1 y a continuación se presenta la descripción de los campos de la trama.

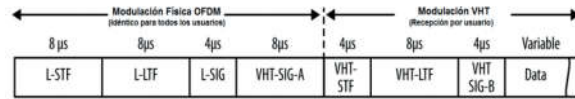


Fig. 1. Trama VHT 802.11ac [1]

1) *L-STF*: Formado por 12 símbolos OFDM para anchos de banda de 20 MHz, ayudan al receptor a identificar que una trama 802.11 está a punto de empezar, sincronizar timers, y seleccionar una antena.

2) *L-LTF*: Se utiliza para decodificar los campos L-SIG y VHT-SIG-A. Consiste en 52 sub portadoras para canales de 20 MHz.

3) *L-SIG*: Es el último campo del preámbulo legado, en 802.11a se utiliza para describir la velocidad de los datos y la longitud de la trama en byte.

4) *VHT-SIG-A*: Es el primer campo VHT y su formatovaría dependiendo si la transmisión es para uno o varios usuarios. Consiste en dos símbolos de 24 bits (VHT-SIG-A1 y VHT-SIG-A2), cada uno lleva los parámetros necesarios para que una estación 802.11ac decodifique el resto de la trama.

5) *VHT-STF*: Este campo es similar a L-STF y se utiliza para el control automático de ganancia en transmisiones MIMO y para ajustar los tiempos de sincronización.

6) *VHT-LTF*: Formado por una secuencia de símbolos que establecen la demodulación de la trama, empezando por el campo VHT SIG-B, además VHT-LTF es utilizado por el receptor para la estimación de canal MIMO.

7) *VHT-SIG-B*: Este campo lleva información de la longitud del campo de DATOS y del índice MCS que utiliza cada usuario en una transmisión multi-usuario.

8) *Campo de Datos*: Consiste en un número variable de símbolos OFDM que básicamente lleva la carga útil o PSDU, cuyo número de símbolos que se transmitirán depende del campo L-SIG. Este campo está formado por service, PSDU, PHY Pad y Tail.

#### B. Subcapa MAC

La subcapa MAC es la encargada de coordinar que los dispositivos puedan tener acceso al canal de transmisión.

La mayoría de los cambios implementados en la subcapa MAC de 802.11ac se relacionan con las nuevas características implementadas en la capa física, además de mantener el formato utilizado por sus predecesores [2], existen dos cambios significativos:

Se amplía la longitud máxima de trama, de 8000 a 11000 bytes aproximadamente.

Se vuelve a utilizar el campo HT Control de 802.11n pero definiendo un nuevo formato para este campo. Cuando el campo HT Control empieza con 0, el formato es idéntico a 802.11n y es del tipo HT. Cuando empieza con 1 es del tipo VHT.

1) *Agregación de Tramas*: La agregación de tramas busca mejorar el rendimiento de la red, permitiendo que un

dispositivo transmita múltiples tramas al momento de acceder al canal, disminuyendo así su sobrecarga de transmisión. En 802.11ac todas las tramas utilizan el formato A-MPDU (*Aggregate MAC Protocol Data Unit*, Unidad de Datos de protocolo MAC Agregado) lo que significa que la capa MAC debe hacerse cargo de todo el procedimiento de framing, y que la capa física trabaje únicamente con la longitud total de lo que está transportando. Todas las tramas de datos 802.11ac son enviadas con el formato A-MPDU, incluso si están conformadas por una sola trama [2].

Debido a las altas velocidades potenciales que maneja el estándar, describir la longitud de la trama requiere de muchos bits, por lo que la longitud máxima de transmisión se define por tiempo, 5.484 ms.

2) *Tramas de Administración*: El estándar 802.11ac posee tramas de administración que permiten establecer conexiones con redes del mismo tipo, las cuales están conformadas por 2 elementos que informan sobre las capacidades y operaciones VHT.

El elemento de Información de Capacidades VHT se utiliza en las tramas de administración para configurar el funcionamiento y operación de redes 802.11ac.

El elemento de Información de Operación VHT presenta información del canal y de velocidades básicas soportadas por el transmisor. Las velocidades básicas son aquellas que son compatibles por todos los clientes que están conectados al AP.

3) *Procedimientos de Acceso al Medio*: El hecho de que en este nuevo estándar estén disponibles nuevos anchos de banda conlleva a que existan también nuevas reglas de acceso al medio de comunicación que determinen si el canal está libre o no.

El estándar 802.11ac extiende las políticas de acceso propuestas en 802.11n para el caso de los canales de 80 y 160 MHz. Para que una estación sea capaz de transmitir una PPDU a 80MHz se deben cumplir dos condiciones:

El canal primario sigue las reglas EDCA por lo que necesita estar inactivo por un tiempo DIFS más la duración del contador de backoff.

Los tres sub canales secundarios deben haber estado inactivos durante el periodo de PIFS inmediatamente antes de que el contador de backoff expire [3].

En el caso que cualquier sub-canal secundario este ocupado, la estación puede seguir cualquiera de las reglas de acceso estático o dinámico al canal como se menciona en 802.11n:

a) *Acceso estático al canal*: En el caso que una estación 802.11ac intente transmitir en un canal de 80 MHz. Si el sub canal secundario está ocupado la estación elegirá un periodo de espera (backoff) al azar dentro del tamaño actual de la ventana de contención para reiniciar el proceso de contienda e intentar transmitir solo si la interferencia no está presente en cualquiera de los sub canales.

b) *Acceso dinámico al canal*: La estación 802.11ac puede intentar transmitir en un canal más pequeño, usando un canal de 20 o 40 MHz, esto dependerá del CCA de cada sub canal. Esto es un enfoque que proporciona mayor flexibilidad, que permite que la asignación de recursos sea más eficiente porque la estación aún puede transmitir a través de una

fracción del ancho de banda original. Todas las transmisiones siempre tienen que incluir el canal primario con el fin de informar al receptor que canales el transmisor usará [3].

### III. SIMULACIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11AC Y MU-MIMO.

El diseño de un sistema de comunicación requiere conocer en detalle la propagación de las señales por el canal. Los canales inalámbricos que utilizan diversidad de antenas en transmisión y recepción añaden mayor complejidad al estudio y a la caracterización del canal dado que se debe relacionar los distintos sub-canales generados entre cada antena transmisora y receptora con los factores propios que afectan a una transmisión de este tipo, como por ejemplo el desvanecimiento.

Se partió del estudio del TGn Channel Models [4] de la IEEE donde se utilizan 2 modelos de canal el de Medbo y el de Saleh-Valenzuela para 802.11n. En el modelo de Medbo se definen los ambientes en los cuales se produce la transmisión (lugar físico) y el modelo de Saleh-Valenzuela se utiliza en ambientes que presentan componentes multi trayectoria, es decir donde se tiene señales que llegan al receptor a diferentes tiempos producidos por obstáculos presentes entre el transmisor y receptor.

#### A. Modificaciones para ampliar el Ancho de Banda del Sistema.

Para el modelo de canal 802.11ac, que cuenta con anchos de banda de canal más amplios, el espaciamiento entre taps del

PDP (*Power Delay Profile*, Perfil de retardo de Potencia) se dividirá por un factor (k) igual a  $2^{\log_2(BW/40)}$ , donde BW es el nuevo ancho de banda en MHz (Breit et al., 2010). Estos valores se resumen en la Tabla 3 para un ancho de banda de hasta 160 MHz. La generación de los nuevos taps para los anchos de banda de canal en 802.11ac se obtuvo en base a una interpolación lineal de los PDP definidos en TGn.

TABLA III.  
SEPARACIÓN ENTRE TAPS PARA 40,80, Y 160 MHZ.

Ancho de Canal	Factor k	Separación entreTaps
BW ≤ 40 MHz	1	10ns
40 MHz < BW ≤ 80 MHz	2	5ns
80 MHz < BW ≤ 160 MHz	4	2.5ns

#### B. MIMO de Orden Superior

La función que se utilizó para simular el efecto MIMO en Matlab® es comm.MIMOChannel la cual utiliza el modelo de correlación de canal de Kronecker.

La correlación es un parámetro clave en el uso de múltiples antenas dado que condiciona la eficiencia de los sistemas de diversidad. La correlación espacial permite indicar el grado de similitud estadística entre dos canales cuyas antenas transmisoras y/o receptoras se encuentran separadas una cierta distancia.

La correlación está influenciada por diversos factores, principalmente por las características físicas las antenas en el

transmisor y en el receptor, por ejemplo: la topología de los arreglos de las antenas transmisora y receptora, la separación entre las antenas, el AoA y AoD, el diagrama de radiación, la dispersión angular, entre otros [5].

El modelo de Kronecker o de correlación separable asume que la correlación en transmisión ( $R_t$  = Matriz de Correlación en transmisión) es independiente del receptor, y la correlación en recepción ( $R_r$  = Matriz de Correlación en recepción) es independiente del transmisor. De manera equivalente, los ángulos de partida y llegada se suponen separables. La matriz de correlación se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$R = R_t \otimes R_r \quad (1)$$

Donde:

$\otimes$ : Representa el producto de Kronecker.

$N_t$ : Número de antenas transmisoras.

$N_r$ : Número de antenas receptoras.

$R_t$ : Representa la matriz de correlación en el transmisor, de tamaño  $N_t$  – por –  $N_r$ .

$R_r$ : Representa matriz de correlación en el receptor, de tamaño  $N_r$  – por –  $N_r$ .

### C. Modificaciones en AoA y AoD para MU-MIMO.

El parámetro AoA (*Angle of Arrival*, Ángulo de Arribo) define el ángulo con el que llegan las componentes de la señal a los receptores con respecto a un plano de referencia, por otro lado, el ángulo AoD (*Angle of Departure*, Ángulo de Partida) establece el valor del ángulo de salida de la señal desde el transmisor.

Para implementar la tecnología MU-MIMO en 802.11ac se generaron ángulos offset que dependen de la cantidad de usuarios, estos ángulos se adicionaron a los valores AoA y AoD ya existentes para los modelos A, B y C en 802.11n.

Los canales multiusuario fueron modelados de acuerdo a la siguiente modificación para cada cliente: Aplicar un desfase aleatorio uniforme de  $\pm 180^\circ$  a los ángulos AoA y AoD de cada modelo para condiciones de LOS (*Line Of Sight*, Línea de Vista) y NLOS (*Non Line Of Sight*, Sin Línea de Vista).

### D. Generación del canal MU-MIMO

La Fig. 2 representa un escenario MU-MIMO downlink, que consta de un AP y tres estaciones separadas espacialmente donde se asume que el AP tiene  $N_{tx}$  antenas. Las tres estaciones poseen  $N_{rx1}$ ,  $N_{rx2}$  y  $N_{rx3}$  antenas respectivamente. En el canal MU-MIMO se consideró que se tiene tres canales SU-MIMO independientes entre el AP y cada estación, denotado como H1, H2 y H3 respectivamente.

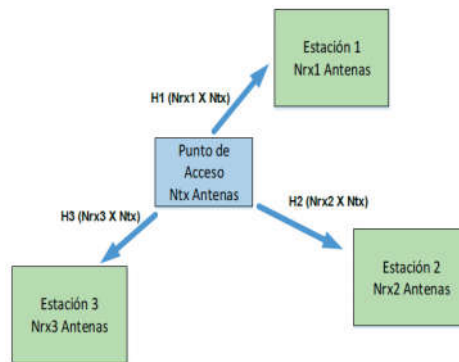


Fig 2. Escenario Multi-user MIMO (MU-MIMO)

Cada canal SU-MIMO asume diferentes correlaciones espaciales, tanto para el AP como para las estaciones. La correlación espacial entre las antenas de diferentes estaciones se asume como cero.

Se generó el canal MU-MIMO agrupando los canales SU-MIMO de cada estación (H1, H2, H3), obteniendo una matriz del tamaño  $(N_{rx1} + N_{rx2} + N_{rx3}) \times N_{tx}$  como se presenta a continuación. [6]

$$H_{\text{MU-MIMO}} \begin{matrix} [(N_{rx1} + N_{rx2} + N_{rx3}) \times N_{tx}] \end{matrix} = \begin{bmatrix} H1 (N_{rx1} \times N_{tx}) \\ H2 (N_{rx2} \times N_{tx}) \\ H3 (N_{rx3} \times N_{tx}) \end{bmatrix}$$

Fig 3. Matriz  $H_{\text{MU-MIMO}}$

### E. Condiciones para la Simulación

En el desarrollo de la simulación se eligieron los modelos A, B y C que permiten condiciones de LOS o NLOS. Además de contar con las variables suficientes para la simulación de un canal de comunicaciones con modelos de desvanecimiento de Rician y Rayleigh.

El modelo A consta de un solo tap que cubre escenarios flat fading, mientras que B y C son selectivos en frecuencia. Se aplicó un desvanecimiento tipo Rayleigh en los modelos A y C. Al modelo B le correspondió un desvanecimiento tipo Rician.

Se dispuso de un máximo de 4 usuarios como determina el estándar 802.11ac.

Se estableció un máximo de 3 spatialstreams por usuario y 8 en el transmisor (AP).

El número de antenas en el transmisor fue igual a la suma de las antenas de cada receptor.

Se emplearon anchos de banda de canal de 20, 40, 80 y 160 MHz.

Los índices MCS están en el rango de 0 a 9. Este dato conjuntamente con la cantidad de spatialstreams, el número de sub-portadoras de datos OFDM y el ancho de banda de canal permitieron calcular el valor de data rate del sistema.

El diagrama de bloques del sistema que se propuso para el análisis de 802.11ac con MU-MIMO se presenta en la Fig. 4.

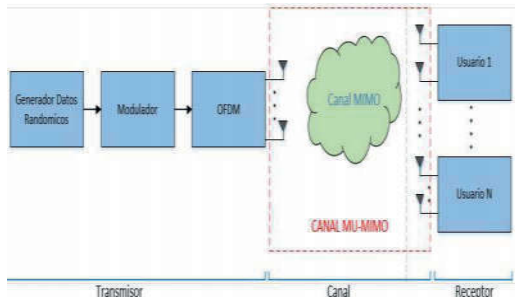


Fig. 4. Diagrama de bloques - Sistema 802.11ac.

La simulación del estándar 802.11ac está compuesta por funciones que realizan una tarea específica, la estructura del programa se presenta en el diagrama de flujo de la Fig. 5.

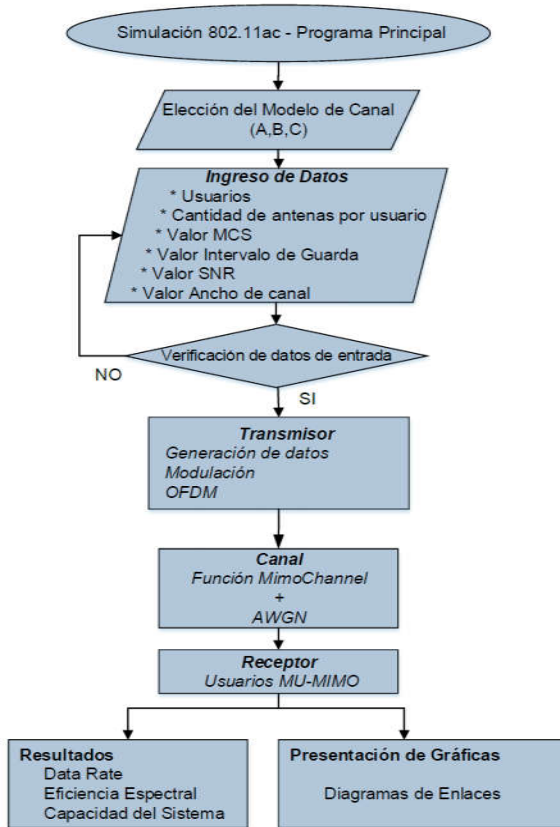


Fig. 5. Diagrama de Flujo – Simulación 802.11ac.

Para obtener los valores de Data Rate, Eficiencia y Capacidad del sistema se realiza por medio de las siguientes fórmulas.

1) Data Rate

$$Ncbps\_1 = Nbpscs * NDatos \quad (2)$$

$$Ndbps\_1 = Ncbps\_1 * Coding \quad (3)$$

$$Data\_rate\_1 = (Ndbps\_1 / ts) * Rx\_1 * ig \quad (4)$$

Donde:

- Nbpscs = Bits codificados por subportadora
- Ncbps\_1 = Bits codificados por símbolo OFDM
- NDatos = Subportadoras de datos
- Ndbps\_1 = Bits de datos por símbolo OFDM
- Coding = Valor de coderate
- RX\_1 = Número de antenas
- ts = Duración del símbolo 4µseg
- ig = Intervalo de guarda (1 = 800ns, 1.1= 400ns)
- Data\_Rate\_1 = Velocidad de transmisión

2) Capacidad del Canal

$$C = BW * \log_2(1 + SNR\_Valor) \quad (5)$$

Donde:

- C = Capacidad del Canal
- BW = Ancho de banda de canal
- SNR\_Valor = Relación señal al ruido

3) Eficiencia del Sistema

$$E = Data\_rate / BW \quad (6)$$

Donde:

- Data\_Rate = Velocidad de transmisión del sistema
- E = Eficiencia del Sistema

#### IV. DESARROLLO DE PRUEBAS

El conjunto de pruebas y escenarios tuvieron como objetivo determinar el máximo throughput que el AP Cisco AIR-CAP3602I-A-K9 y el módulo Cisco AIR-RM3000AC-A-K9 ofrecen a los dispositivos finales trabajando en condiciones del estándar 802.11ac [7].

Se utilizaron 2 adaptadores USB 802.11ac: WIFI AC1200 USB ADAPTER y AWUS036AC AC1200 WIRELESS ADAPTER que hicieron las veces de dispositivos finales.

La topología de red implementada para el desarrollo de las pruebas fue de tipo infraestructura. Se utilizó además la herramienta Iperf3.exe para el cálculo del throughput entre servidor y cliente.

Las pruebas se ejecutaron en dos ambientes: interno y externo, en donde se varió la distancia entre los dispositivos finales (1, 5, y 10 metros).

Los parámetros comunes de configuración en el AP para todos los escenarios se presentan en la tabla 4.

TABLA IV CONFIGURACIONES EN EL AP.

	Ancho de Canal [MHz]	Spatial Stream	Intervalo de Guarda
			(L = 800ns, S = 400ns)
Escenario 1	40	1	L
Escenario 2	40	1	S
Escenario 3	40	2	L
Escenario 4	40	2	S
Escenario 5	80	1	L
Escenario 6	80	1	S
Escenario 7	80	2	L
Escenario 8	80	2	S

**SSID\_802.11ac:** Indica el nombre del SSID asignado a la interfaz de radio 802.11ac.

**speed:** Habilita las velocidades disponibles en 802.11ac, se debe ingresar al menos una speedbasic y una velocidad de 802.11n (Aironet Access Point, n.d.).

**channel:** Muestra el canal de frecuencia elegido.

**station-role root:** Indica el modo de operación del equipo.

Los parámetros que se modificaron de acuerdo al escenario son los siguientes.

**antenna:** Indica la cantidad de antenas habilitadas.

**guard-interval:** Permite seleccionar los intervalos de guarda; long= 800ns, any= 800ns o 400ns dependiendo de los dispositivos finales.

**channelwidth:** Establece el valor de ancho de banda de canal 802.11ac.

#### A. Procedimiento

Los pasos realizados tanto para el ambiente interno y externo son los mismos, y se detallan a continuación:

Se seleccionó el canal menos congestionado (Canal 153) por medio del programa computacional CommViewforWifi 7.1

Se configuró la PC2 como cliente mediante el comando: `iperf-c 192.168.210.200-u-b <valor>M-t30 -i 1`.

Se configuró la PC1 como servidor utilizando el comando: `iperf-s`.

La distancia entre la PC1 y AP, PC2 y AP fueron de 1, 5 y 10 metros para los dos ambientes.

Se realizaron 8 configuraciones (escenarios) en el AP y están en función de las variables: ancho de banda de canal, spatialstreams e intervalos de guarda, para cada una de las distancias mencionadas.

## V. RESULTADO Y SIMULACIÓN

### A. Resultados Simulación

Los resultados que se obtuvieron de la simulación son las gráficas de los enlaces de cada usuario (donde se observa el efecto MU-MIMO de todo el sistema) y el cálculo del valor de Data Rate.

La Fig. 6 representa los enlaces de dos usuarios cada uno con 2 antenas, para el modelo A, MCS de 9 (Modulación= 256QAM, Codificación= 5/6), intervalo de guarda de 400ns, valor de SNR de 33dB y un ancho de banda de canal de 40 MHz.

En estos enlaces se definen la condición de NLOS (Desvanecimiento Rayleigh), donde además se señala que para  $\Delta t_1$  se produce un desvanecimiento considerable y para  $\Delta t_2$  se tiene períodos de tiempo sin desvanecimiento, los valores de amplitud para cada usuario son diferentes esto debido a las condiciones aleatorias asumidas en la simulación.

El valor de Data\_Rate que se obtuvo en la simulación para el modelo A con los datos ingresados es 800 Mbps que es igual al valor que asigna el estándar 802.11ac, calculando con la fórmula 4.

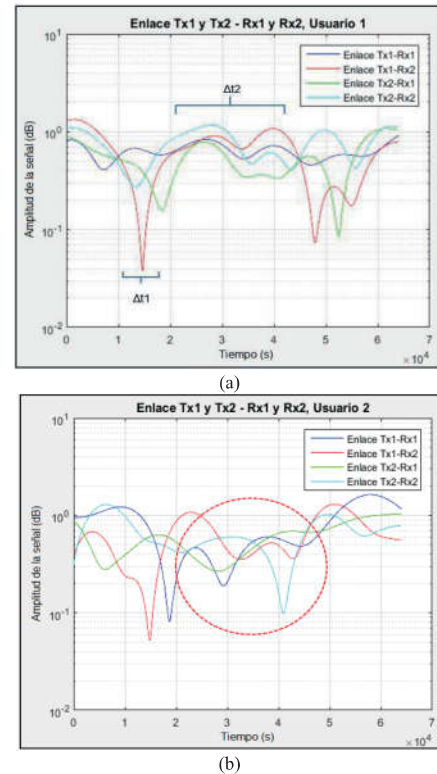


Fig. 6. Diagrama de Enlaces (a) Usuario 1 (b) Usuario 2

La Fig. 7 muestran los resultados de los enlaces para 4 usuarios con 1, 2, 1, y 3 antenas respectivamente, para el Modelo B, MCS de 8 (Modulación= 256QAM, Codificación =3/4), intervalo de guarda de 800ns, un SNR de 37 dB y ancho de banda de canal igual a 160 MHz.

Para el modelo B se establece la condición LOS (Desvanecimiento Rician). Donde el usuario 1 tiene una antena (Enlace Tx1-Rx1), el usuario 2 con dos antenas (Enlaces: Tx1-Rx1, Tx1-Rx2, Tx2-Rx1, Tx2-Rx2), el usuario 3 con una antena (Enlace Tx1-Rx1) y el usuario 4 con tres antenas (Enlaces: Tx1-Rx1, Tx1-Rx2, Tx1-Rx3, Tx2-Rx1, Tx2-Rx2, Tx2-Rx3, Tx3-Rx1, Tx3-Rx2, Tx3-Rx3).

Las figuras representan los enlaces entre las antenas transmisoras y las antenas receptoras de cada usuario, donde se observa el efecto MU-MIMO y se determina la semejanza entre los enlaces participantes en la transmisión, así mientras aumenta la cantidad de antenas para un usuario, aumenta la cantidad de enlaces y por lo tanto se puede tener la probabilidad de que existan una mayor similitud entre las señales (comparando las Fig. 6b y 7d por medio de la circunferencia roja).

En las Fig. 7b y 7d se observa que para la condición de LOS en el período  $\Delta t_1$  no se produce cambios considerables en los enlaces esto debido a que se tiene una señal dominante para un desvanecimiento Rician.

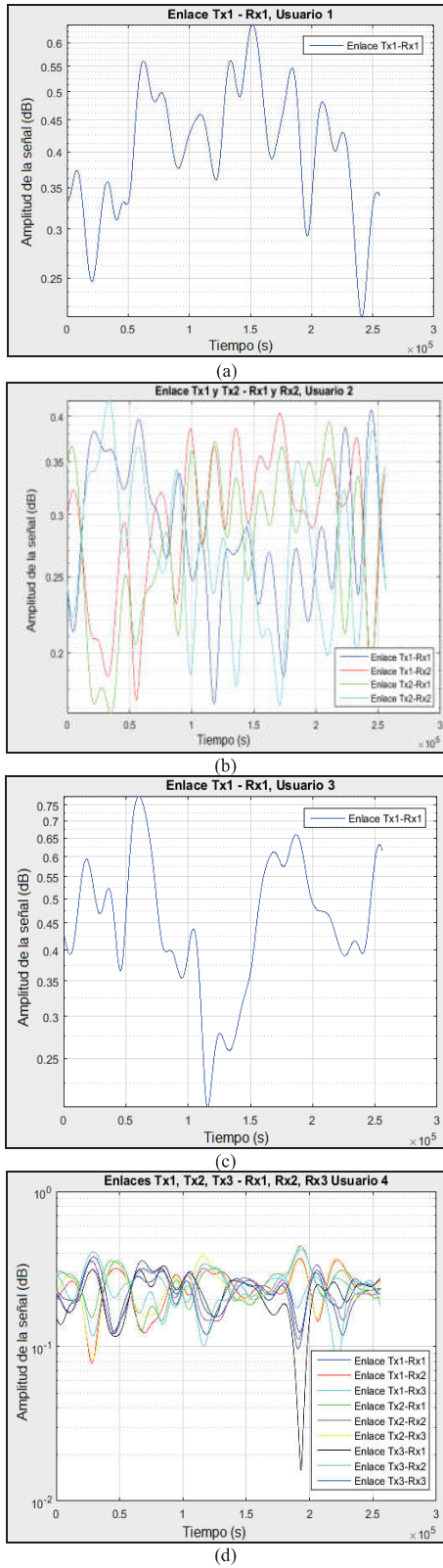


Fig. 7. Diagrama de Enlaces (a) Usuario 1 (b) Usuario 2 (c) Usuario 3 (d) Usuario 4.

Para cada usuario se generó un canal SU-MIMO, y en conjunto en el sistema se observa que la agrupación del canal de cada usuario generan la transmisión MU-MIMO, además se pudo determinar que mientras aumenta la cantidad de antenas para un usuario se tiene un mayor número de enlaces y por lo tanto aumenta la probabilidad de que existan enlaces correlacionados.

Los valores de Data\_Rate obtenidos para los dos ejemplos son iguales a lo establecido en el estándar 802.11ac [8].

A. Resultados de las pruebas prácticas

Los resultados de las pruebas se obtuvieron con la herramienta Iperf3.exe, para los dos ambientes, a 1, 5 y 10 metros de distancia entre el AP y los dispositivos, con los 8 escenarios de configuración en el AP, los cuales se detallan en la tabla 4.

B. Ambiente Interno

La parte práctica en el ambiente interno, se realizó en dos pisos (Planta Baja y Piso1), para las pruebas a 1 metro y 5 metros de distancia el AP y los dispositivos estaban en el Piso 1, mientras que para 10 metros el AP y PC1 se encontraban en el piso 1 y PC2 en la planta baja.

En la Fig. 8 se observa que para 5 metros se tiene un valor más elevado de las velocidades alcanzadas, en comparación a 1 y 10 metros. Esto se debe que cuando los dispositivos están tan cerca del AP el nivel de la señal es bajo debido al patrón de radiación de las antenas el cual es omnidireccional y a una distancia de 10 metros el nivel disminuye por los obstáculos presentes.

C. Ambiente Externo

En este ambiente se realizaron las mediciones para los 8 escenarios de forma similar que en el ambiente interno. Donde los resultados de las pruebas (ver Fig. 9) indican de igual forma que para una distancia de 5 metros los valores máximos y además a 10 metros ya no existe una variación de las velocidades en cada escenario como en el ambiente interno sino al contrario se produce un aumento continuo.

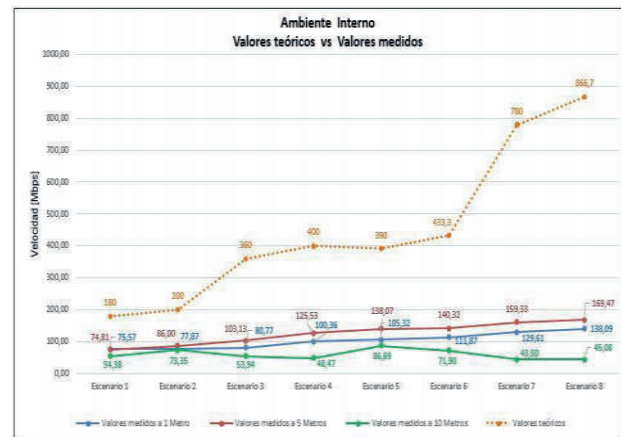


Fig. 8. Comparación valores teóricos con valores medidos en ambiente interno.

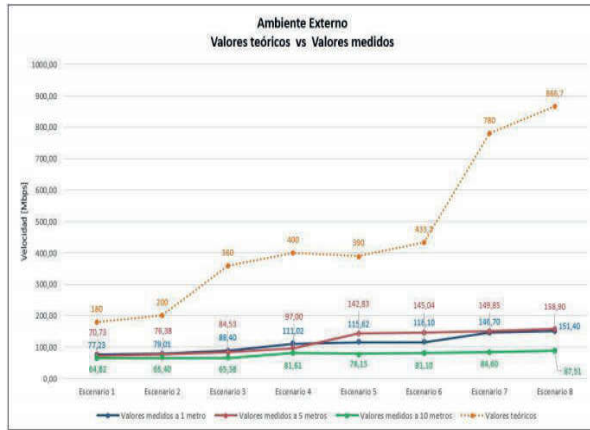


Fig. 9. Comparación valores teóricos con valores medidos en ambiente externo

#### D. Discusión de Resultados

Los valores de Data Rate que se obtuvieron en ambientes reales como los descritos anteriormente no pueden ser alcanzados por los dispositivos finales que se utilizaron.

El punto de acceso como los dispositivos negocian el estado del enlace y las velocidades a transmitir, por tanto cuando la tasa de errores se incrementa la solución es cambiar la tasa de codificación, el tipo de modulación o ambas de tal manera que la calidad del enlace se vea menos afectado posible por las condiciones de transmisión.

Además, el MCS máximo utilizado en una comunicación inalámbrica en condiciones de distancia, obstáculos, interferencias, viene dado por el dispositivo con el MCS más bajo.

Por ejemplo si intentamos establecer una comunicación con el conjunto Cisco AIR-CAP3602I-A-K9 y Cisco AIR-RM3000AC-A-K9, cuyo MCS más alto es 9, la máxima velocidad teórica a alcanzar sería 1300 Mbps, y un cliente 802.11ac que implemente un MCS máximo de 3 la velocidad máxima teórica sería de 390 Mbps en las mismas condiciones. El MCS utilizado en una comunicación Wi-Fi lo establecerá el dispositivo con menores prestaciones [2].

#### VI. APÉNDICE

En este trabajo se presentó una descripción detallada de los avances propuestos por el estándar IEEE 802.11ac en relación a sus predecesores. Las mejoras en el rendimiento se deben al uso de un mayor ancho de banda de canal, mayor número de spatialstreams, mayor orden de modulación, manejo dinámico del ancho de banda y MIMO multiusuario que constituyen la clave para lograr las altas tasas de velocidades de datos que se obtienen en esta enmienda propuesta.

Esta nueva tecnología afronta grandes retos, entre ellos, requisitos de hardware superior, compatibilidad con estándares anteriores y un bajo costo de dispositivos finales. El estándar 802.11ac es compatible con los estándares 11a y 11n por operar en la misma banda por debajo de 5 GHz, utilización de OFDM y de técnicas como MIMO y STBC (*Space Time Block Coding*, codificación espacio-temporal por bloques).

La trama 802.11ac consiste en muchos campos de preámbulo, seguido de los símbolos que representan los datos. Cada campo es construido por el transmisor para cumplir un propósito específico. Algunos de estos campos contienen información acerca de la trama transmitida, y otros se utilizan para las estimaciones de canal. Los datos transmitidos se codifican con diferentes técnicas y operaciones para añadir robustez; estas operaciones se invierten en el lado del receptor para extraer los datos de nuevo.

En la actualidad se torna difícil encontrar dispositivos finales capaces de abarcar todas las características y opciones que ofrece la norma, incluso la fase Wave 1 del estándar que está vigente es soportada por equipos terminales avanzados.

De los resultados gráficos obtenidos de la simulación se puede concluir que no existe correlación entre los diferentes enlaces de los usuarios. Lo mencionado es importante ya que de existir un alto grado de correlación las señales interferirían unas de otras haciendo muy difícil la recuperación de los datos enviados en el lado del receptor.

Una particularidad de configuración del AP Cisco AIR-CAP3602I-A-K9 y del módulo AIR-RM3000AC-A-K9 es que trabajando en modo autónomo no son compatibles con los algoritmos de seguridad TKIP y TKIP + AES. Esta falencia se supera al integrar estos equipos a un equipo adicional (WLC) para que este último sea el que administre, entre otras cosas, el tema de seguridad.

#### VII. REFERENCIAS

- [1] N. Al-Ghazu, *A Study of the Next WLAN Standard*. Sweden, 2013.
- [2] M. González, *Velocidad de las redes WiFi N en entornos residenciales*[online]. Obtenido de: <http://redestelematicas.com/velocidad-d-de-las-redes-wifi-n-en-entornos-residenciales/>
- [3] E. Knightly, O. Bejarano. *IEEE 802.11ac: From Channelization to Multi-User*. Houston, Estados Unidos, 2013.
- [4] L. Schumacher, E. Vinko, P. Kyritsi. "TGN Channel Models". Institute of Electrical and Electronics Engineers, 5 – 41, 2004.
- [5] M. Velasco, R. López, D. Rojas, R. Hernández. *Análisis de la correlación en un arreglo de antenas*, Jiutepec, México, 2014.
- [6] *802.11ac Wave 2 FAQ* [online]. Obtenido de: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/enterprise-networks/802-11ac-solution/q-and-a-c67-734152.pdf>.
- [7] M. Gast, *802.11ac: A Survival Guide*, California, Estados Unidos: O'Reilly Media
- [8] Google Sheets [online] "MCS: Index". Enero 2016. Obtenido de: <http://www.mcsindex.com/>.

#### VIII. BIOGRAFÍAS



**Felipe Andrés Llangarí Arizo.** Nació en Quito el 27 de mayo de 1989. Realizó sus estudios primarios en la Escuela Eugenio Espejo. Sus estudios secundarios los realizó en el Instituto Nacional Mejía, donde se graduó de Bachiller en Físico Matemático. En el 2016 obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, y se desempeña como Administrador de Red e Infraestructura en WorldVision.





**Enrique Javier Mejía Quishpe.** Nació en Riobamba el 22 de junio de 1987. Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Militar “Abdón Calderón”. Estudiante de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional. En el 2016 obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones y se desempeña como Ingeniero de soporte técnico en eBTelCia. Ltda



**Ricardo Xavier Llugsí Cañar.** Sus Estudios secundarios los realizó en el Colegio Don Bosco, donde se graduó de Bachiller en Electrónica. Obtuvo en 2008 el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional. Obtuvo en 2013 el grado de MSc Communication Engineering en la Universidad de Manchester. Actualmente es Profesor de la Escuela Politécnica Nacional.