

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de:
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

TRABAJO DE TITULACIÓN

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL ESTÁNDAR 802.11AX PARA EVALUAR EL
RENDIMIENTO DE DESPLIEGUES WLAN EN ESCENARIOS CON TRÁFICO
DE RED ELEVADO**

Autor:

Israel Alejandro Torres Torres

Tutor:

Ing. Ciro Diego Radicelli García, PhD.

Riobamba - Ecuador

Año

2021

Los miembros del tribunal de graduación del proyecto de investigación de título: **“ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL ESTÁNDAR 802.11AX PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DE DESPLIEGUES WLAN EN ESCENARIOS CON TRÁFICO DE RED ELEVADO”**., presentado por: **Israel Alejandro Torres Torres**, dirigido por: **Ciro Diego Radicelli García, PhD.**

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH.

Para constancia de lo expuesto firman.

PhD. Luis Tello

Presidente del Tribunal

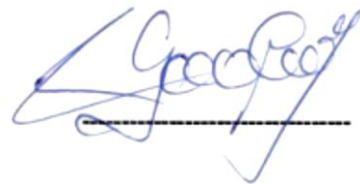


.....

Firma

MsC. Giovanni Cuzco

Miembro del Tribunal



Firma

MsC. Marco Nolivos

Miembro del Tribunal



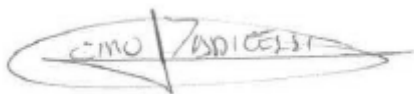
.....

Firma

DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA

En calidad de tutor del tema de Investigación: **“ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL ESTÁNDAR 802.11AX PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DE DESPLIEGUES WLAN EN ESCENARIOS CON TRÁFICO DE RED ELEVADO”**. Realizado por el Sr. **Israel Alejandro Torres Torres**, para optar por el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sustentada públicamente y evaluada por el jurado examinador que se designe.

Riobamba, octubre 2021

A handwritten signature in black ink, enclosed in a hand-drawn oval. The signature reads "C. DIEGO RADICELLI GARCIA".

Ciro Diego Radicelli García, PhD.

C.I. 1713535225

TUTOR

AUTORÍA DE INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este proyecto de Investigación titulado: **“ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL ESTÁNDAR 802.11AX PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DE DESPLIEGUES WLAN EN ESCENARIOS CON TRÁFICO DE RED ELEVADO”**, corresponde exclusivamente a Israel Alejandro Torres Torres, Ing. PhD. Ciro Radicelli y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



Israel Alejandro Torres Torres
1105234486

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a Dios, y el esfuerzo de mis padres que me entregaron su apoyo incondicional.

Por ser los inspiradores para cada uno de los pasos dados en todo este tiempo de trabajo, por ser los guías en el sendero de cada acto que realice hoy, mañana y siempre; de la misma forma a mi hermano, por ser el incentivo para seguir adelante con este objetivo y a mis amigos que me han apoyado con palabras de aliento y motivación para realizar y terminar las aspiraciones que tengo en mente.

Israel Alejandro Torres Torres

AGRADECIMIENTO

“Sé agradecido por lo que ya tienes mientras persigues tus objetivos. Si no estás agradecido por lo que ya tienes, ¿qué te hace pensar que serías feliz con más?”.

Roy T. Bennett

Agradezco a Dios y a mis padres por brindarme el apoyo a través de su trabajo y permitirme finalizar mis estudios y seguir las metas que me propuesto.

De la misma forma al Ing. PhD. Ciro Diego Radicelli García, por su invaluable apoyo, orientación, por haber sido mi guía, darme las pautas y consejos necesarios para desarrollar y concluir el proyecto de investigación.

A la Universidad Nacional de Chimborazo por a ver sido la Institución que me abrió las puertas para realizar mi formación académica de Tercer nivel, con excelentes profesionales que me brindaron sus conocimientos técnicos y humanos.

Finalmente, a los grandes amigos que conseguí, por su apoyo mutuo e incondicional, disposición y confianza que me brindaron, día a día durante toda esta larga trayectoria.

Israel Alejandro Torres Torres

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2. OBJETIVOS.....	5
1.2.1. GENERAL.....	5
1.2.2. ESPECÍFICOS.....	5
CAPÍTULO II	6
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 REDES LOCALES INALÁMBRICAS (WLAN).....	7
2.1.1. DEFINICIÓN	7
2.1.3 ARQUITECTURA WLAN.....	7
2.2 ESTÁNDAR 802.11 Y SUS VARIANTES	8
2.3 IEEE 802.11ax.....	9
2.3.1 CAPA FÍSICA	10
2.3.2 IEEE 802.11AX Y DETERMINISMO.....	11
2.3.3 OFDMA Y UNIDAD DE RECURSOS.....	12
2.3.4 MULTIPLE-USER, MULTIPLE-INPUT, MULTIPLE-OUTPUT (MU-MIMO)	14
CAPÍTULO III	16
3. METODOLOGÍA	16
CAPÍTULO IV	31
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
CAPÍTULO V	38
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	38

5.2 RECOMENDACIONES	39
BIBLIOGRAFÍA	40
ANEXOS	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. (a) Red Ad- Hoc (b) Red inalámbrica con AP.....	8
Figura 2. Dimensiones del OFDMA en 802.11 ax.....	13
Figura 3. Configuración en los enlaces descendente y ascendente	14
Figura 4. Escenario de pruebas Auditorio de la UNACH	19
Figura 5. Diseño de red	19
Figura 6. Escenario con 64 usuarios.....	21
Figura 7. Escenario con 128 usuarios.....	22
Figura 8. Escenario con 255 usuarios.....	23
Figura 9. Flujo del experimento.	24
Figura 10. Tráfico de red elevado.....	24
Figura 11. Asignación de RU	25
Figura 12. Fórmula de frecuencia esperada.....	28
Figura 13. Fórmula de chi cuadrado.....	29
Figura 14. Variables generales para escenario de 128 usuarios.	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estándares con su descripción	9
Tabla 2. Operacionalización de variables	27
Tabla 3. Resultados para escenario de 128 usuarios.....	44
Tabla 4. Presentación de resultados variables dependiente e independiente.....	35
Tabla 5. Valores de contingencia de 4x3 con las frecuencias observadas.....	36
Tabla 6. Tabla de frecuencias esperadas.....	36
Tabla 7. Cálculo de χ^2	37

RESUMEN

Hoy en día las comunicaciones inalámbricas se han convertido en una necesidad para el ser humano. El usuario final solicita tener una alta calidad de servicio para solventar los inconvenientes que se presenta al momento de conectarse a una misma red. Con las nuevas tecnologías y estándares que han surgido con el paso de tiempo es necesario tener en cuenta los beneficios de cada uno de ellos para poder implementar según la demanda solicitada.

El nuevo estándar Wi-Fi conocido a finales del año 2019, el IEEE 802.11 ax, sustituye a IEEE 802.11 n del año 2009 y a IEEE 802.11 ac del año 2013, ésta es la nueva generación de los estándares para las redes WLAN de alto rendimiento, logrando velocidades del orden de 10 Gbps, cuyo objetivo principal es mejorar el throughput por área en escenarios de alta densidad.

En el desarrollo del presente trabajo se examina la importancia del análisis del estándar 802.11 ax para evaluar a la red WLAN en escenarios con tráfico de red elevado. Finalmente se realiza una simulación de tres modos de transmisión tales como: OFDMA, MU-MIMO y una combinación entre OFDMA/MU-MIMO con el software llamado Matlab en diferentes escenarios planteados. Con los resultados obtenidos se observó que con una gran cantidad de usuarios el rendimiento va decreciendo por tal motivo se recomienda tener una infraestructura robusta para realizar algunas pruebas de dicha investigación.

Palabras Claves: High traffic, concurrent users, overloaded access points, throughput, bandwidth.

ABSTRACT

Today wireless communications have become a necessity for human beings. The end-user requests a high quality of service to solve the inconveniences that arise when connecting to the same network. With the new technologies and standards that have emerged over time, it is necessary to consider the benefits of each of them to be able to implement according to the requested demand.

The new WiFi standard known at the end of 2019, the IEEE 802.11 ax, replaces IEEE 802.11n of 2009 and IEEE 802.11 ac of 2013. These are the new generation of standards for high-performance WLAN networks, achieving speeds of the order of 10 Gbps, whose main objective is to improve throughput per area in high-density scenarios.

In the development of this work, the importance of the analysis of the 802.11 ax standard is examined to evaluate the WLAN network in scenarios with high network traffic. Finally, a simulation of three transmission modes is carried out, such as OFDMA, MU-MIMO, and a combination of OFDMA / MU-MIMO with the software called Matlab in different scenarios. With the results obtained, it was possible to observe many users, and the performance is decreasing. For that reason, it is recommended to have a robust infrastructure to carry out some tests of said research.

Keywords: High traffic, concurrent users, overloaded access points, throughput, bandwidth.

Reviewed by:

Ms.C. Ana Maldonado León

ENGLISH PROFESSOR

C.I.0601975980

INTRODUCCIÓN

En las telecomunicaciones los requerimientos hacia los servicios cada vez son más exigentes como la transmisión de datos, video y nuevas aplicaciones basadas en IP solicitan más demanda a través de las redes, además la necesidad de movilidad interviene en el progreso de la tecnología, es por esto que el estudio de las redes inalámbricas se vuelven más esenciales para los seres humanos llegando a soportar la misma cantidad de tráfico que las redes cableadas usadas tradicionalmente [1].

Durante los últimos años y debido a las diversas aplicaciones que se le ha dado a la tecnología inalámbrica, la continua evolución y una aceptación cada vez mayor hacia esta generación, ha hecho que las redes inalámbricas puedan brindar a corporaciones, grupos sociales, entidades gubernamentales, universidades y a la sociedad en general una flexibilidad a la movilidad de los usuarios para acceder al mundo del internet y sus beneficios.

Para solventar lo mencionado se ha propuesto el presente proyecto el cual consiste en un análisis y simulación del estándar 802.11 ax para evaluar el rendimiento de despliegues WLAN en escenarios con tráfico de red elevado.

CAPÍTULO I

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento constante de las comunicaciones inalámbricas ha permitido la evolución del denominado internet de las cosas (IoT), además de la transmisión masiva de contenidos a través de plataformas como video por streaming, televisión por internet y algunas otras que se encuentran disponibles en Internet. Esto conlleva a una secuencia de inconvenientes en las redes de transporte, debido al aumento en la cantidad de datos, que saturan la red de forma muy rápida ocasionando colapsos en el transporte de información y otras dificultades como fallas en la conectividad, lentitud en la velocidad de transferencia, entre otras [2].

Para la solución del problema mencionado anteriormente, existe una reforma al estándar 802.11, conocida como 802.11 ax, el mismo que ofrece un mejor rendimiento y ayuda a aprovechar el espectro radioeléctrico de forma inteligente. El estándar mencionado ofrece una mejor conexión inalámbrica en ambientes en los que existe una elevada presencia de usuarios haciendo uso de la misma red, esto para prevenir que los puntos de acceso (AP) se sobrecarguen provocando baja calidad en el servicio y por lo tanto una mala experiencia en el usuario.

Los resultados de este análisis y simulación tienen detalles importantes para la implementación donde se requiera transmisión de información de alto tráfico, como por ejemplo el evidenciado en el Auditorio de la UNACH, en donde cada punto de acceso soporta hasta 100 usuarios conectados al mismo tiempo con una transferencia de 10 paquetes [3]. Aunque un AP puede soportar lógicamente hasta 255 usuarios [4].

De forma general, en el envío de voz sobre las redes de datos requiere lo siguiente:

- Transmisión fiable de paquetes.
- Calidad de transmisión de voz.
- Utilización de aplicaciones de VoIP.
- Ancho de banda adaptado a los paquetes enviados (por ejemplo, si existe sobrecarga el ancho de banda será mayor)

- Utilización del estándar RTP el cual a su vez está sobre UDP y a su vez está arriba de la IP. En la LAN, recorre sobre Ethernet para que sea suficiente el ancho de banda del audio.

En el caso de las redes IP, el medio de transporte del video se realiza a través de los protocolos RTCP y RTP [5].

En este sentido un grupo de investigadores tales como Angela, V; Granizo, R; Alex, A; Tacuri, U [6] realizaron un análisis del tráfico generado en ciertos escenarios, llegando a determinar que por cada 30s de unidad de tiempo se envían a la red 5 paquetes como mínimo y 10 paquetes como máximo en un tiempo de 60s, es claro que estos valores están sujetos a cambios debido a que, por teoría, en las redes WLAN, el ancho de banda se divide entre los usuarios conectados a dicha red.

Si bien existen estudios acerca del estándar 802.11 ax. Este proyecto busca realizar una evaluación con un alto tráfico y poder determinar su rendimiento dentro de condiciones de gran demanda, aportando de manera significativa al despliegue de este protocolo en escenarios reales, partiendo de ejemplos básicos y documentación existente acerca del protocolo mencionado, mismo que se localiza en la etapa de desarrollo, sin embargo, es importante recalcar que ya existen equipos que manejan el protocolo 802.11 ax pre estandarizado.

En cuanto a los trabajos relacionados con el proyecto propuesto, se pueden citar a los siguientes:

- El trabajo titulado “*Comparación entre el estándar IEEE 802.11 ax y el estándar IEEE 802.11 ac*” tiene como objetivo indicar la evolución del rendimiento de las Redes de Área Local Inalámbricas [7].
- El trabajo titulado “*Análisis comparativo del desempeño del estándar IEEE 802.11 ac respecto al IEEE 802.11*” tiene como objetivo un análisis comparativo de los estándares utilizando un software para simulación numérica [8].

- El trabajo titulado “*Comparativa de rendimiento de estándares*” el objetivo es realizar una comparativa utilizando el software Opnet Modeler [9].
- El trabajo titulado “*Extensión del protocolo IEEE 802.11 en modo PCF*” tiene como objetivo realizar una extensión para extender la cobertura de celdas en una WLAN mediante nodos relay [10].
- El trabajo titulado “*IEEE 802.11AX: WLAN de alta eficiencia*” el objetivo es realizar un estudio sobre los posibles escenarios de WLAN que son una sobrecarga de usuarios, adicional describir mejoras sobre las funcionalidades a nivel de red [11].

En el Auditorio de la UNACH tiene una gran afluencia de asistentes para distintos eventos ya sea públicos o privados, en la cual hay una gran cantidad de usuarios utilizando la red inalámbrica provocando una saturación de los Access Point, esto genera una baja calidad en el servicio, así como problemas de conectividad, nuestra propuesta se enfoca en realizar un estudio del estándar 802.11 ax en cuanto a las mejoras que se han detallado respecto a los otros estándares existentes, para que pueda ser aplicado a futuro en dichas instalaciones, esto para evitar el congestionamiento y mejorar la experiencia del usuario. Los trabajos relacionados son un soporte para el desarrollo del presente trabajo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. GENERAL.

Efectuar el análisis y la simulación del estándar 802.11 ax para la evaluación del rendimiento de despliegues WLAN en escenarios con tráfico de red elevado.

1.2.2. ESPECÍFICOS.

- Analizar el estándar IEEE 802.11 ax en cuanto a las mejoras ofrecidas para despliegues de redes de área local inalámbricas con tráfico de red elevado.
- Simular la capa física y la de enlace de datos para analizar el rendimiento del estándar 802.11 ax para escenarios con tráfico de red elevado.
- Simular tres modos de transmisión: OFDMA, MU-MIMO y combinación de OFDMA y MU-MIMO, para escenarios con tráfico de red elevado, utilizando un número específico de usuarios y paquetes variables.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

El crecimiento y desarrollo continuo de aplicaciones que requieren una conexión a internet más veloz y eficiente, es decir, cada día más personas necesitan de los servicios de Telecomunicaciones. En este sentido las empresas necesitan mejorar los productos que ofertan, a fin de que los clientes tengan una experiencia de conexión fiable y con un ancho de banda aceptable.

Bajo lo mencionado anteriormente, una de las principales ventajas de las comunicaciones inalámbricas es evidentemente la movilidad que permiten a los usuarios, además de que las mismas marcaron un precedente para el desarrollo tecnológico.

Sin embargo, debido a la gran diversidad de productos lanzados fue necesario la creación de un estándar para que sea posible la compatibilidad entre las diferentes infraestructuras. Fue entonces como nació el estándar IEEE 802.11 para redes inalámbricas definido por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Los primeros estándares de Wi-Fi proporcionaron principalmente conectividad inalámbrica de baja velocidad de datos para aplicaciones como navegación web, correo electrónico, etc. Desde entonces, los estándares 802.11 han evolucionado para brindar altas velocidades de datos y calidad de servicio (QoS), lo que admite una extensa gama de aplicaciones, desde transmisión de video intensiva en ancho de banda [12].

La nueva mejora es el estándar 802.11 ax se centra en una transmisión dúplex en lugar del enlace descendente como lo hace el estándar 802.11 ac, además el estándar 802.11 ax mejora su rendimiento puro en casi un 40% gracias a la modulación QAM [13].

La mencionada tecnología está enfocada en reducir los problemas de interferencia que genera tener varios puntos de acceso en lugares de concurrencia masiva de personas tales como: universidades, estadios, terminales aeroportuarias entre otros, esto lo hará con la integración de Unidad de Recursos (RU) y el Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonales (OFDMA) esta tecnología agrega una cuarta dimensión que sería la división de frecuencia, se asignan subportadoras a los grupos individuales de los clientes [14]. Su funcionamiento pretende ser cuatro veces mayor por usuario en el área de alta densidad de usuarios en relación con estándares 802.11b/n/g [15].

2.1 REDES LOCALES INALÁMBRICAS (WLAN)

En la actualidad, uno de los recursos en crecimiento más usado para las comunicaciones son las redes inalámbricas de área local, su abreviatura WLAN (Wide Área Network), es por esto, que muchos usuarios tienden a conectarse de forma directa a esta red convirtiéndose así en un complemento para las redes LAN (Local Área Network) cuyo beneficio es de cubrir lugares lejanos a un bajo costo [1].

Las redes WLAN trabajan en base a su estándar que es el IEEE 802.11, dicho estándar ha pasado por una serie de variantes realizadas en base a la necesidad y la creciente demanda de los usuarios con el fin de cubrirlas y ajustarse a sus requerimientos.

2.1.1. DEFINICIÓN

Una WLAN se define como una red que utiliza ondas electromagnéticas para transmisión de los datos en las bandas de frecuencia libres de 2.4 GHz y 5 GHz, brindando una ventaja la movilidad y eliminando la necesidad de utilizar cables para la conexión de los dispositivos.

Las WLAN han recibido una gran aprobación por parte de los clientes y los fabricantes quienes han tomado ventaja comercial debido a las grandes demandas, sin embargo, se espera que las mejoras realizadas al estándar IEEE 802.11 permitan alcanzar velocidades de transmisión mucho más altas con el objetivo de atender los requerimientos más rigurosos en las comunicaciones.

2.1.3 ARQUITECTURA WLAN

Las redes cableadas están compuestas de adaptadores de clientes y AP, los cuales realizan funciones semejantes al concentrador (Hubs- Concentrador) [16].

De acuerdo con [16] las redes WLAN pueden disponer de una topología punto a punto a la cual también se la conoce como Ad-Hoc, en el caso de instalaciones pequeñas o de menor tamaño, sin embargo, si se necesita de mayores prestaciones se incluye los AP de manera que en ese caso la topología de trabajo es de estrella y se la puede citar como red inalámbrica de infraestructura.

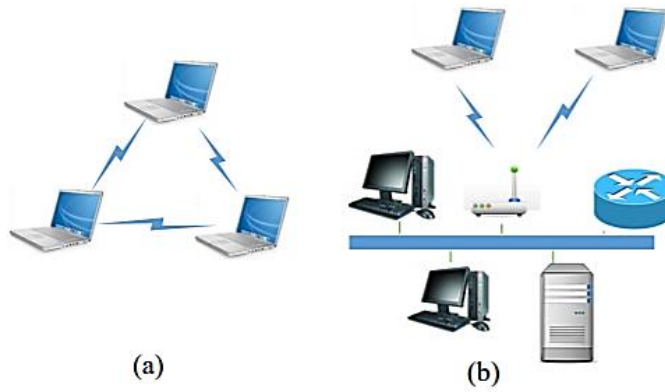


Figura 1. (a) Red Ad- Hoc (b) Red inalámbrica con AP

Fuente:[1].

2.2 ESTÁNDAR 802.11 Y SUS VARIANTES

IEEE es una organización de carácter mundial que fue creada en el año de 1884 con el objetivo de estandarizar. En el entorno de las redes, el IEEE ha creado varios estándares entre los cuales se puede mencionar al estándar IEEE 802.11 tanto para redes LAN como para redes WAN (Wide Área Network), con un enfoque dedicado a las dos capas inferiores del modelo OSI (Open System Interconnection) [17].

En la tabla 1 se detallan algunas de las variantes del estándar IEEE 802.11.

Tabla 1. Estándares con su descripción.

Estándar	Frecuencia	Tasa binaria máxima	Características
IEEE 802.11 a	5 GHz	54 Mbps	Alta velocidad de técnicas OFDM empleadas.
IEEE 802.11 g	2.4 GHz	54 Mbps	Mayor y más larga extensión de 802.11 b de alta velocidad con el uso de técnicas OFDM y DSSS.
IEEE 802.11 h	5 GHz	-	Gestionada la potencia y extensión de espectro.
IEEE 802.11 n	2.4 y 5 GHz	600 Mbps	Ocupa el modo de transmisión MIMO y canales de 40 MHz.
IEEE 802.11 ac	5 GHz	1 Gbps	Muy alto rendimiento. Velocidad máxima de 1.3 Gbps alcanzada con 8 “streams” MIMO con modulación de 256 QAM (Quadrature Amplitude Modulation).
IEEE 802.11 ax	2.4 y 5 GHz	1.2 Gbps/stream	Una versión mejorada de 802.11 ac. Utiliza canales de 160 MHz y técnicas OFDMA.
IEEE 802.11 ay	60 GHz	40 Gbps	Descendiente de la versión 802.11 ad. En proceso.

Fuente: Elaboración propia, con base [10].

2.3 IEEE 802.11ax

El estándar IEEE 802.11 ax agrega escalabilidad, eficiencia y flexibilidad a las redes, lo que les permite incrementar la velocidad y capacidad. La IEEE enseñó esta variante con la finalidad de obtener la libertad y la mayor velocidad de la tecnología Gigabit Ethernet añadiendo confiabilidad y seguridad. La variante 802.11ax habilita a las empresas y fabricantes que permitan nuevas aplicaciones dentro de la red WLAN, a la vez que ofrecen un mayor servicio a las antiguas aplicaciones, preparando el sector hacia una mayor aceptación del Wi-Fi.

La versión IEEE 802.11 ax alcanza los siguientes beneficios al potenciar tres dimensiones diferentes:

- Modulación más compacta con QAM de 1024, habilitando una tasa de más del 35%.
- Programación con base en OFDMA permite disminuir la latencia y sobrecarga.
- Establecer señales robustas con una alta eficiencia para su operabilidad con indicación RSSI (Received Signal Strength - Indicator) significativamente menor.

2.3.1 CAPA FÍSICA

La nueva especificación 802.11ax, conocido como Wi-Fi 6, integra cambios importantes en las capas físicas y MAC de un protocolo. Una modificación importante es la introducción de una perspectiva de OFDM, la cual tienen sus bases en el CSMA/CA. El presente estándar fue creado con una cautelosa consideración de las especificaciones heredadas de las variantes 802.11a/b/g/n/ac, lo cual asegura la condición de compatibilidad con sus anteriores versiones, además, soporta el ancho de banda del canal desde 40 MHz hasta 2.4 GHz y desde 160 MHz hasta 5.0 GHz.

En virtud de OFDMA, las subportadoras de canal son agrupadas dentro de los dominios del tiempo y frecuencia, es decir en unidades de recursos (RU), este enfoque facilita la comunicación simultánea con múltiples receptoras al mapear varias RU a distintas estaciones evitando la selección de frecuencias al designar un ancho de banda de estación tan bajo como 2.5 MHz o 26 subportadoras [18].

Se integra una tasa de modulación más alta de 1024-QAM en adición a las admitidas por el estándar 802.11ac, BPSK (Binary Phase Shift Keying), 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM, además este estándar añade soporte para tasas de corrección de errores de avance más elevadas de $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, y $\frac{5}{6}$. La capa física también ofrece una tasa de datos incrementada en el 25%, alcanzando 9.6 Gbps en un elevado MCS (Modulation Coding Scheme), el cual es transmitido a través de canales de 160 MHz o 80 + 80 MHz con ocho streams espaciales y un GI de 0.8 μ s [19].

2.3.2 IEEE 802.11AX Y DETERMINISMO

Cada una de las generaciones de telefonía móvil como por ejemplo 2, 3 y 4G ha generado una gran congestión en las redes inalámbricas incluida la nueva tecnología 5G que necesitará una mayor capacidad en las redes Wi-Fi las cuales soporta datos de voz y video, por lo que al estándar IEEE 802.11 ax se lo considera un excelente aliado para la operación de redes WLAN [20].

Con la ejecución de redes inalámbricas de alta eficiencia con base en el estándar IEEE 802.11 ax, el principal enfoque es el de brindar niveles de eficiencia mucho más altos a las redes Wi-Fi y guiados en los KPI (Key Performance Indicator) cuyo objetivo es aumentar la calidad de experiencia (QoE).

La puesta en marcha de las redes inalámbricas de alta eficiencia presenta grandes desafíos como:

- Ambientes saturados con abonados que empleen dispositivos bajo el estándar IEEE, y todos utilizando recursos de la red al mismo tiempo.
- El aumento de aplicaciones con realidad virtual, el internet de las cosas, entre otras, establece nuevos requerimientos.

Para [11] al suministrar velocidades en el orden de los Gigabit en el interior de un espacio único usando modulación 1024 QAM, se brinda un rendimiento máximo que normalmente es logrado en ambientes con bajas densidades, por el contrario, al incrementar la densidad del abonado y del AP, alcanzar este rendimiento decrece en torno que el tiempo de los abonados crece, a esta degradación se la conoce como CCI (Co- Channel Interference) lo que produce inconvenientes en entornos abiertos, donde la propagación se encuentra próxima a la línea de visión, el estándar IEEE 802.11ax combate este problema gracias a la técnica de OFDMA.

La técnica OFDMA garantiza la transferencia libre de datos al abonado tanto en enlaces descendentes como ascendentes, en una única TXOP (Transmission Opportunity), la unión de multiusuario al canal EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) y UL-OFDMA (Uplink -Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), da acceso a que el AP afecte a los usuarios de IEEE 802.11 ax e IEEE 802.11 ac. Ambas estructuras mencionadas, no son solo más eficientes y poseen menos susceptibilidad a pérdida de información, sino que

también permiten que el AP tenga mayor control de las transmisiones, brindando mayor determinismo [21].

2.3.3 OFDMA Y UNIDAD DE RECURSOS

En el estándar IEEE 802.11 ac, los usuarios se encuentran separados por espacio y tiempo. En el tiempo la transmisión se asigna a los AP y a los afiliados de forma igual con el uso de EDCA, mientras que en el espacio se ejecuta la técnica multiusuario de enlace descendente MIMO para la separación y la capacidad de transmisión consecutiva restringida por la cantidad de antenas, que comúnmente son hasta 4 antenas.

La variante IEEE 802.11 ax recibe una dimensión adicional a las del estándar IEEE 802.11 ac, que es de frecuencia, y para combatir la interferencia el estándar IEEE 802.11 ax con OFDMA los grupos de subportadoras son designadas de forma individual a los abonados como unidades de recurso por cada PPDU (PLCP Protocol Data Unit), con OFDMA se consigue una mayor eficiencia ya que, se reducen las colisiones y mejora la manera de realizar QoS [21].

El AP en el estándar IEEE 802.11 ax manipula la atribución de las unidades de recursos de enlace descendente y ascendente en competencia de la PPDU, es una técnica de programación del AP y en los dominios tanto frecuenciales como espaciales, y a pesar de que el estándar IEEE 802.11 ax no esclarece de manera formal la programación con base en el tiempo semejante a LTE que cuenta con espectro licenciado, se emplean conocimientos y técnicas avanzadas en relación a colas o QoS para alcanzar respuestas parecidas a las de la telefonía móvil, que involucra que en una red inalámbrica con la variante IEEE 802.11 ax se puede resolver el espectro y la interferencia [22].

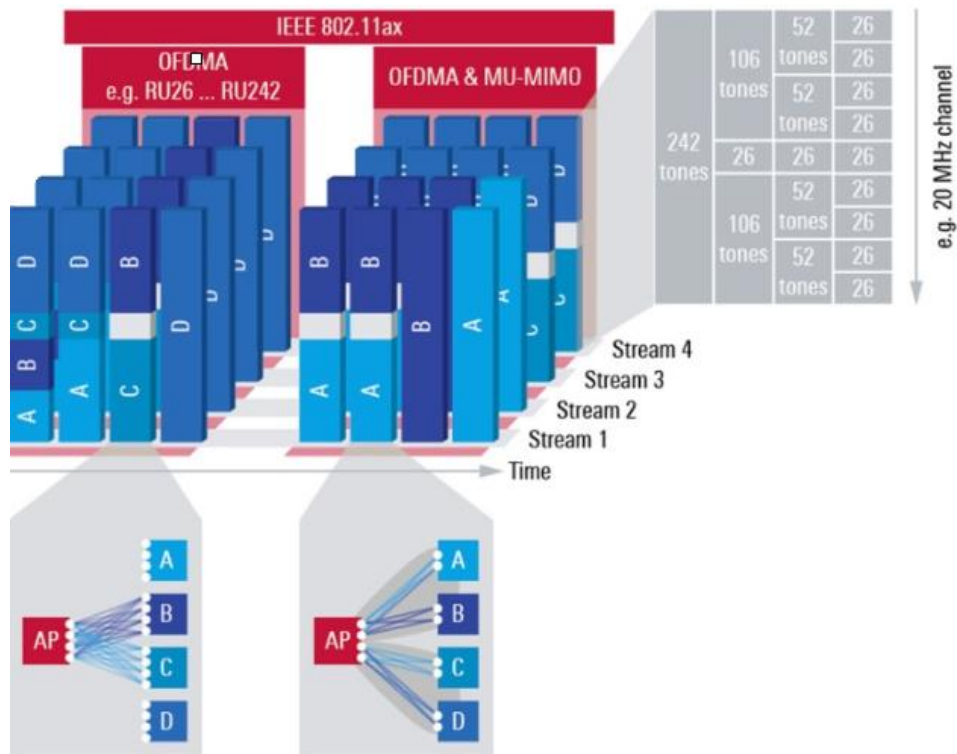


Figura 2. Dimensiones del OFDMA en 802.11 ax

Fuente: [20].

Cuando se trata de aplicaciones con sensibilidad de latencia, como es el caso específico de las IoT, sistemas de realidad virtual y aplicaciones. La capacidad para gestionar que posee el AP es relevante para alcanzar el rendimiento propuesto, en cuanto al rendimiento, con la variante IEEE 802.11 ax, a mayor cantidad de abonados y AP operando en cada acceso al canal, será mayor la eficiencia lograda por los AP. Con el estándar IEEE 802.11 ax la ganancia en su velocidad es del 25%, lo que le permite ser el primero con la capacidad para lograr tasas del orden de los gigabits y con una única antena, sin duda alguna una de las ventajas de este estándar es la multiplexación OFDMA, la cual constituye una versión mejorada de la tecnología OFDM [20].

La multiplexación OFDMA tiene por característica el uso eficiente del espacio de frecuencia, esto lo logra dividiendo el ancho de banda del canal en varias sub bandas conocidas como unidades de recursos, al dividir ese ancho de canal permite que varios abonados puedan ingresar a la interfaz al mismo tiempo, por consiguiente, las transmisiones de tramas pequeñas a grandes son aceptadas de forma simultánea, por lo que, al usar OFDMA un punto de acceso en el estándar IEEE 802.11 ax es capaz de transmitir a la vez tramas pequeñas

hasta nueve estaciones del tipo 802.11 ax, esta transmisión simultánea reduce la carga en la capa MAC y disminuye la carga de contención [23].

2.3.4 MULTIPLE-USER, MULTIPLE-INPUT, MULTIPLE-OUTPUT (MU-MIMO)

El sistema MIMO (Multiple Input -Multiple Output) fue presentado junto con la variante IEEE 802.11 n en el enlace descendente, este sistema logra aumentar la tasa de transmisión de datos enviando múltiples flujos de la información a la vez mediante diferentes antenas desde el AP a un único usuario, en caso de requerir brindar servicio a más de un abonado se lo hace de forma secuencial en el tiempo. El estándar IEEE 802.11 ac aumenta mucho más su rendimiento gracias al sistema MU – MIMO (Multi -User MIMO), atendiendo múltiples abonados de forma simultánea lo que produce un incremento en la tasa de transmisión de datos efectiva.

El MU-MIMO emplea la conformación de haces en el enlace descendente como se observa en la figura 3, la radiación de la matriz de antenas es configurada de forma tal que cree un haz en la dirección de cada abonado de manera individual, con esto se logra que una estación solo acepte señales dirigidas a ella. El estándar IEEE 802.11 ax hace suya esta función y expande la cantidad posible de flujo de información desde cuatro hasta ocho, adicional la variante IEEE 802.11 ax logra por primera vez que su enlace ascendente use también el MU-MIMO.

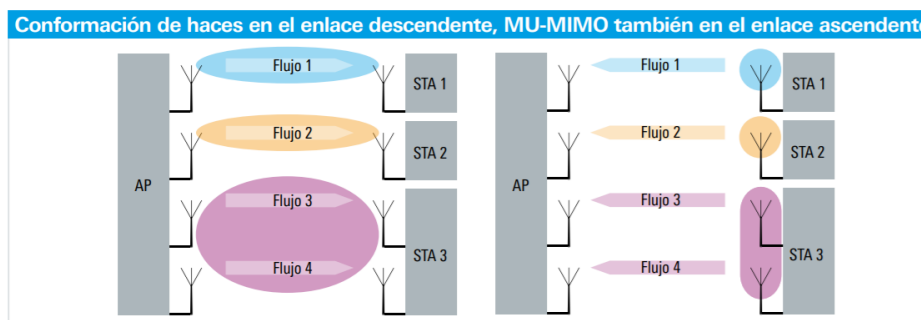


Figura 3. Configuración en los enlaces descendente y ascendente.

Fuente: [13].

En base a lo mencionado anteriormente, se determina que múltiples estaciones transmitan al mismo tiempo, sin embargo, se puede separar dichas señales gracias a su matriz de antenas, para posteriormente asignarlas a los diferentes abonados [24].

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

El objetivo del presente proyecto es investigar y analizar aspectos en concretos que aún no han sido analizados con profundidad. Principalmente se trata de una metodología exploración que permite que investigaciones futuras puedan dirigirse a un análisis con más detalle.

La metodología consiste en una comparación de fuentes de información o el estudio de fundamentos teóricos a la problemática.

Tipo de Investigación

Aplicada: se conoce como “la investigación práctica o empírica”, su objetivo general es buscar los diferentes conocimientos adquiridos en la vida estudiantil. A su vez que se obtienen otros, para la ejecución de la práctica en la investigación. La utilización del conocimiento y los resultados dan como conclusión una forma organizada, precisa y sistemática de conocer la realidad [25].

Descriptiva: conocida como la investigación diagnóstica. El objetivo general consiste, en asegurar un posible fenómeno o una situación en concreto identificando sus características más significativas [24].

Diseño de Investigación

Experimental: Consiste en obtener una o más variables de estudio, para analizar los parámetros y la consecuencia en las conductas determinadas. Dicha en otras palabras la investigación experimental realiza un cambio en el valor de una variable “x” y se visualiza su efecto en otra variable “y”, Esto se lleva a cabo en situaciones controladas, con el objetivo de describir de qué modo o por qué sucede un acontecimiento o situación en específico [26].

Método de investigación

El método de investigación que se pretende aplicar se encuentra en los Métodos Lógicos, específicamente la Inducción Completa, ya que sus conclusiones tendrán resultados basándose en los parámetros definidos en la investigación, para esto se debe recopilar información de los estándares de red inalámbricos actuales, para compararlos con el nuevo estándar [27].

Unidad de análisis

Para la interpretación y análisis de resultados de la investigación propuesta, se recoge, organiza y analiza datos. Estos datos se representan en tablas que contiene su respectivo análisis, a fin de interpretar los resultados realizados en la simulación.

Esto se realiza aplicando estadística inferencial la misma que para [17] ,pretende obtener datos como la población, a través de una muestra considerable sacada de ella. Concluye que la estadística inferencial estudia o investiga a una población, tomando de referencia los datos y resultados que se logran de una muestra en específica.

Las técnicas de recolección de datos primarios y secundarios

Las respectivas técnicas de recopilación de resultados empleados en el presente trabajo son:

Uso de Instrumentos: mediante el uso de software se evalúa el rendimiento de despliegue WLAN en escenario con tráfico de red elevado.

Instrumentos de recolección de datos y simulación

Software: Microsoft Excel, Windows 10, Módulo de Comunicaciones inalámbricas (Wireless Communications) de Matlab dentro del cual se encuentra la librería para WLAN y conectividad de estándares (WLAN and Connectivity Standards). Se trabajará con la versión de IEEE 802.11 ax 2019, descrita anteriormente.

A continuación, se presenta las etapas de la investigación:

Escenario de pruebas

Para el escenario de pruebas se contempla el Auditorio de la Universidad Nacional de Chimborazo (Figura 5), sobre el cual se utiliza para las simulaciones con una cantidad de 64, 128 y 255 usuarios respectivamente, por cada modo de transmisión, teniendo presente una transferencia de 5 paquetes como mínimo y 10 paquetes como máximo, considerando que dicho valor es variable y sucede solo en la teoría.

Se coloca temporalmente 5 Access Point 802.11 ax, ubicados en el centro y a los 4 extremos del mismo. Al utilizar esta cantidad de Access Point no se solapan y por lo tanto no existen problemas de interferencia. Cabe destacar que al hablar de AP 802.11 ax se entiende como una red formada por un gran número de terminales (Figura 6).

Para la simulación en Matlab, se considera los siguientes parámetros: El formato HE multiusuario se puede configurar para una transmisión OFDMA, una transmisión MU-MIMO o una combinación de las dos. Esta flexibilidad permite que un paquete HE-MU se transmita a un solo usuario en toda la banda, múltiples usuarios en diferentes partes de la banda (OFDMA) o múltiples usuarios en la misma parte de la banda (MU-MIMO).

A continuación, se puede visualizar el escenario de pruebas en la figura 4 y el diseño de la red en la figura 5 respectivamente.

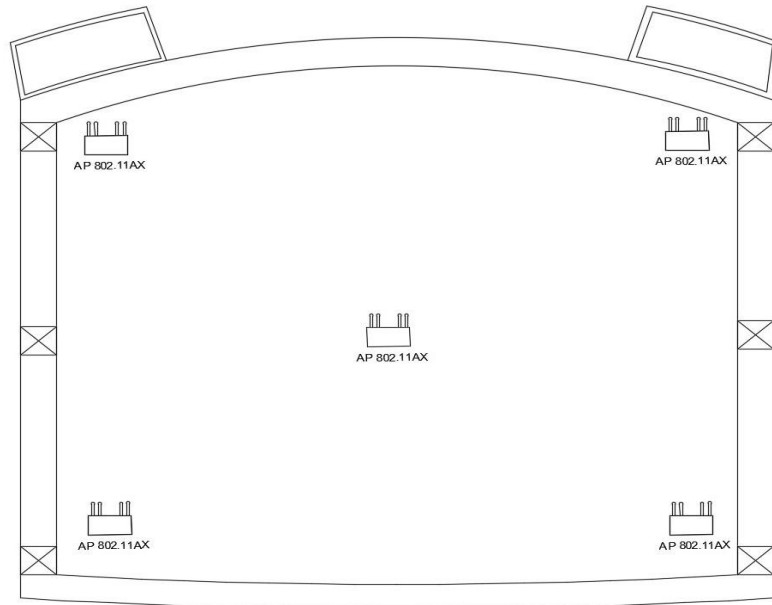


Figura 4. Escenario de pruebas Auditorio de la UNACH

Fuente: Elaboración propia.

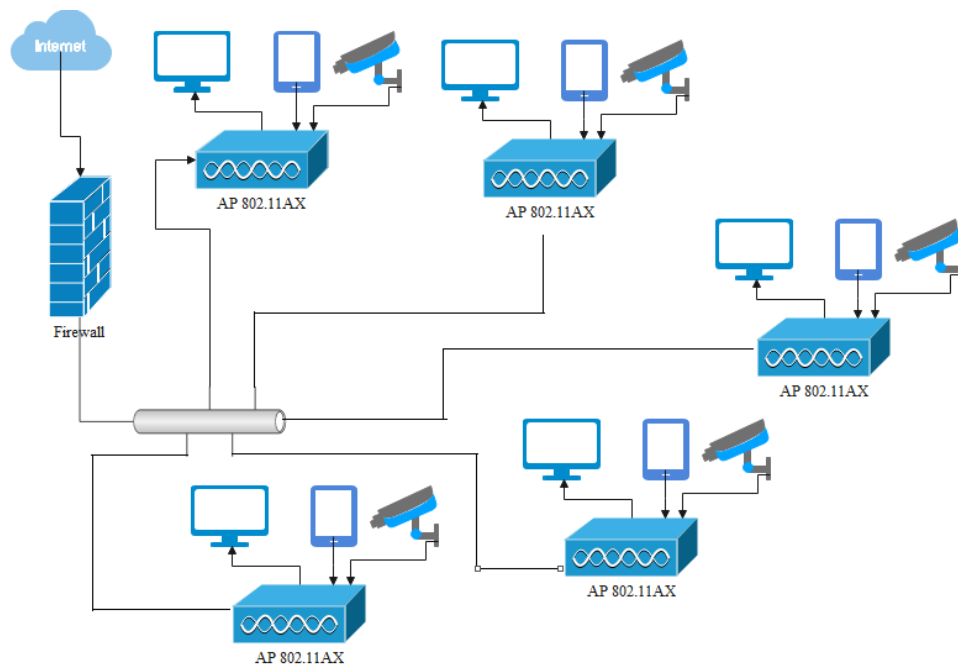


Figura 5. Diseño de red

Fuente: Elaboración propia.

Se compara tres modos de transmisión para el escenario de enlace descendente multiusuario:

OFDMA: a los usuarios se le asigna una unidad de recursos (RU) separada y la transmisión se forma por haz.

MU-MIMO: los cuatro usuarios comparten la banda completa.

MU-MIMO y OFDMA mixtos: dos usuarios comparten una única RU en una configuración MU-MIMO y a los dos usuarios restantes se le asigna una única RU a cada uno.

Para cada modo de transmisión, el AP transmite una ráfaga de 10 paquetes variables en número y tamaño y cada STA (Estaciones de usuario) demodula y decodifica los datos destinados a él. Un canal MIMO interior TGax en evolución con AWGN se modela entre el AP y cada STA. El rendimiento de AP sin procesar se proporciona como una métrica para comparar los modos de transmisión y se calcula contando el número de paquetes transmitidos con éxito a todas las STA.

Algunos métodos a utilizar.

wlanHEMUConfig: se utiliza para configurar la transmisión de un paquete HE-MU. Se especifica tres objetos de configuración de transmisión para definir las tres transmisiones AP.

cfgMUMIMO: es una configuración MU-MIMO que consta de un solo RU de 242 tonos con cada uno de los usuarios. Cada usuario tiene una secuencia de espacio-tiempo.

cfgOFDMA: es una configuración OFDMA que consta de cuatro RU de 52 tonos, cada uno con un usuario. Cada usuario tiene dos flujos de espacio-tiempo.

cfgMixed: es una configuración mixta OFDMA y MU-MIMO que consiste de una RU de 106 tonos compartida por dos usuarios y dos RU de 52 tonos, cada una con un usuario. Los usuarios de MU-MIMO tienen cada uno un flujo de espacio-tiempo, y en los usuarios de OFDMA tienen cada uno dos flujos de espacio tiempo.

Se utiliza para la simulación de ancho de banda de 20, 40, 80 y 160 MHz, las mismas que son soportadas por el estándar mencionado [20].

Otro de los parámetros de transmisión como APEPLength y MCS son los mismos para todas las configuraciones en los usuarios.

Los diferentes escenarios se presentan a continuación:

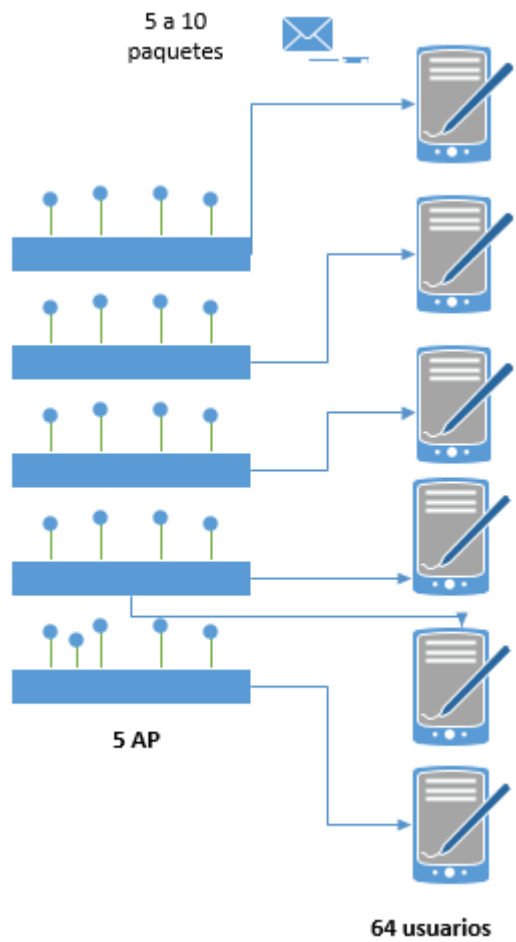


Figura 6: Escenario con 64 usuarios

Fuente: Elaboración propia.

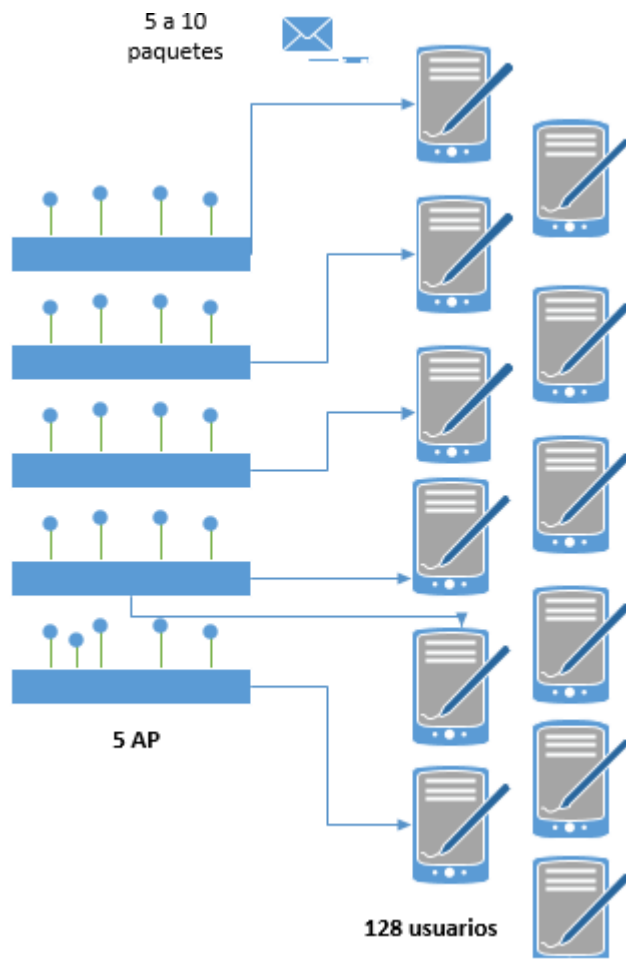


Figura 7: Escenario con 128 usuarios

Fuente: Elaboración propia.

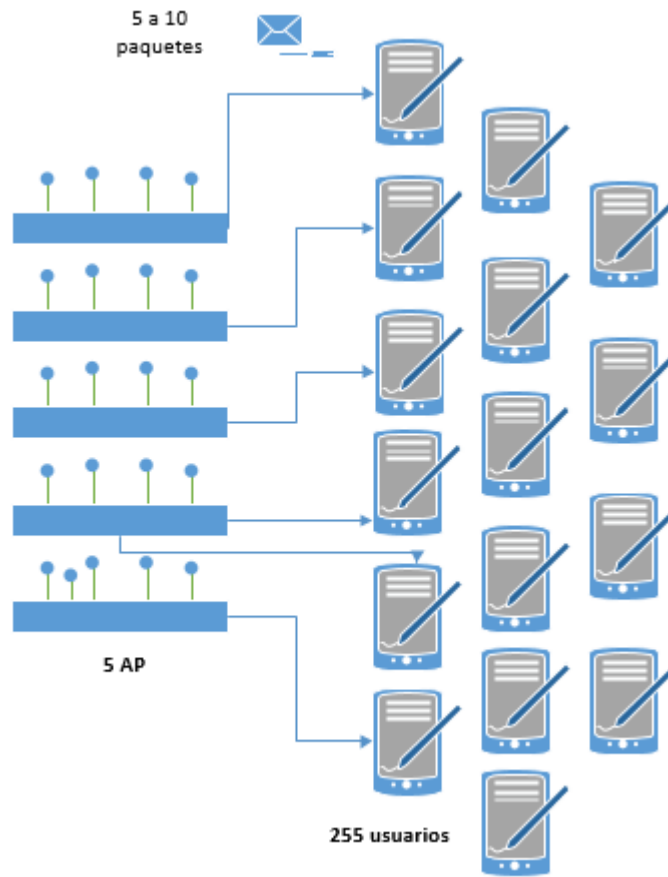


Figura 8: Escenario con 255 usuarios

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describe el procedimiento a ejecutar para el proyecto.

Simular tres modos de transmisión: OFDMA, MU-MIMO y la combinación de OFDMA y MU-MIMO.

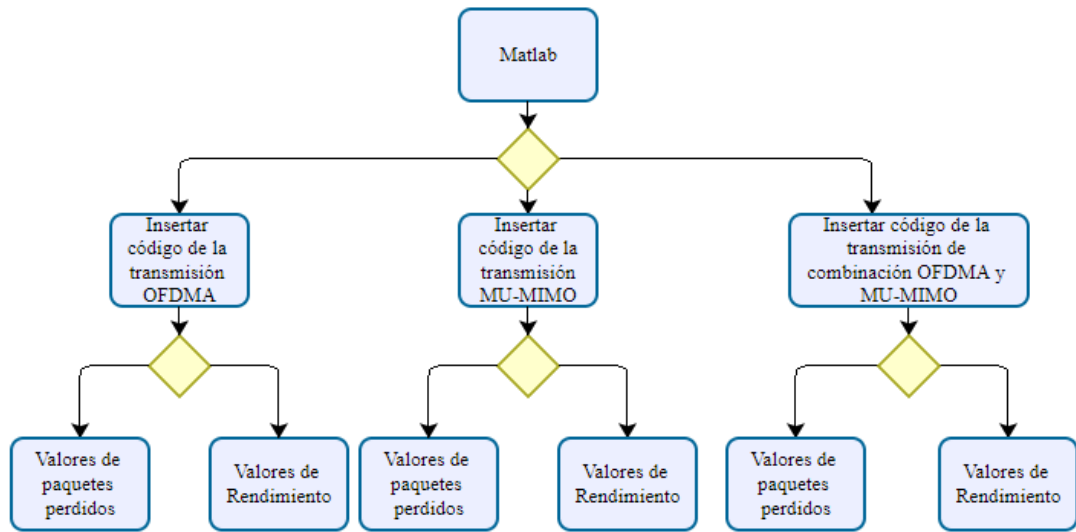


Figura 9. Flujo del experimento.

Fuente: Elaboración propia.

Simular la capa física, enlace, datos y el rendimiento del estándar 802.11ax y un tráfico de red elevado.

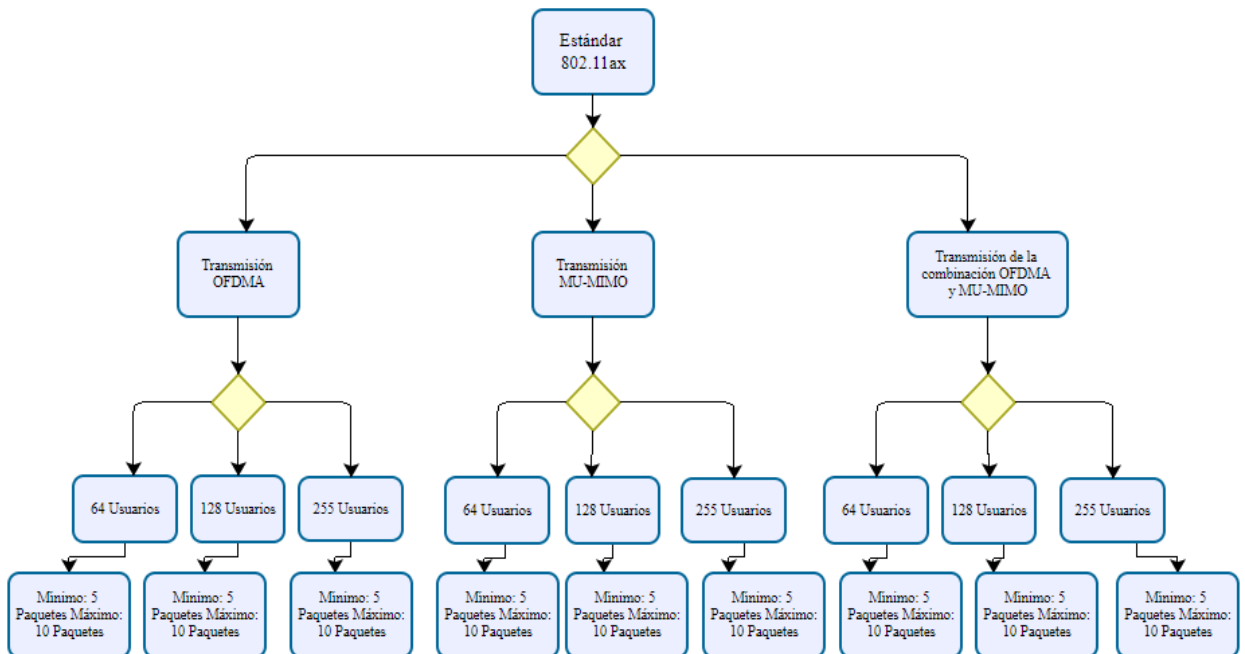


Figura 10. Tráfico de red elevado

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 8 se observa la tabla de asignación de RU para asignaciones ≤ 20 MHz.

Allocation Index	20 MHz Subchannel Resource Unit (RU) Assignment							
0	26	26	26	26	26	26	26	26
1	26	26	26	26	26	26	26	52
2	26	26	26	26	26	52	26	26
3	26	26	26	26	26	52	52	
4	26	26	52	26	26	26	26	26
5	26	26	52	26	26	26	52	
6	26	26	52	26	52	26	26	26
7	26	26	52	26	52	52	52	
8	52	26	26	26	26	26	26	26
9	52	26	26	26	26	26	52	
10	52	26	26	26	52	26	26	
11	52	26	26	26	52	52	52	
12	52	52	26	26	26	26	26	26
13	52	52	26	26	26	26	52	
14	52	52	26	26	26	52	26	26
15	52	52	26	26	52	52	52	
16-23 (15 + N)	52	52	-	106 (N users)				
24-31 (23 + N)	106 (N users)	-	52	52				
32-39 (31 + N)	26	26	26	26	26	106 (N users)		
40-47 (39 + N)	26	26	52	26	106 (N users)			
48-55 (47 + N)	52	26	26	26	106 (N users)			
56-63 (55 + N)	52	52	26	106 (N users)				
64-71 (63 + N)	106 (N users)	26	26	26	26	26	26	26
72-79 (71 + N)	106 (N users)	26	26	26	52			
80-87 (79 + N)	106 (N users)	26	52	26	26			
88-95 (87 + N)	106 (N users)	26	52	52				
96-99 (95 + M)	106	-	106 (M users)					
100-103 (99 + M)	106 (2 users)	-	106 (M users)					
104-107 (103 + M)	106 (3 users)	-	106 (M users)					
108-111 (107 + M)	106 (4 users)	-	106 (M users)					
112	52	52	-	52	52			
113	Empty 242-tone RU - No user assigned							
116-127	Reserved							
128-135 (127 + N)	106	26	106 (N users)					
136-143 (135 + N)	106 (2 users)	26	106 (N users)					
144-151 (143 + N)	106 (3 users)	26	106 (N users)					
152-159 (151 + N)	106 (4 users)	26	106 (N users)					
160-167 (159 + N)	106 (5 users)	26	106 (N users)					
168-175 (167 + N)	106 (6 users)	26	106 (N users)					
176-183 (175 + N)	106 (7 users)	26	106 (N users)					
184-191 (183 + N)	106 (8 users)	26	106 (N users)					
192-199 (191 + N)	242 (N users)							

Figura 11: Asignación de RU

Fuente: Mathworks [28].

Hipótesis y operacionalización de variables

Hipótesis de investigación (Hi)

El análisis y la simulación del estándar 802.11 ax permiten una evaluación del rendimiento de despliegue WLAN en escenarios con tráfico de red elevado.

Hipótesis nula (Ho)

El análisis y la simulación del estándar 802.11 ax no permiten la evaluación del rendimiento de despliegue WLAN en escenarios con tráfico de red elevado.

Variable independiente

Análisis y la simulación del estándar 802.11 ax.

Variable dependiente

Evaluación del rendimiento de despliegues WLAN en escenarios con tráfico de red elevado.

Tabla 2. Operacionalización de variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	CONCEPTO	INDICADORES	INSTRUMENTO
Análisis y la simulación del estándar 802.11ax.	Consiste en un estudio previo del estándar y obtener conceptos claves para la simulación de algunos modos de transmisión	Paquetes perdidos	Módulo de comunicaciones inalámbricas (Wireless Communications) de Matlab Excel
VARIABLE DEPENDIENTE	CONCEPTO	INDICADORES	INSTRUMENTO
Evaluación del rendimiento de despliegues WLAN en tráfico de red elevado.	Con los resultados obtenidos evaluar la carga del tráfico con los usuarios.	Rendimiento de la red con número de usuarios concurrentes (64, 128, 255)	Módulo de comunicaciones inalámbricas (Wireless Communications) de Matlab Excel

Fuente: Elaboración propia.

Paquetes perdidos: Cuando se pierden paquetes de datos durante la transmisión o cuando ciertos paquetes de datos individuales llegan tarde a su destino. Antes de ser enviados, los datos se empaquetan. Estos paquetes viajan a través de múltiples entidades hasta llegar a su destino.

Rendimiento de la red: medir la calidad del servicio entregado por la calidad del de la red en general. A su vez, permite monitorizar y mantener los servicios, asegurándose de que la red está funcionando correctamente. Por lo que, la monitorización del rendimiento provee una vista detallada de cómo es percibido el servicio por el cliente final.

Comprobación de la hipótesis

En la verificación de la hipótesis de análisis se obtiene una variable independiente X el siguiente valor:

X = Estándar 802.11 ax.

A través del cual se determina el impacto sobre la variable dependiente y Evaluación del rendimiento de despliegues WLAN en escenarios con tráfico de red elevado. Así en la Tabla 3 se presenta los valores para la variable dependiente, aplicada con un número de usuarios concurrentes.

Para determinar la hipótesis se utiliza el método chi cuadrado o χ^2 , el mismo que no parametriza a través de la cual se mide entre las variables dependiente e independiente. Adicional, se considera tanto la hipótesis nula como “Ho” como la hipótesis de investigación “Hi”.

Para esto, se elabora una tabla de respaldo para el cálculo de χ^2 , la misma que sus dos variables de estudio son: análisis y la simulación del estándar 802.11 ax y evaluación del rendimiento de despliegues WLAN en escenarios con tráfico de red elevado.

Posterior a esto, se obtiene las frecuencias esperadas, las cuales constituyen los resultados esperados de hallar si las variables no estuvieran concatenadas. El χ^2 partirá de una hipótesis de “no relación entre las variables” y se analiza si es verdadera o no, evaluando si las frecuencias obtenidas son distintas de lo que pudiera esperarse en caso de ausencia de correlación.

La frecuencia obtenida en cada celda, se calcula través de la fórmula de la figura 9.

$$f_e = \frac{(total_de_fila)(total_de_columna)}{N}$$

Donde N es el número total de frecuencias observadas

Figura 12. Fórmula de frecuencia esperada

Con las frecuencias esperadas, se emplea la fórmula de la figura 10:

$$\chi^2 = \sum \frac{(O-E)^2}{E}$$

Donde:

O es la frecuencia observada en cada celda

E es la frecuencia esperada en cada celda

Figura 13. Fórmula de chi cuadrado

Posteriormente se calcula el valor de χ^2 . Para encontrar si el valor de χ^2 es o no representativo se debe establecer los grados de libertad a través de la fórmula que se describe a continuación:

$$G_l = (r - 1)(c - 1)$$

Donde:

r es el número de filas de la tabla de contingencia.

c es el número de columnas de la tabla de contingencia.

De la tabla de distribución del chi- cuadrado se elige un nivel de confianza adecuado que puede ser ($\alpha = 0,05$), y conjuntamente con los grados de libertad obtenidos en el cálculo anterior, se selecciona un valor de χ^2 , que es comparado con el encontrado en esta investigación para ratificar o rechazar la hipótesis nula.

Población de estudio

Es un conjunto de elementos de los que se quiere saber o investigar alguna o algunas de sus particularidades. Para el presente estudio un escenario con alto tráfico dentro de la UNACH se encuentra en el Auditorio Institucional del Campus MsC Edison Riera, el mismo que cuenta con una capacidad de 1200 asistentes. En este sentido, se utilizará este escenario para realizar la simulación del estándar 802.11 ax.

Tamaño de muestra

Es un subconjunto característico y finito que se extrae de la población accesible. Para el proyecto será los datos de 64, 128 y 255 usuarios concurrentes, con los cuales se realizará las simulaciones.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se detalla algunas características de la simulación:

- Se simula un escenario de un punto de acceso (AP) transmitiendo a 64, 128, 255 estaciones (STA) simultáneamente utilizando multiusuario de alta eficiencia (HE)
- 802.11ax Downlink OFDMA y simulación de rendimiento MIMO multiusuarios.
- Se simulan tres modos de transmisión: OFDMA, MU-MIMO y combinación de OFDMA y MU-MIMO.
- Para cada modo de transmisión, el AP transmite una ráfaga de 10 paquetes y cada STA demodula y decodifica los datos destinados a él.

Se comparan tres modos de transmisión para el enlace descendente multiusuario escenario:

- **OFDMA:** a cada uno de los cuatro usuarios se le asigna una unidad de recursos separada (RU) y la transmisión tiene forma de haz.
- **MU-MIMO:** los cuatro usuarios comparten la banda completa.
- **MU-MIMO y OFDMA mixtos:** dos usuarios comparten una única RU en un MU-MIMO de configuración, y a los dos usuarios restantes se le asigna una única RU a cada uno.

Configuración de transmisión

- **wlanHEMUConfig:** se utiliza para configurar la transmisión de un paquete HE-MU. Se especifican tres objetos de configuración de transmisión para definir las tres transmisiones AP diferentes.

- **cfgMUMIMO:** es una configuración MU-MIMO que consta de un solo RU de 242 tonos con cada uno de los usuarios. Cada usuario tiene una secuencia de espacio-tiempo.
- **cfgOFDMA:** es una configuración OFDMA que consta de cuatro RU, de 52 tonos, cada uno con un usuario. Cada usuario tiene dos flujos de espacio-tiempo.
- **cfgMixed:** es una configuración mixta OFDMA y MU-MIMO que consiste de una RU de 106 tonos compartida por dos usuarios y dos RU de 52 tonos, cada una con un usuario. Los usuarios de MU-MIMO tienen cada uno un flujo de espacio-tiempo, y en los usuarios de OFDMA tienen cada uno dos flujos de espacio tiempo.

Configuración de los anchos de banda permitidos por 802.11 ax

De los antes mencionado se indica que el estándar 802.11 ax soporta anchos de banda de 20, 40, 80 y 160 MHz, por tal motivo para realizar la programación se utiliza funciones, con una frecuencia y el número específico de usuarios, a estos datos de entrada se les conoce como parámetros, ya que para cada escenario con 64, 128 y 255 usuarios se tenían que considerar primero: 5 Access Point y que cada uno se encuentre con el ancho de banda indicado anteriormente.

La parametrización se realiza con el ancho de banda y el número de usuarios específicos.

En la figura 14 se visualiza las variables utilizadas de manera general en la programación:

```
%% Escenario 128 usaurios con 5 AP
% 32 usuarios con n=8 - 160 MHz
[res_80]=access(195,112,112,8,'AP_1'); % 160MHz
% 16 usuarios con n=1 - 20 MHz
[res_20] = ap_1(2,2,2,1,4,111,111,1,'AP_2'); % 20MHz
% 32 usuarios con n=2 - 40 MHz
[res_32]=ap_1(1,1,1,2,2,2,2,2,'AP_3'); % 40 MHz
% 32 usuarios con n=4 - 80 MHz
[res_32_80]=access(1,1,1,4,'AP_4'); % 80 MHz
% 16 usuarios con n=4 - 80 MHz
[res_80_16]=access(17,17,17,4,'AP_5'); % 80 MHz
total 128 = [res 80;res 20;res 32;res 32 80;res 80 16]; % resultados
```

Figura 14. Variables generales para escenario de 128 usuarios.

Fuente: Elaboración propia.

n: representa las bandas de frecuencia que se utiliza, dependiendo del n, se parametriza cada frecuencia con el número de tonos, el primero para OFDMA, el segundo para MU-MIMO el tercero para la combinación de OFDMA Y MU-MIMO, este proceso corresponde para un Access Point y se repite para los demás.

En la figura 14, se utiliza 8 bandas de frecuencia por lo cual se está utilizando 160 MHz, con 1 banda se trabaja en 20 MHz, con 2 en 40MHz y así sucesivamente según dependa los resultados de la simulación.

Al final el resultado de cada simulación, con cada banda, número de usuarios y Access Point se muestra en una tabla, la misma que es el resultado final de la simulación para cada escenario.

A continuación, a modo de ejemplo, se presenta el resultado de un escenario cuyas características son la siguiente: 5 AP, 3 modulaciones, las métricas de pérdida y rendimiento finalmente con 128 usuarios.

Tabla 3. Resultados para escenario de 128 usuarios.

OFDMA- AP_1	OFDMA- AP_1	MU-MIMO- AP_1	MU- MIMO- AP_1	Combinación OFDMA-MU- MIMO-AP_1	Combinación OFDMA-MU- MIMO-AP_1
Rendimiento	Pérdidas	Rendimiento	Pérdidas	Rendimiento	Pérdidas
37.5587	96	55.1724	96	37.5587	96
37.5587	99	55.1724	99	37.5587	99
37.5587	102	55.1724	102	37.5587	102
37.5587	105	55.1724	105	37.5587	105
OFDMA- AP_2	OFDMA- AP_2	MU-MIMO- AP_2	MU- MIMO- AP_2	Combinación OFDMA-MU- MIMO-AP_2	Combinación OFDMA-MU- MIMO-AP_2
Rendimiento	Pérdidas	Rendimiento	Pérdidas	Rendimiento	Pérdidas
16.9492	96	5.8997	96	14.9492	96

16.9492	99	5.8997	99	14.9492	99
14.4068	102	4.6460	102	1404068	102
8.0508	105	4.1298	105	8.0508	105
OFDMA- AP_3	OFDMA- AP_3	MU-MIMO- AP_3	MU- MIMO- AP_3	Combinación OFDMA-MU- MIMO-AP_3	Combinación OFDMA-MU- MIMO-AP_3
Rendimiento	Pérdidas	Rendimiento	Pérdidas	Rendimiento	Pérdidas
16.9492	96	6.1303	96	16.9492	96
16.9492	99	6.1303	99	16.9492	99
14.4068	102	6.1303	102	14.4068	102
8.0805	105	6.1303	105	8.0508	105
OFDMA- AP_4	OFDMA- AP_4	MU-MIMO- AP_4	MU- MIMO- AP_4	Combinación OFDMA-MU- MIMO-AP_4	Combinación OFDMA-MU- MIMO-AP_4
Rendimiento	Pérdidas	Rendimiento	Pérdidas	Rendimiento	Pérdidas
33.8983	96	12.2605	96	33.8983	96
32.6271	99	12.2605	99	32.6271	99
28.3998	102	12.2605	102	28.3998	102
18.8559	105	12.2605	105	18.8559	105
OFDMA- AP_5	OFDMA- AP_5	MU-MIMO- AP_5	MU- MIMO- AP_5	Combinación OFDMA-MU- MIMO-AP_5	Combinación OFDMA-MU- MIMO-AP_5
Rendimiento	Pérdidas	Rendimiento	Pérdidas	Rendimiento	Pérdidas
21.3618	96	21.3618	96	21.3618	96
21.3618	99	21.3618	99	21.3618	99
21.3618	102	21.3618	102	21.3618	102
21.3618	105	21.3618	105	21.3618	105

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de resultados se utiliza la estadística de chi Cuadrado el cual permite realizar pruebas de hipótesis referidas a distribuciones de frecuencias.

4.1. Resultados obtenidos

En Tabla 4 se presenta los resultados obtenidos

Tabla 4. Presentación de resultados variables dependiente e independiente

Variable Independiente ↓	Variable Dependiente → Evaluación del rendimiento de despliegues WLAN en escenarios con tráfico de red elevado														
	64					128					255				
Análisis y simulación del estándar 802.11 ax	INDICADOR														
	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
802.11 ax	OFDMA	Paquetes perdidos			x				x					x	
		Rendimiento de la red					x			x					
	MU-MIMO	Paquetes perdidos			x				x					x	
		Rendimiento de la red				x				x					x
	OFDMA y MU-MIMO	Paquetes perdidos			x				x					x	
		Rendimiento de la red					x				x				
TOTAL 802.11ax			3	1	2			3	3				3	1	2

La definición de la codificación en la Tabla 4 estuvo a cargo a una calificación cualitativa, los valores se describen a continuación:

- No existe (NE) tendrá el valor de 0
- Malo (M) tendrá el valor de 1
- Bueno (B) tendrá el valor de 2
- Muy bueno (MB) tendrá el valor de 3
- Excelente (E) tendrá el valor de 4

En la Tabla 4 se visualiza las frecuencias obtenidas en la investigación.

Tabla 5. Valores de contingencia de 4x3 con las frecuencias observadas

	802.11 ax			Total
	64	128	255	
Rendimiento óptimo	3	3	3	9
Rendimiento	3	3	3	9
Nulo rendimiento	0	0	0	0
Total	6	6	6	18

En la Tabla 6 se visualiza las frecuencias, las cuales constituyen los resultados esperados para observar si las variables no estuvieran concatenadas. El chi cuadrado parte del supuesto de “no relación entre las variables” y se analiza si es verdadero o no, comparando si las frecuencias obtenidas son diferentes de lo que se esperaba en caso de ausencia de correlación.

Tabla 6. Tabla de frecuencias esperadas

	802.11 ax			Total
	64	128	255	
Rendimiento óptimo	1,50	1,50	1,50	4,50
Rendimiento medio	1,50	1,50	1,50	4,50
Nulo rendimiento	0	0	0	0
Total	3	3	3	9

El valor de χ^2 , que se observa en la tabla 7.

Tabla 7. Cálculo de χ^2

	802.11 ax		
	64	128	255
Rendimiento óptimo	2	2	2
Rendimiento medio	2	2	2
Nulo rendimiento	0	0	0
Total de la tabla de χ^2:9.4877			

Grado de libertad: 4

Nivel de confianza: 14,8602

Análisis de Chi-Cuadrado

χ^2 calculado=14.8602 X tabla=9.4877

14,8602 >9.4877

Se puede concluir que si permite la hipótesis H1 la cual es “El análisis y la simulación del estándar 802.11ax permitirán la evaluación del rendimiento de despliegues WLAN en escenarios con tráfico de red elevado.”

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Las tecnologías plantean requisitos desafiantes en los sistemas de comunicación inalámbrica de próxima generación y deben ser abordados rápidamente para asegurar una implementación exitosa. En el futuro la demanda de conexión a internet se va incrementar de forma significativa, esto afecta en la calidad de servicio por lo que es necesario buscar soluciones alternativas. 802.11 ax o Wi-Fi 6 es una de estas soluciones que permite satisfacer las necesidades de la banda sin licencia.
- El objetivo del estándar 802.11 ax es la implementación Wi-Fi, el cual posee un rendimiento óptimo para el usuario. En este contexto, la innovación consiste en la integración del OFDMA incluyendo las nuevas funcionalidades en la capa física, así mismo, la extensión de MU-MIMO contiene nuevos mecanismos flexibles que mitigan la interferencia de las redes.
- El estándar 802.11 ax mejora el uso la red, este se refleja en varios parámetros como: capacidad, eficiencia, rendimiento, calidad de servicio y latencia reducida. Por lo anterior, es evidente que el 802.11 ax es una versión mejorada del estándar 802.11 ac. Esto se ha comprobado a lo largo de la investigación, debido a que, se observó una escalabilidad y flexibilidad propias de las redes actuales, además estas promueven el desarrollo de aplicaciones para las futuras generaciones.
- En el escenario de prueba se calculó algunos parámetros importantes de la red, estos son: rendimiento, pérdida de paquete, ráfaga de paquetes, número de AP, ancho de banda y una gran cantidad de usuarios para demostrar el tráfico elevado. De esto se constató que, el rendimiento de enlace disminuye, en el AP, cuando se emplea la multiplexación OFDMA.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda tener una buena infraestructura para los diferentes experimentos.
- Es recomendable verificar los últimos avances del estándar 802.11 ax conjuntamente con la tecnología de la transmisión de datos por AP.
- Se encuentran algunas limitantes a nivel de información técnica al tratarse de un estándar de comunicación actual y en constante progreso, haciendo reducida la información de conceptos propios de esta tecnología.
- Se recomienda utilizar la versión de Matlab R2021a por el motivo que ya están incluidas configuraciones del estándar 802.11ax aquellas que serán una ayuda al momento de analizar un tráfico de red elevado.
- Tener en cuenta que se necesita un grado de conocimiento de lógica de programación para realizar métodos que sirvan como base para automatizar procesos en la configuración de la simulación.
- El presente trabajo es de utilidad a las futuras generaciones que necesiten información sobre el tema propuesto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Narváez Sandra, “Estudio de QoS en el estándar IEEE 802.11e y alternativas de seguridad para las redes locales inalámbricas aplicado en la WLAN de la Universidad Politécnica del Carchi.,” Quito, 2015.
- [2] López Darío, “Evaluación del estándar IEE 802.11AC con tecnología Mu-MIMO en comparación al estándar de fibra óptica en redes de transporte de datos,” Ambato.
- [3] Ortíz Orlando, “Funcionamiento de la red inalámbrica del Auditorio de la Universidad Nacional de Chimborazo,” 2020.
- [4] Torres Juan José Yunquera, “Familia IEEE 802.11.”
- [5] Joskowicz José, “Voz Vídeo y Telefonía sobre IP,” Montevideo-Uruguay, 2013.
- [6] Angela V, Granizo R, Alex A, and Tacuri U, “Guía referencial para el manejo de QoS en redes WLAN priorizando tráfico”.
- [7] “Comparación entre el Estándar IEE 808.11 ax y el estándar IEEE 802.11 ac para determinar la evolución del rendimiento de las Redes de Área Local Inálambricas (WLAN),” *Especialización en Teleinformática - Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, pp. 1–11, 2020.
- [8] Pugna Danny Alejandro Ortiz, “Análisis comparativo del desempeño del estándar IEEE 802.11 ac respecto al IEEE 802.11,” Apr. 2015.
- [9] Fernando Palacios Meléndez Edwin, “Comparativa de rendimiento de estándares,” Mar. 2018.
- [10] Zegarra Helen Stephany Zegarra, “Extensión del protocolo IEEE 802.11 en modo PCF,” vol. 05, 2019.
- [11] Bellalta Boris, “IEEE 802.11ax: High-Efficiency WLANs,” 2016.
- [12] Naik G., Bhattarai S., and Park J., “Performance Analysis of Uplink Multi-User OFDMA in IEEE 802.11ax,” *Bradley Department of Electrical and Computer Engineering (IEEE)*, pp. 6–6, 2018.
- [13] Mosquera Chica Álvaro Luis, “Estudio y analisis de las nuevas tecnologías 802.11ax y 5G para el desarrollo del Internet de las Cosas,” Guayaquil-Ecuador.
- [14] Cisco, “IEEE 802.11ax: la sexta generación de documentos técnicos sobre Wi-Fi,” Apr. 03, 2020.
- [15] Soler J. Salazar, “TechPedia,” Jul. 07, 2020.
- [16] Cisco, “IEEE 802.11ax: la sexta generación de documentos técnicos sobre Wi-Fi,” Apr. 03, 2020.

- [17] Salazar Cecilia and del Castillo Santiago, *Fundamentos básicos de estadística*. 2018.
- [18] Muhammad Siraj, Zhao Jiamiao, and Refai Hazem, “An Empirical Analysis of IEEE 802.11ax,” *Conference: International Conference on Communications, Signal Processing and their Applications 2020*, pp. 1–6, 2020.
- [19] Gaurang Naik, Sudeep Bhattarai, and Jung Min, “Performance Analysis of Uplink Multi-User OFDMA,” pp. 1–6, 2018.
- [20] González Jaime, “Comparación entre el Estándar IEEE 802.11 ax y el estándar IEEE 802.11 ac para determinar la evolución del rendimiento de las Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN),” *Especialización en Teleinformática - Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, pp. 1–6, 2020.
- [21] Nurchis M. and Bellalta B., “Target Wake Time: Scheduled Access in IEEE 802.11 ax WLANs,” *IEEE Wirel. Commun.*, pp. 142–150, Apr. 2019.
- [22] R & S International, “Medidas de 802.11ax | Medidas de WLAN / Wi-Fi,” Mar. 2020.
- [23] Khorov E. and Kiryanov A., “A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs,” *IEEE Commun Surv. Tutor.*, pp. 197–216, 2019.
- [24] Mosquera Alvaro, “Estudio y Análisis de las nuevas tecnologías 802.11ax y 5G para el desarrollo del internet de las cosas,” Guayaquil-Ecuador, 2019.
- [25] Vargas Cordero Zoila Rosa, “La investigación aplicada,” *Revista Educación*, pp. 155–165, 2019.
- [26] Murillo Javier, “Cloudfront,” 2011.
- [27] Radicelli Ciro, “Métodos, técnicas y tipos de investigación,” Riobamba-Ecuador, 2017.
- [28] Inc. The MathWoks, “Asignación de RU,” Apr. 20, 2021.

ANEXOS

ANEXO 1

Datos con 64 usuarios, 5 AP con los tres métodos de transmisión.

	1	2	3	4	5	6
1	'OFDMA -AP_1'	'OFDMA -AP_1'	'MUMIMO -AP_1'	'MUMIMO -AP_1'	'MIXED -AP_1'	'MIXED -AP_1'
2	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
3	37.5587	96	55.1724	96	37.5587	96
4	37.5587	99	55.1724	99	37.5587	99
5	37.5587	102	55.1724	102	37.5587	102
6	37.5587	105	55.1724	105	37.5587	105
7	'OFDMA -AP_2'	'OFDMA -AP_2'	'MUMIMO -AP_2'	'MUMIMO -AP_2'	'MIXED -AP_2'	'MIXED -AP_2'
8	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
9	16.9492	96	5.8997	96	16.9492	96
10	16.9492	99	5.8997	99	16.9492	99
11	14.4068	102	4.6460	102	14.4068	102
12	8.0508	105	4.1298	105	8.0508	105
13	'OFDMA -AP_3'	'OFDMA -AP_3'	'MUMIMO -AP_3'	'MUMIMO -AP_3'	'MIXED -AP_3'	'MIXED -AP_3'
14	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
15	16.9492	96	6.1303	96	16.9492	96
16	16.9492	99	6.1303	99	16.9492	99
17	14.4068	102	6.1303	102	14.4068	102
18	8.0508	105	6.1303	105	8.0508	105
19	'OFDMA -AP_4'	'OFDMA -AP_4'	'MUMIMO -AP_4'	'MUMIMO -AP_4'	'MIXED -AP_4'	'MIXED -AP_4'
20	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
21	33.8983	96	12.2605	96	33.8983	96
22	32.6271	99	12.2605	99	32.6271	99
23	28.3898	102	12.2605	102	28.3898	102
24	18.8559	105	12.2605	105	18.8559	105
25	'OFDMA -AP_5'	'OFDMA -AP_5'	'MUMIMO -AP_5'	'MUMIMO -AP_5'	'MIXED -AP_5'	'MIXED -AP_5'
26	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
27	21.3618	96	21.3618	96	21.3618	96
28	21.3618	99	21.3618	99	21.3618	99
29	21.3618	102	21.3618	102	21.3618	102
30	21.3618	105	21.3618	105	21.3618	105

Datos con 128 usuarios, 5 AP con los tres métodos de transmisión.

	1	2	3	4	5	6
1	'OFDMA -AP_1'	'OFDMA -AP_1'	'MUMIMO -AP_1'	'MUMIMO -AP_1'	'MIXED -AP_1'	'MIXED -AP_1'
2	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
3	41.4508	96	86.2637	96	41.4508	96
4	41.4508	99	81.3187	99	41.4508	99
5	41.4508	102	66.7582	102	41.4508	102
6	41.4508	105	49.1758	105	41.4508	105
7	'OFDMA -AP_2'	'OFDMA -AP_2'	'MUMIMO -AP_2'	'MUMIMO -AP_2'	'MIXED -AP_2'	'MIXED -AP_2'
8	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
9	11.5397	96	6.1303	96	11.5397	96
10	11.5397	99	6.1303	99	11.5397	99
11	10.2685	102	6.1303	102	10.2685	102
12	7.0906	105	6.1303	105	7.0906	105
13	'OFDMA -AP_3'	'OFDMA -AP_3'	'MUMIMO -AP_3'	'MUMIMO -AP_3'	'MIXED -AP_3'	'MIXED -AP_3'
14	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
15	12.2605	96	12.2605	96	12.2605	96
16	12.2605	99	12.2605	99	12.2605	99
17	12.2605	102	12.2605	102	12.2605	102
18	12.2605	105	12.2605	105	12.2605	105
19	'OFDMA -AP_4'	'OFDMA -AP_4'	'MUMIMO -AP_4'	'MUMIMO -AP_4'	'MIXED -AP_4'	'MIXED -AP_4'
20	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
21	23.7037	96	23.7037	96	23.7037	96
22	23.7037	99	23.7037	99	23.7037	99
23	23.7037	102	23.7037	102	23.7037	102
24	23.7037	105	23.7037	105	23.7037	105
25	'OFDMA -AP_5'	'OFDMA -AP_5'	'MUMIMO -AP_5'	'MUMIMO -AP_5'	'MIXED -AP_5'	'MIXED -AP_5'
26	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
27	21.3618	96	21.3618	96	21.3618	96
28	21.3618	99	21.3618	99	21.3618	99
29	21.3618	102	21.3618	102	21.3618	102
30	21.3618	105	21.3618	105	21.3618	105

Datos con 255 usuarios, 5 AP con los tres métodos de transmisión.

	1	2	3	4	5	6
1	'OFDMA -AP_1'	'OFDMA -AP_1'	'MUMIMO -AP_1'	'MUMIMO -AP_1'	'MIXED -AP_1'	'MIXED -AP_1'
2	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
3	44.7552	96	44.7552	96	44.7552	96
4	44.7552	99	44.7552	99	44.7552	99
5	44.7552	102	44.7552	102	44.7552	102
6	44.7552	105	44.7552	105	44.7552	105
7	'OFDMA -AP_2'	'OFDMA -AP_2'	'MUMIMO -AP_2'	'MUMIMO -AP_2'	'MIXED -AP_2'	'MIXED -AP_2'
8	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
9	44.7552	96	44.7552	96	44.7552	96
10	44.7552	99	44.7552	99	44.7552	99
11	44.7552	102	44.7552	102	44.7552	102
12	44.7552	105	44.7552	105	44.7552	105
13	'OFDMA -AP_3'	'OFDMA -AP_3'	'MUMIMO -AP_3'	'MUMIMO -AP_3'	'MIXED -AP_3'	'MIXED -AP_3'
14	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
15	23.7037	96	23.7037	96	23.7037	96
16	23.7037	99	23.7037	99	23.7037	99
17	23.7037	102	23.7037	102	23.7037	102
18	23.7037	105	23.7037	105	23.7037	105
19	'OFDMA -AP_4'	'OFDMA -AP_4'	'MUMIMO -AP_4'	'MUMIMO -AP_4'	'MIXED -AP_4'	'MIXED -AP_4'
20	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
21	11.5397	96	8.8350	96	11.5397	96
22	11.5397	99	8.8350	99	11.5397	99
23	10.2685	102	8.1994	102	10.2685	102
24	7.0906	105	6.6104	105	7.0906	105
25	'OFDMA -AP_5'	'OFDMA -AP_5'	'MUMIMO -AP_5'	'MUMIMO -AP_5'	'MIXED -AP_5'	'MIXED -AP_5'
26	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'	'Rendimiento'	'Pérdidas'
27	12.2605	96	12.2605	96	12.2605	96
28	12.2605	99	12.2605	99	12.2605	99
29	12.2605	102	12.2605	102	12.2605	102
30	12.2605	105	12.2605	105	12.2605	105

ANEXO II

Figura con un AP transmisión Mu-mimo

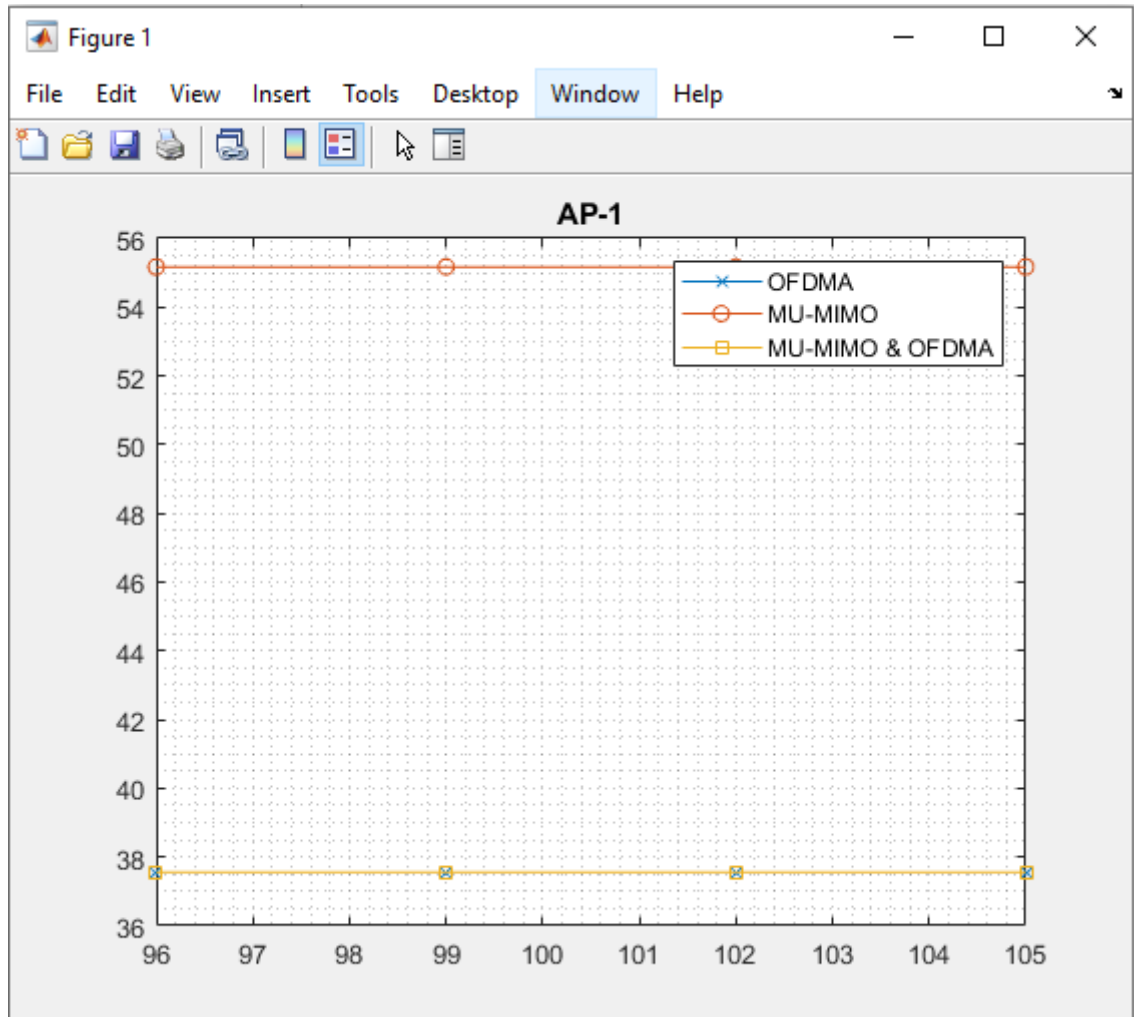


Figura con dos AP

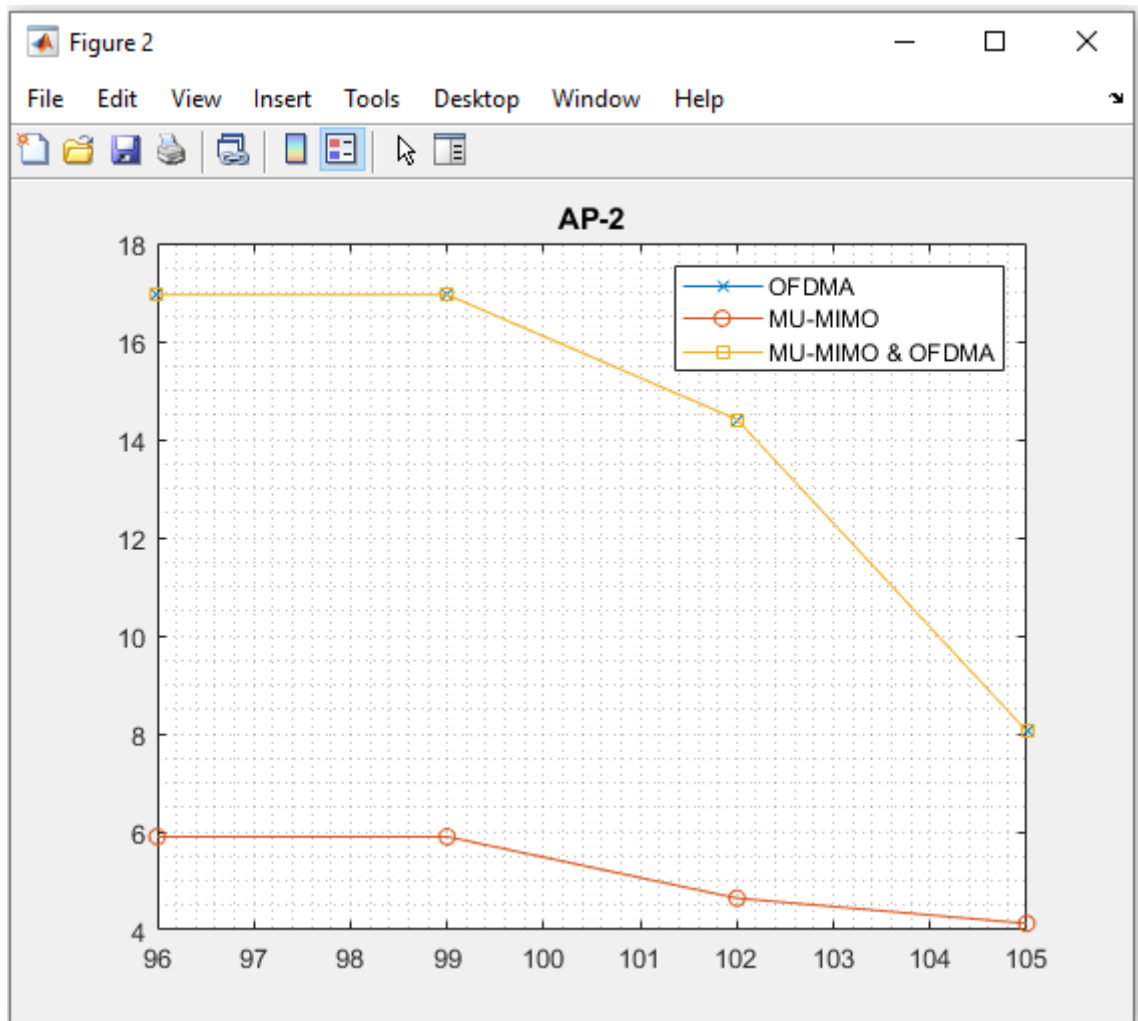


Figura con tres AP

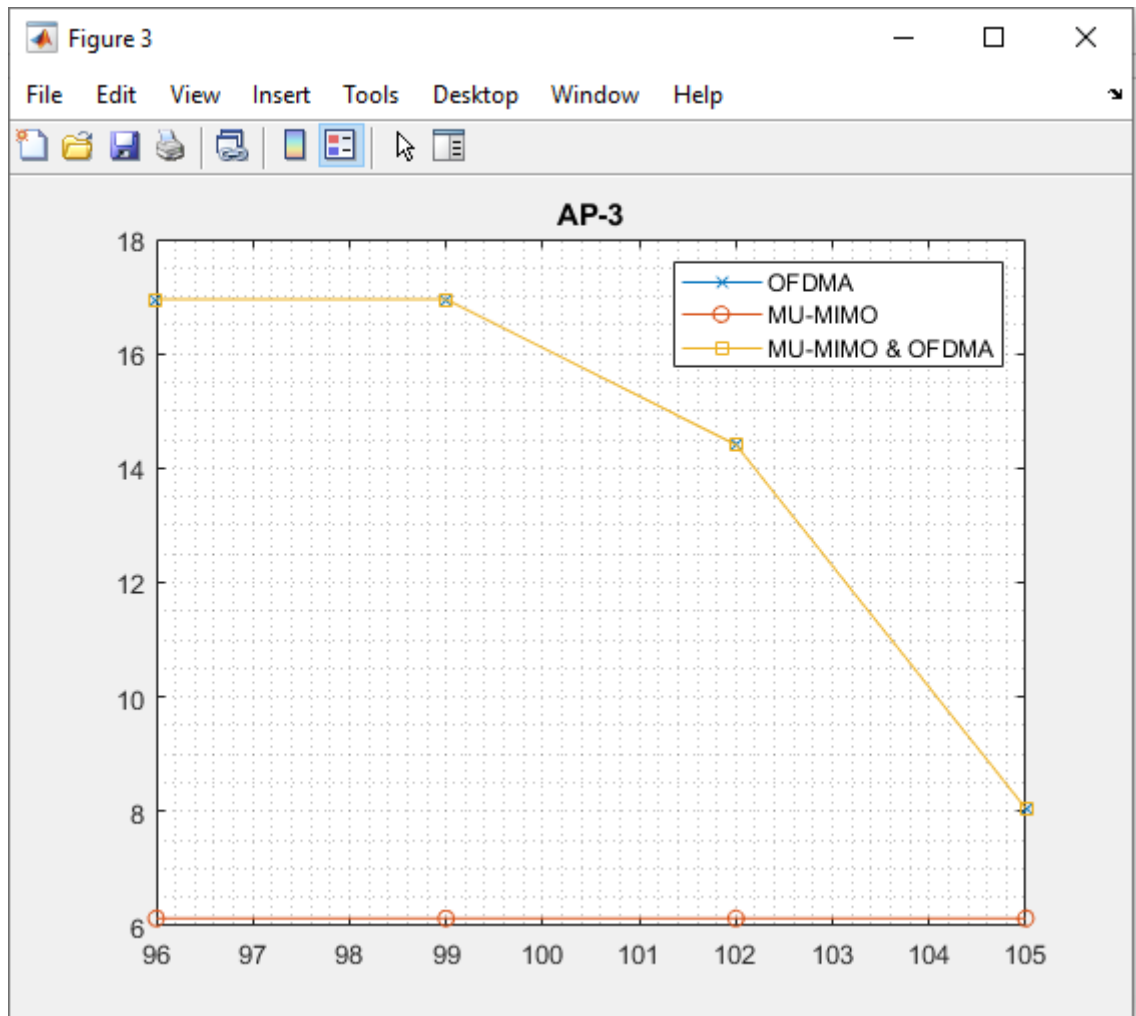


Figura con cuatro AP

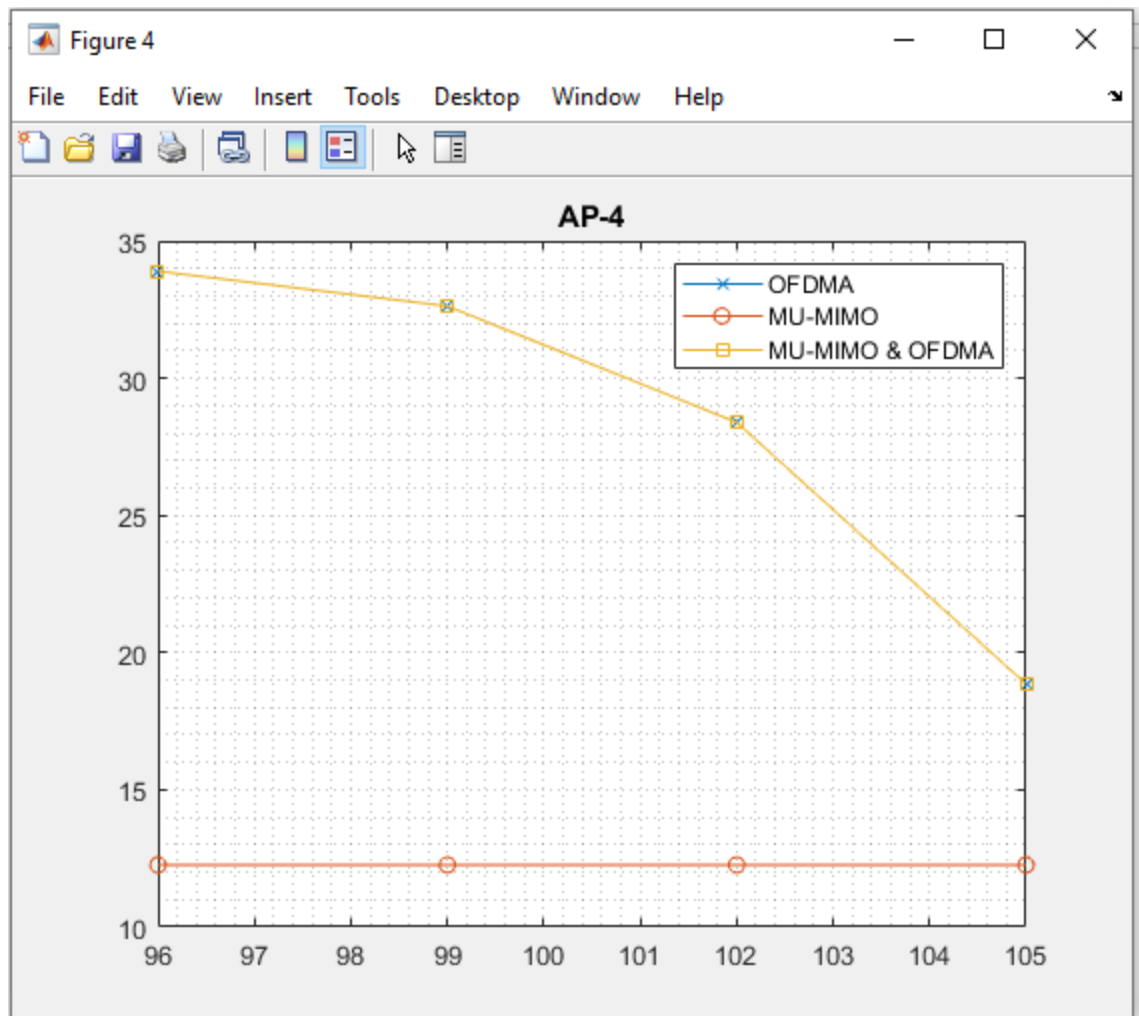
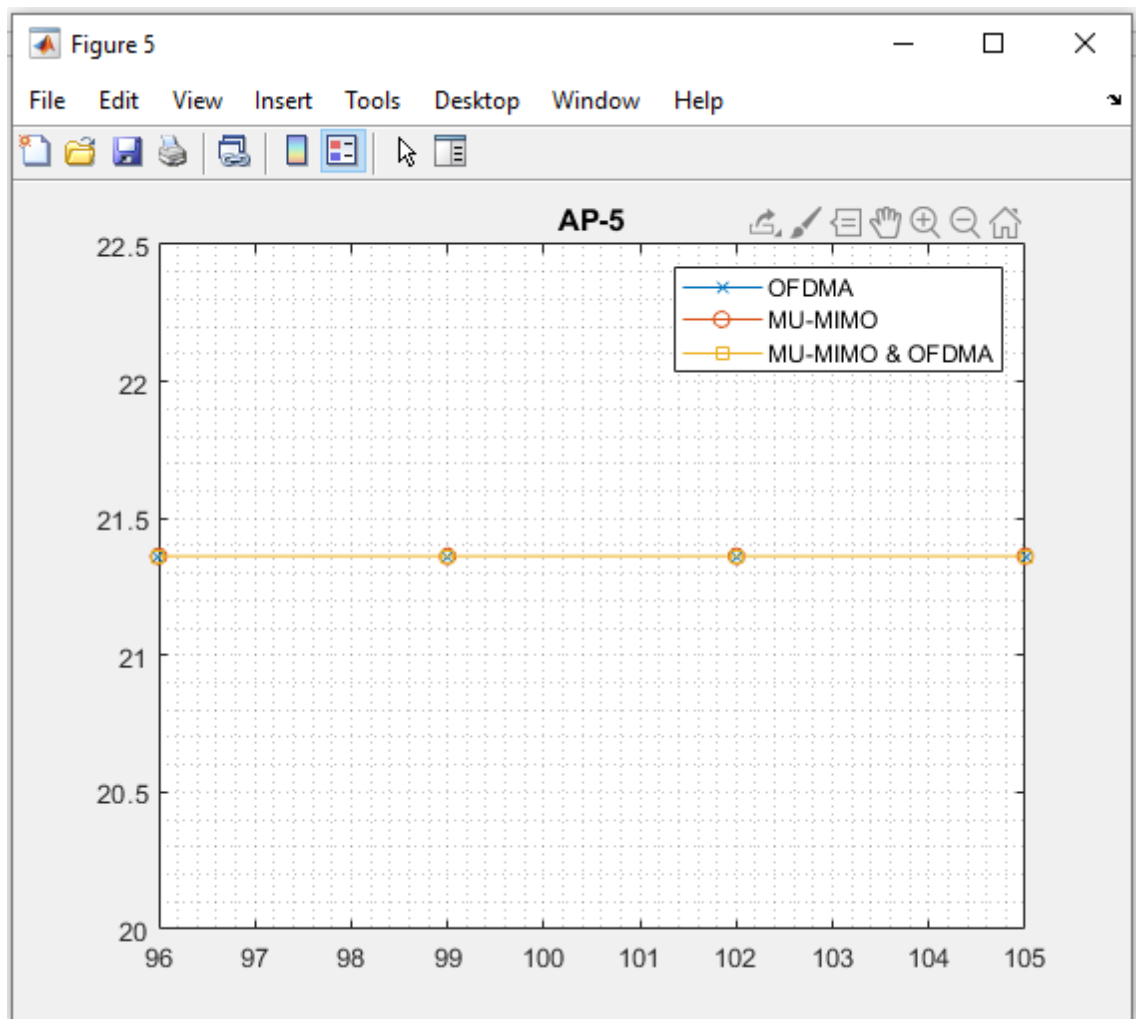


Figura con cinco AP



ANEXO 3

Figura con un AP transmisión MIMO

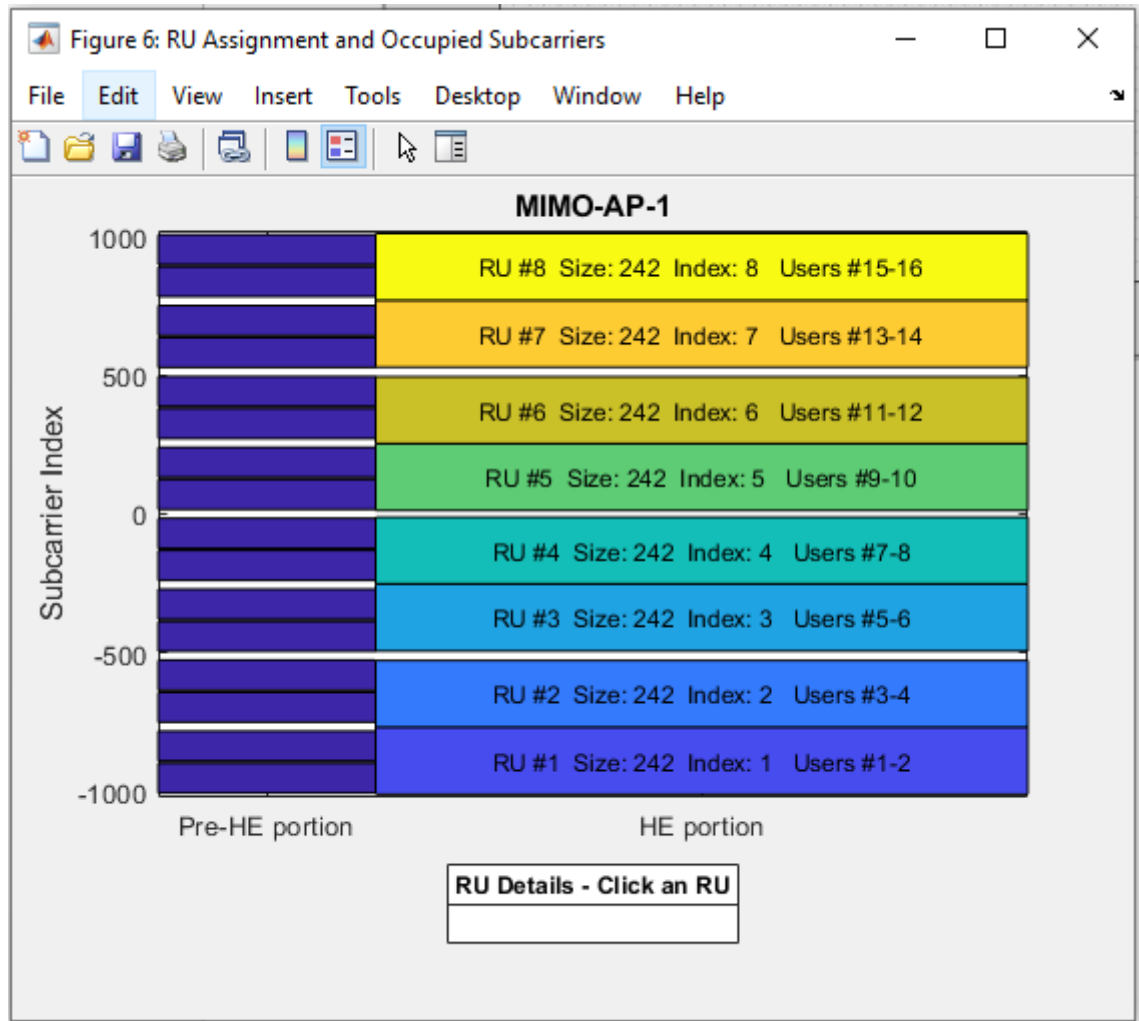


Figura con un AP transmisión OFDMA

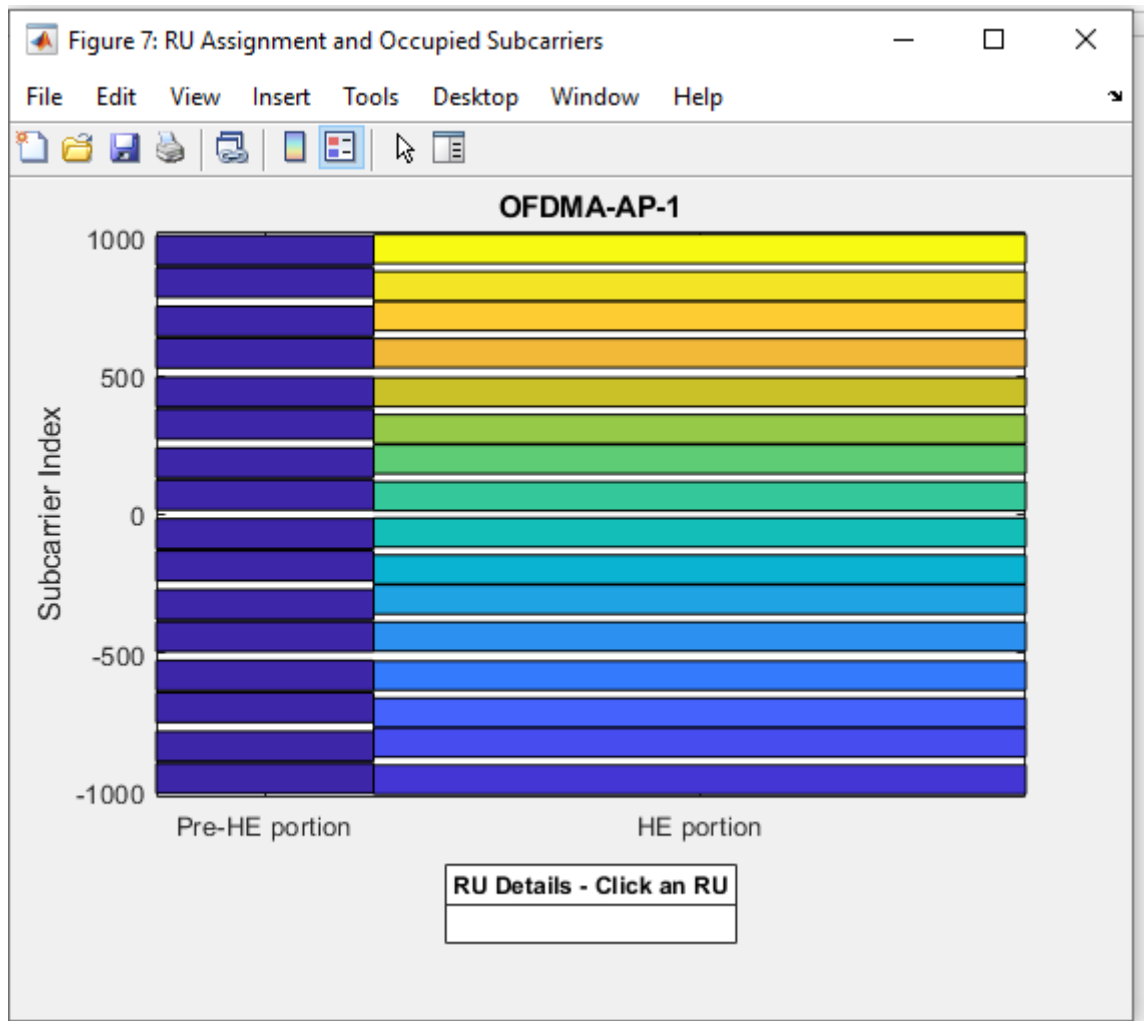


Figura con un AP Transmisión combinación OFDMA –MU-MIMO

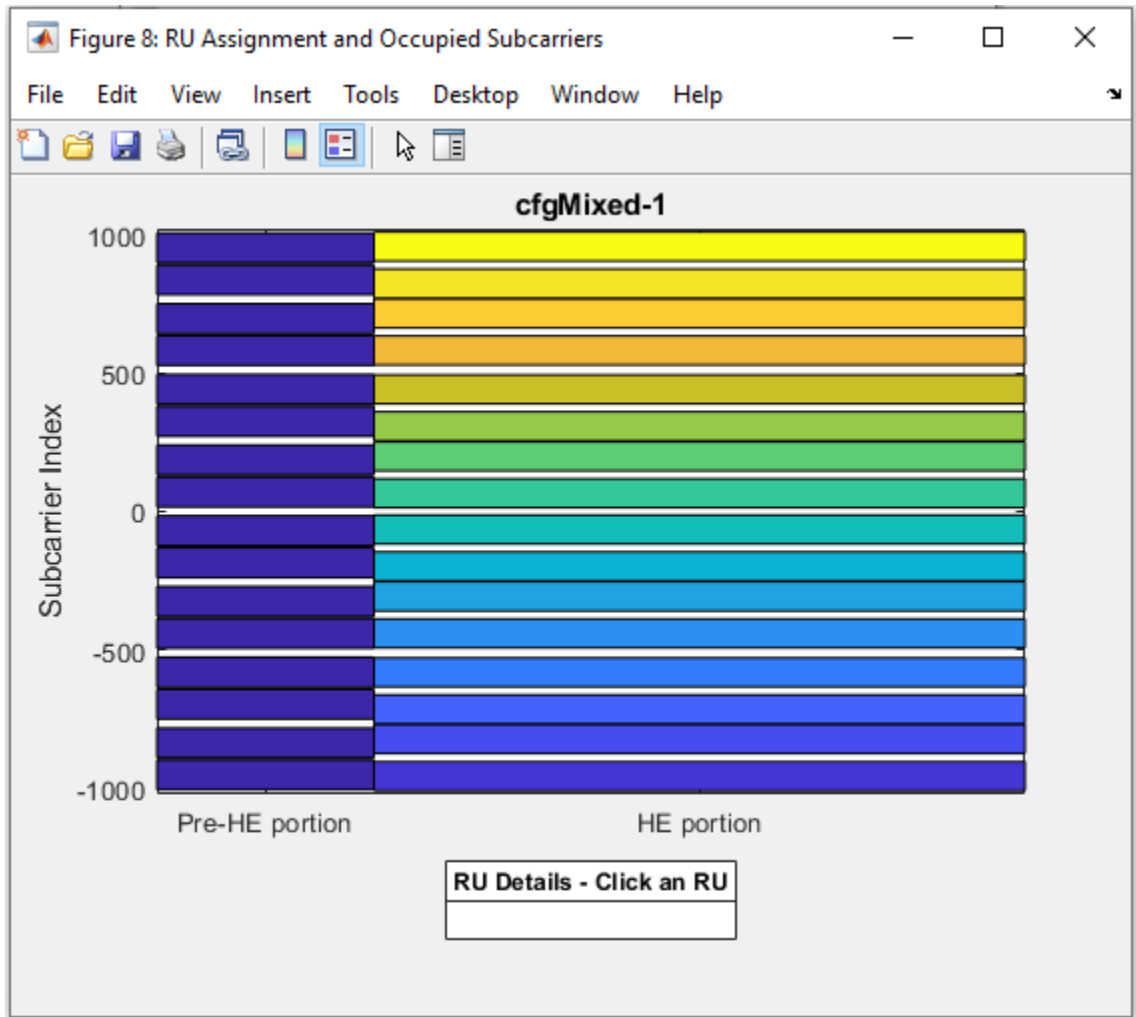


Figura con dos AP transmisión MU-MIMO

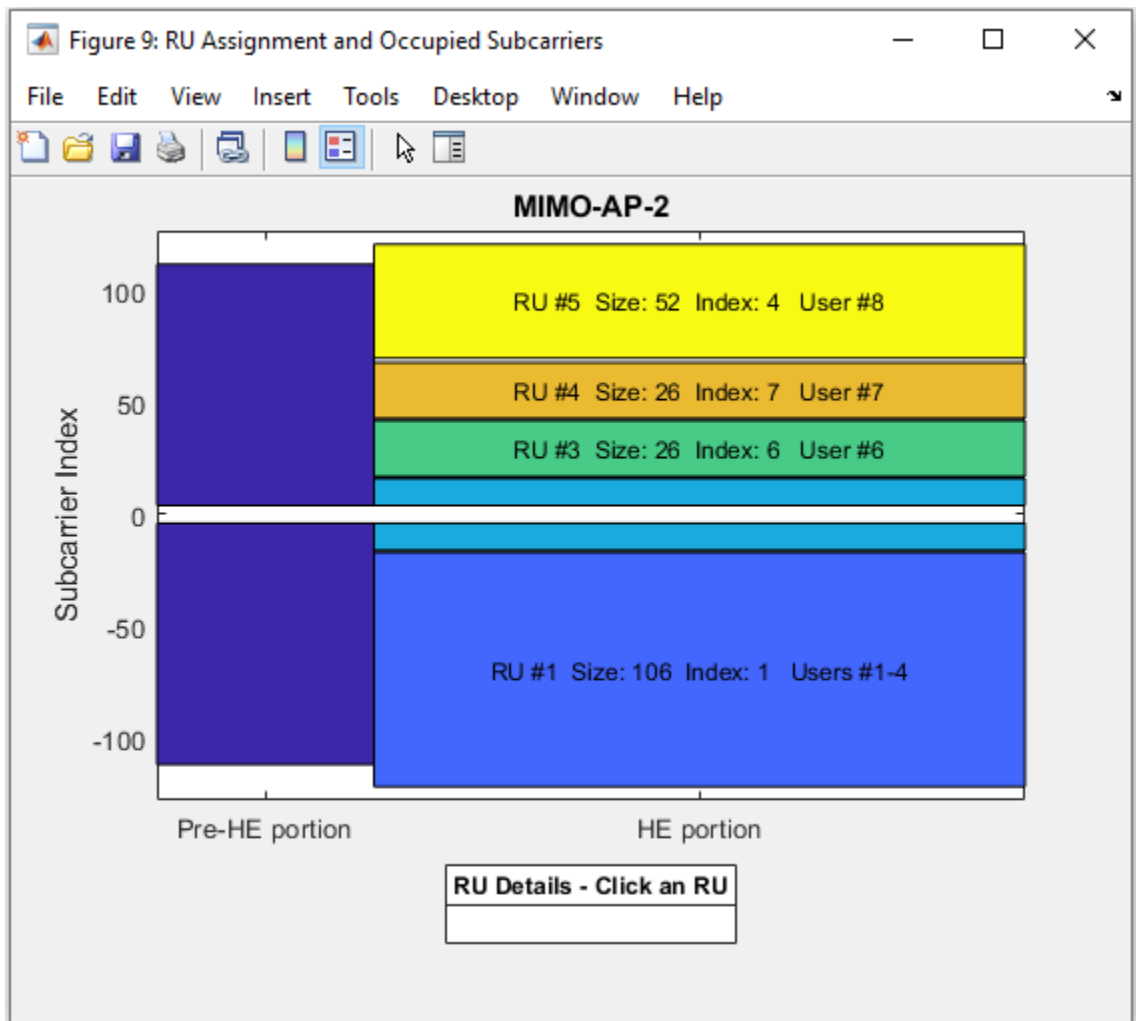


Figura con dos AP transmisión OFDMA

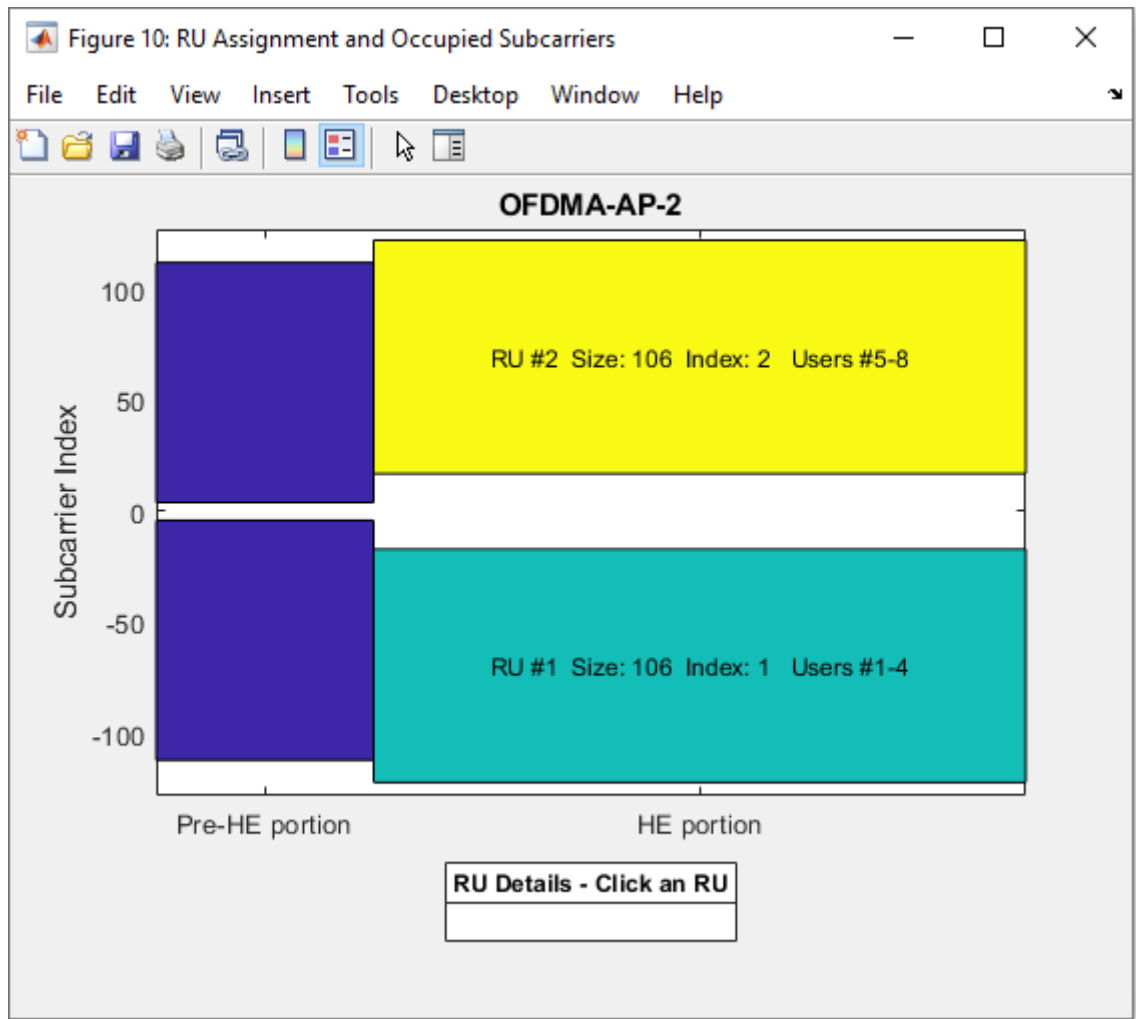


Figura con dos AP Transmisión combinación OFDMA –MU-MIMO

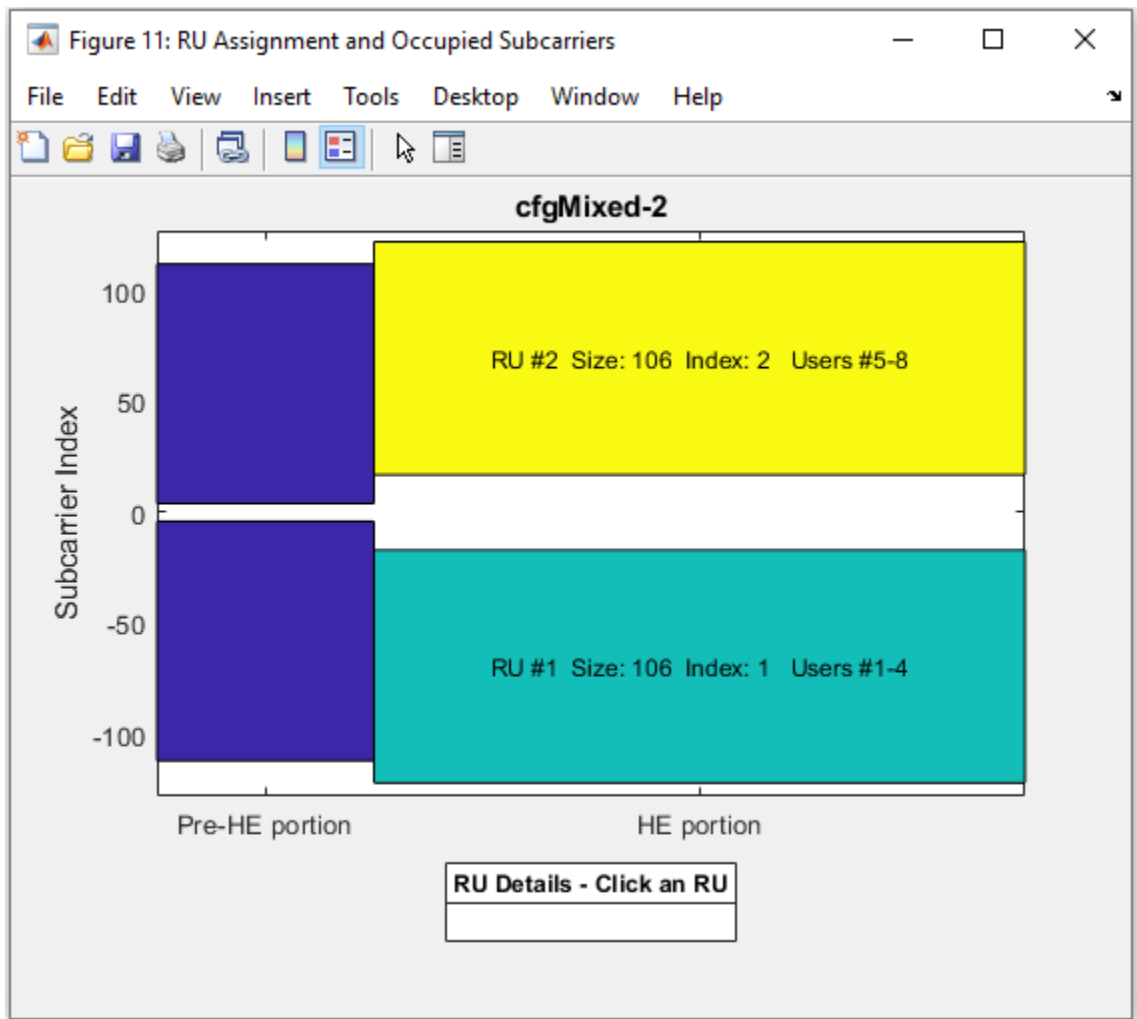


Figura con tres AP transmisión MU-MIMO

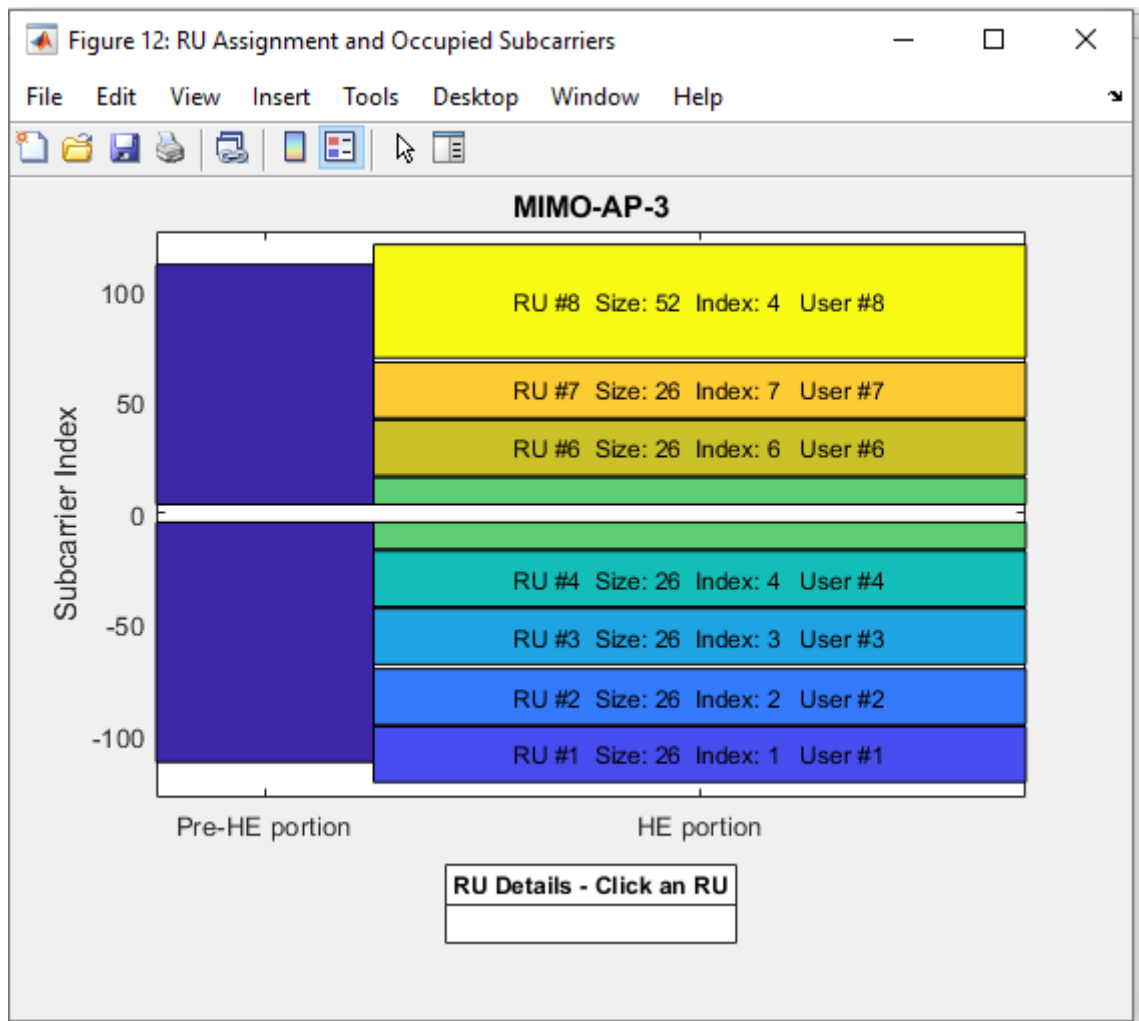


Figura con tres AP transmisión OFDMA

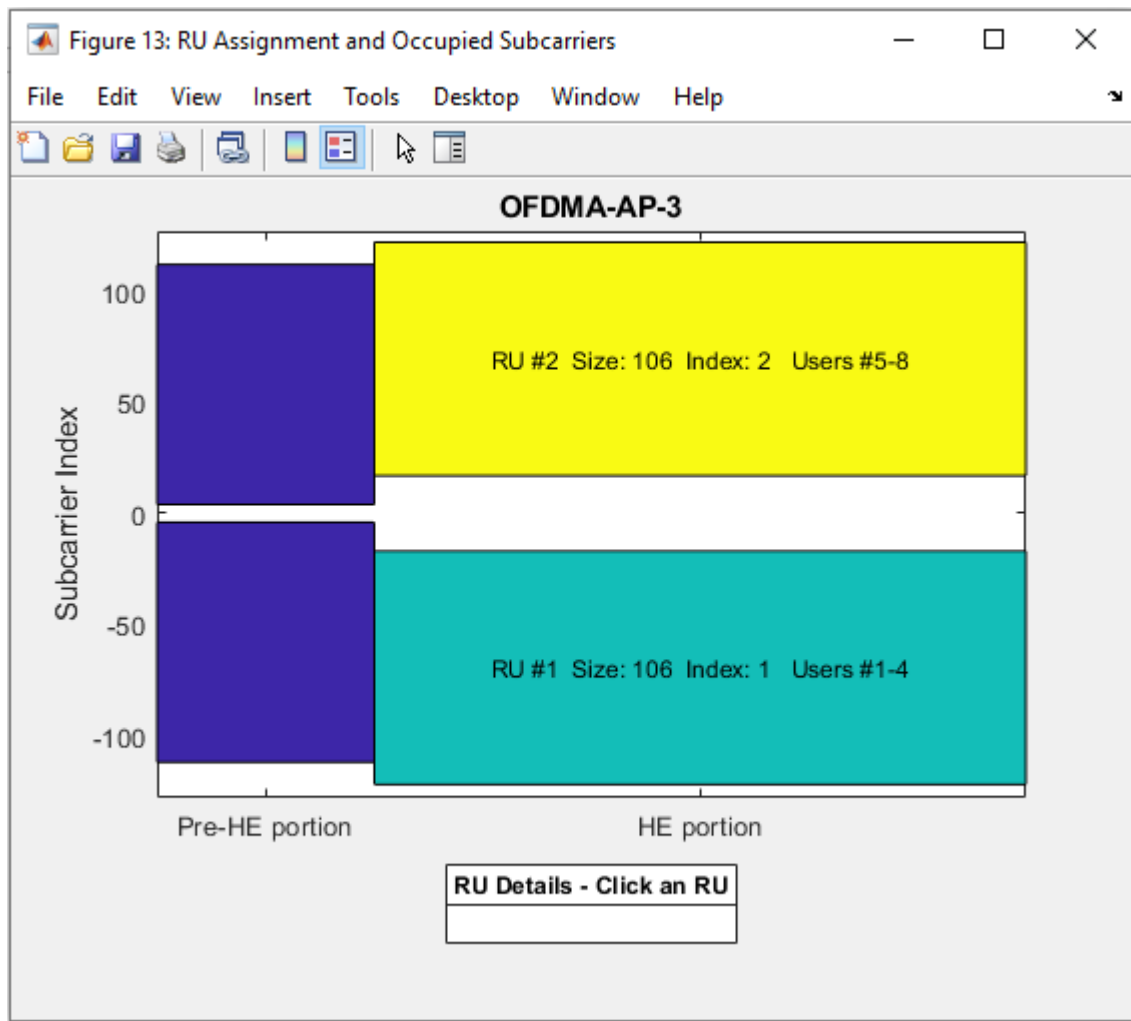


Figura con tres AP Transmisión combinación OFDMA –MU-MIMO

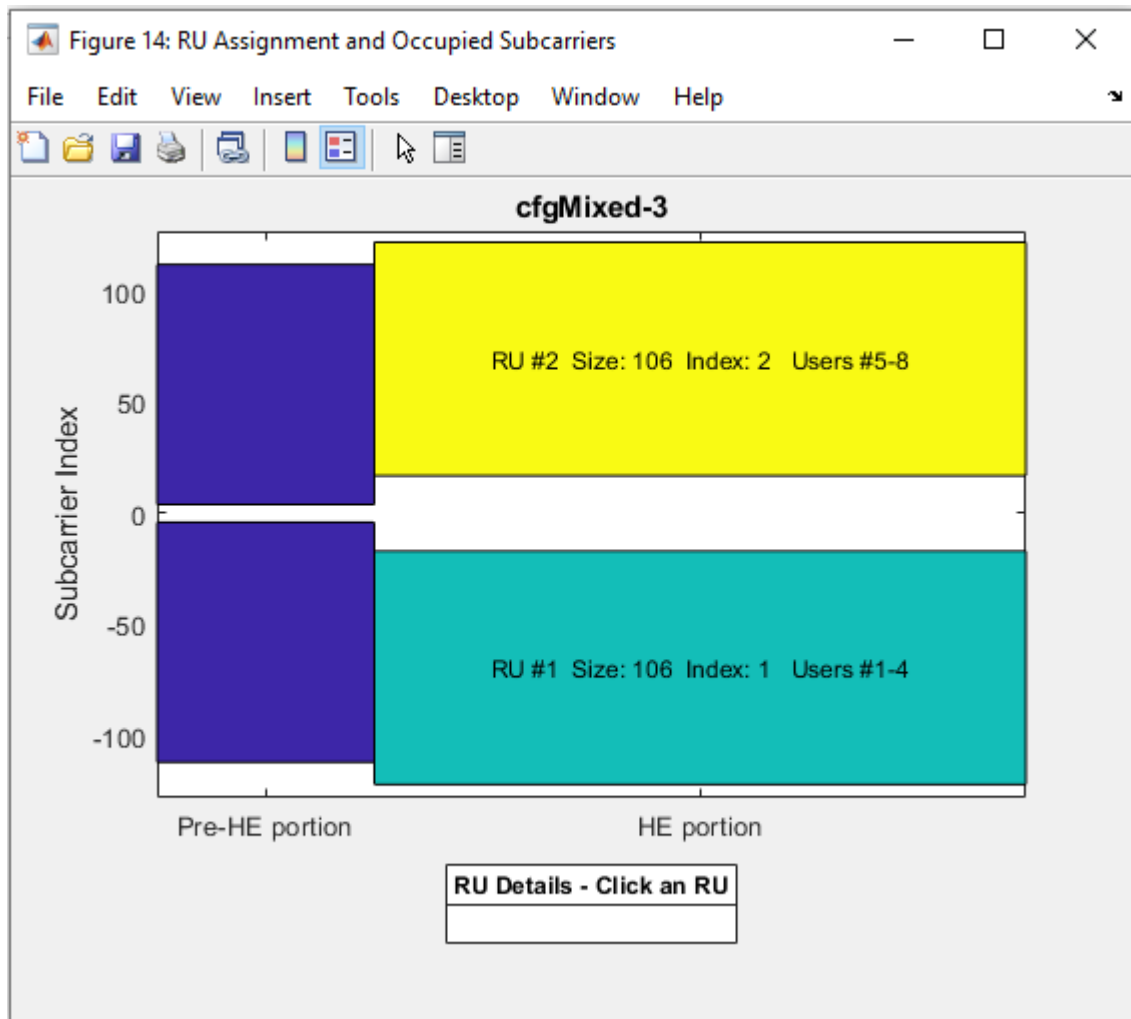


Figura con cuatro AP transmisión–MU-MIMO

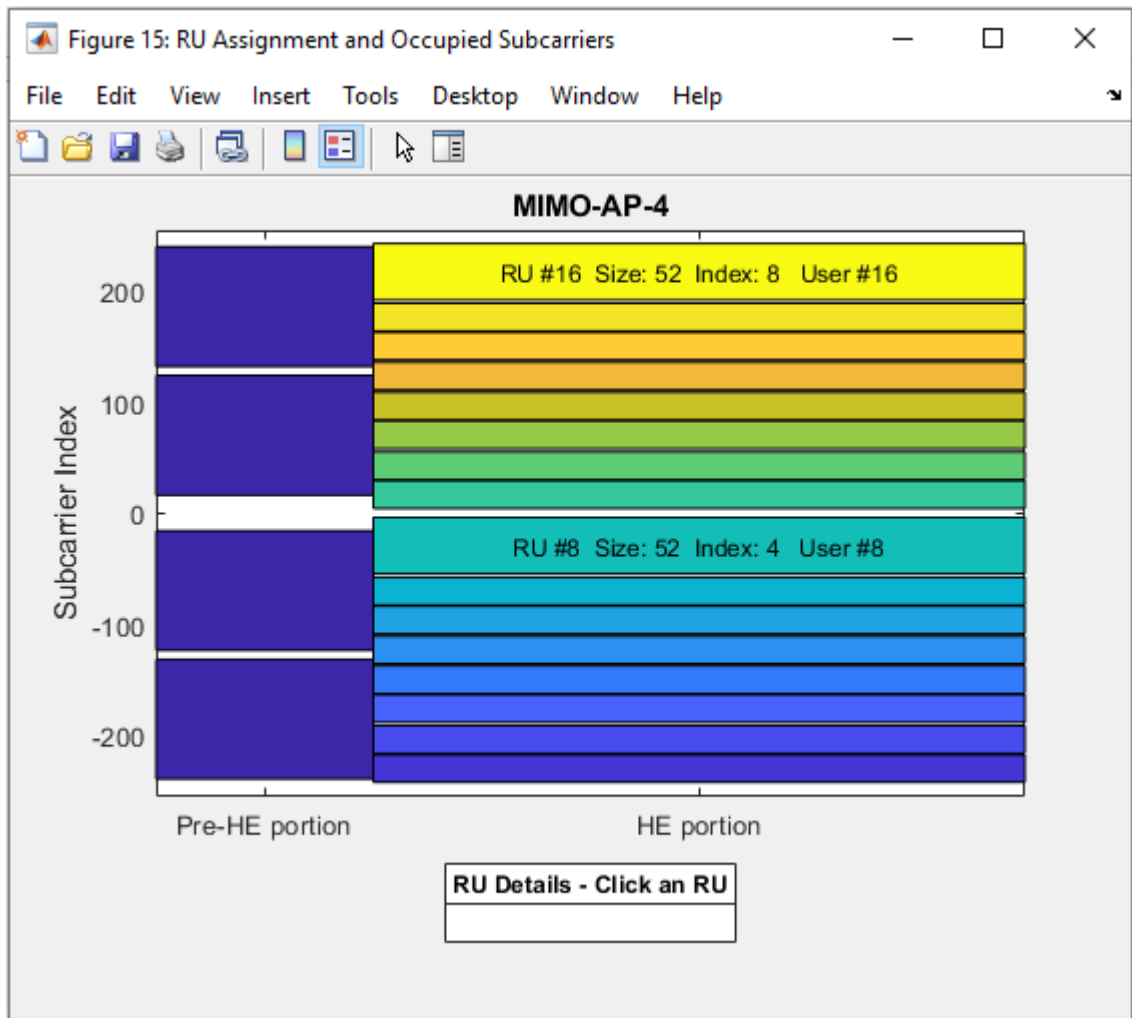


Figura con cuatro AP transmisión OFDMA

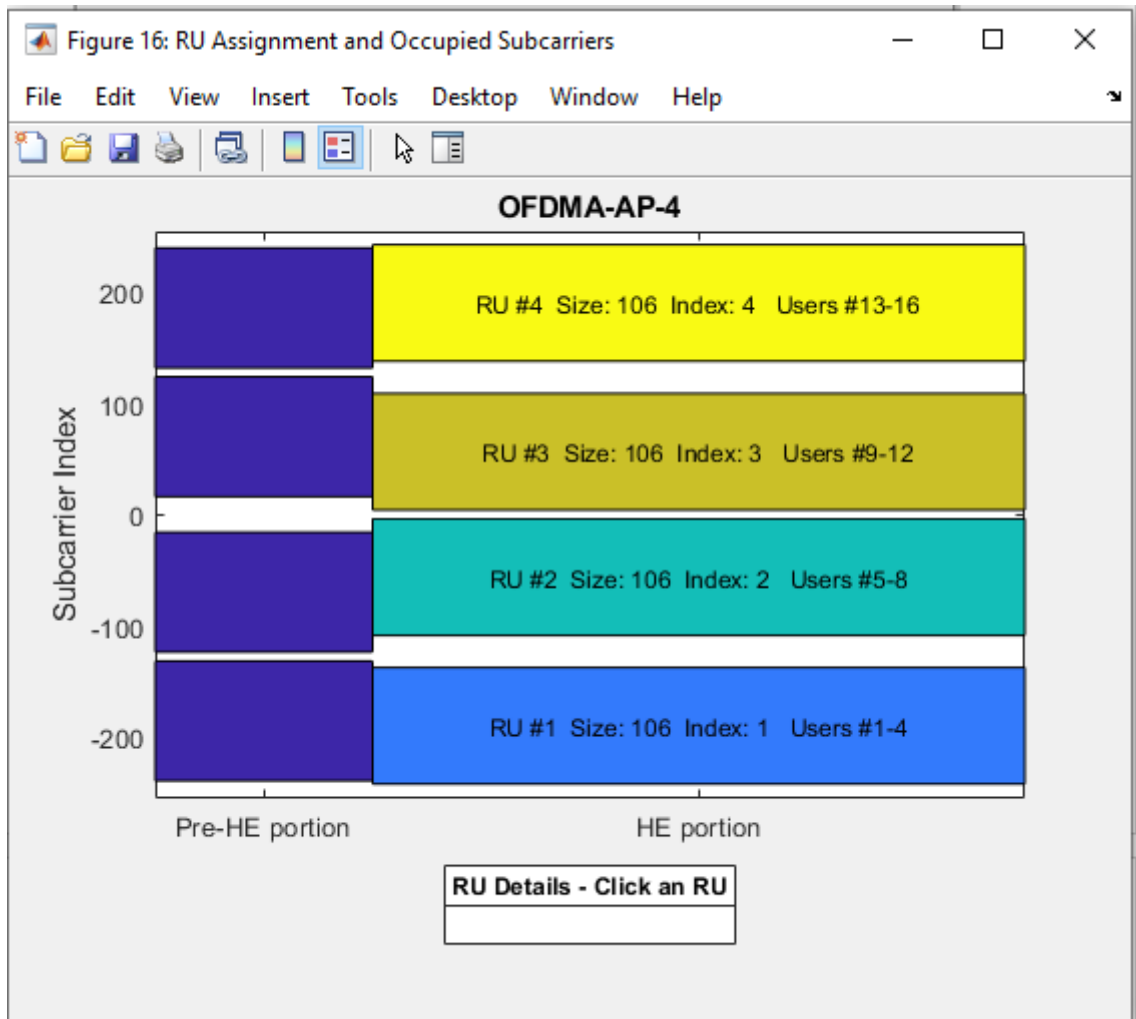


Figura con cuatro AP Transmisión combinación OFDMA –MU-MIMO

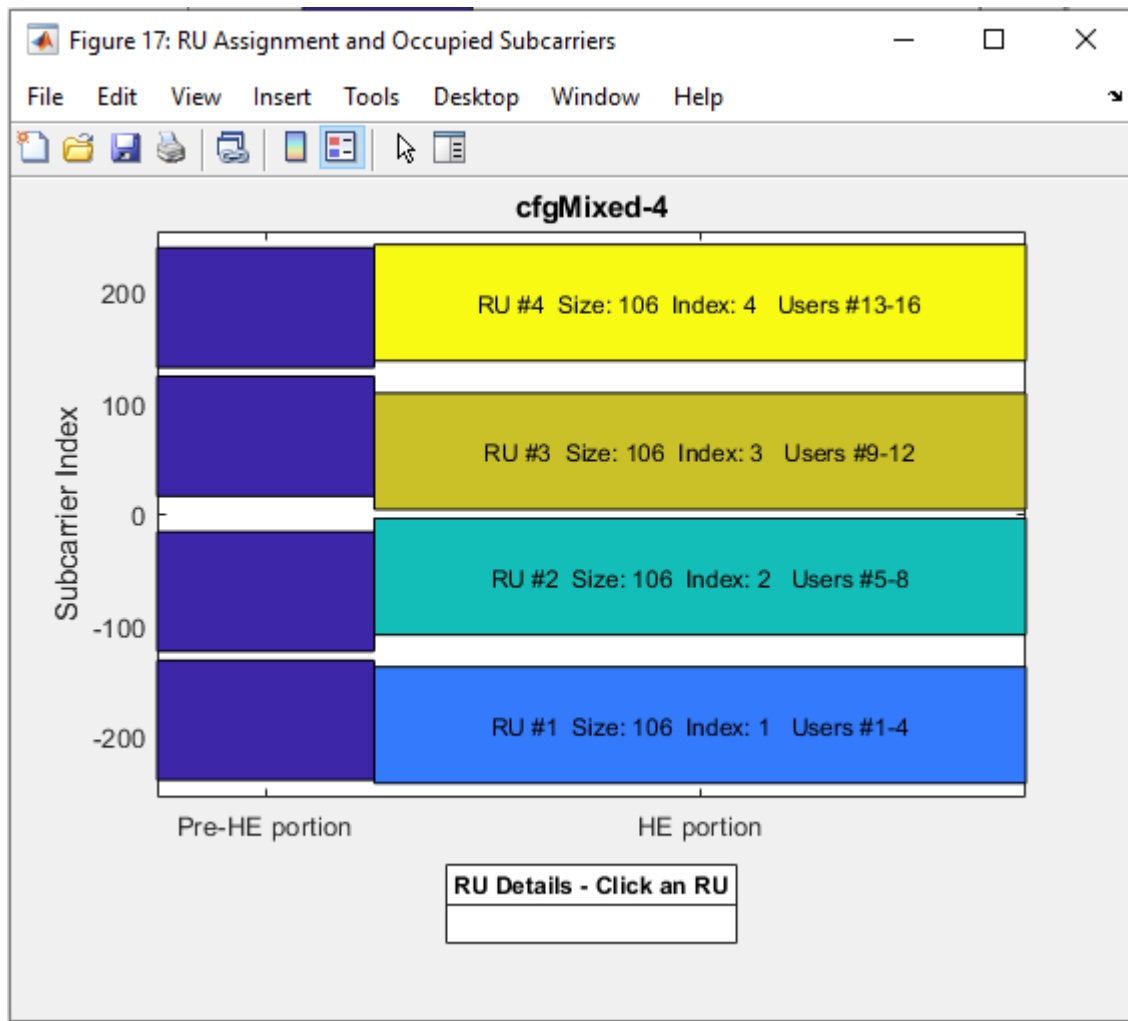


Figura con cinco AP transmisión OFDMA

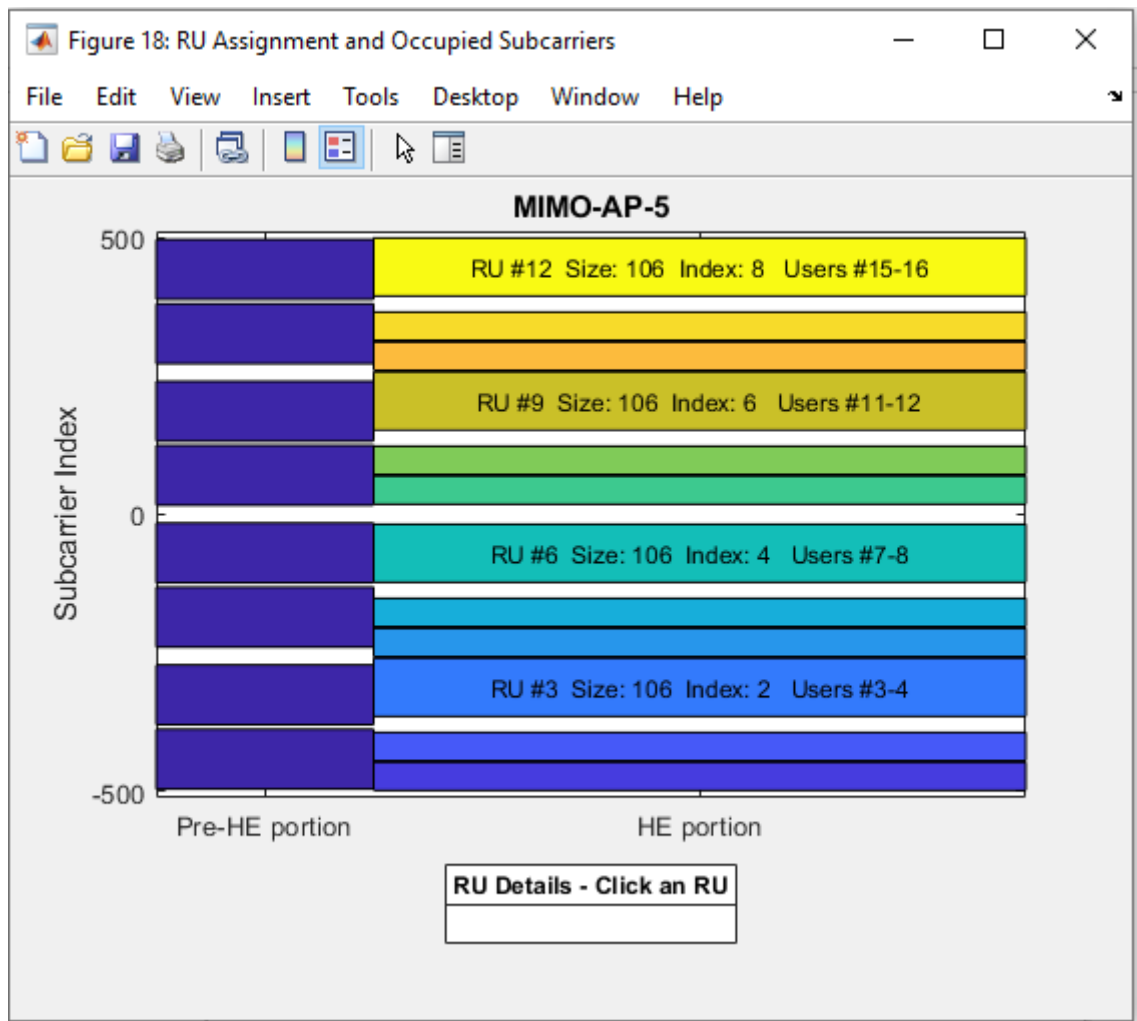


Figura con cinco AP transmisión OFDMA

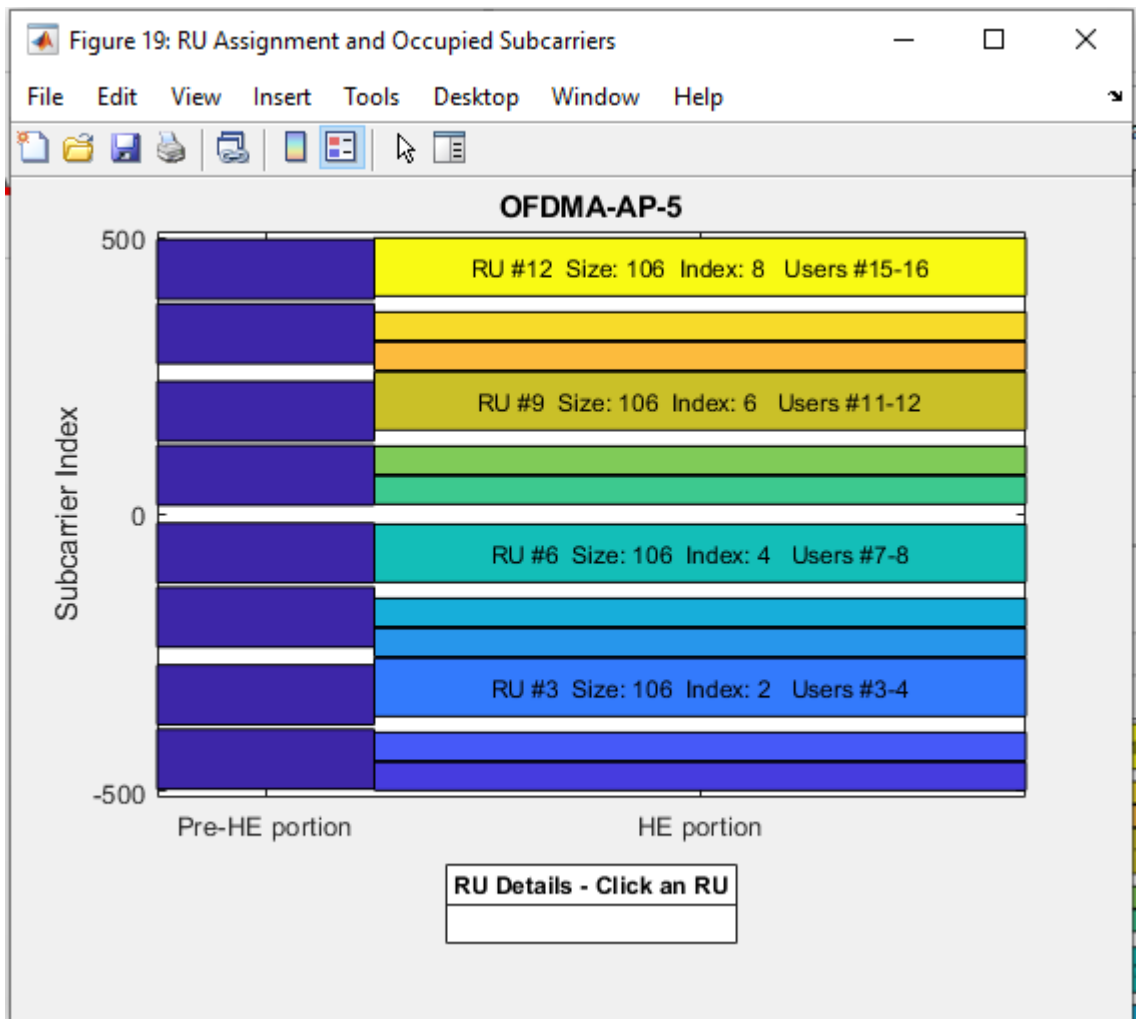


Figura con cinco AP Transmisión combinación OFDMA –MU-MIMO

