

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIONES

**SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES
UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA IEEE 802.11ax**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN**

ARNOLD SAMUELL IZA SANHUEZA

arnold.iza@epn.edu.ec

DIRECTOR: SORAYA LUCÍA SINCHE MAITA

soraya.sinche@epn.edu.ec

DMQ, abril 2024

CERTIFICACIONES

Yo, ARNOLD SAMUELL IZA SANHUEZA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

ARNOLD SAMUELL IZA SANHUEZA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ARNOLD SAMUELL IZA SANHUEZA, bajo mi supervisión.

SORAYA LUCÍA SINCHÉ MAITA
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ARNOLD SAMUELL IZA SANHUEZA

SORAYA LUCÍA SINCHE MAITA

DEDICATORIA

A mi amada familia en general, cuyo amor y apoyo han sido mi mayor fortaleza a lo largo de esta travesía. A mis queridos padres, Darío y Fresia, por sus cuidados incondicionales y su apoyo constante. A mis hermanos Leyla, Shirla y Dusannt, por sus sabios consejos y por compartir cada momento de mi vida. A mi fiel compañero de clases virtuales, Manchitas, cuyo amor y presencia han sido una fuente inagotable de inspiración para seguir adelante. Y a mis sobrinos Matías, Cloe y Elizabeth, quienes llenan mis días de alegría al verlos crecer cada día.

A mis entrañables amigos, Eddy, Stalin, Dilan, Cinthya y Lis, quienes han sido mi roca en los momentos difíciles y mis compañeros de risas en los momentos de felicidad.

A mis compañeros de universidad, Génesis, Jean y Jorge, con quienes he compartido conocimientos, experiencias y desafíos, formando juntos un equipo valioso que ha enriquecido mi aprendizaje y mi crecimiento personal.

A cada uno de ustedes, gracias por su amor, compañía y aliento en cada paso del camino.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi tutora, Soraya Sinche, por su dedicación, orientación y paciencia a lo largo de este proceso. Su guía ha sido invaluable, y su compromiso con mi desarrollo académico y personal ha marcado una diferencia significativa en mi camino.

Expreso mi sincero agradecimiento a todos los profesores de la carrera de Tecnologías de la Información de la Escuela Politécnica Nacional, cuyo conocimiento, enseñanzas y consejos han contribuido enormemente a mi formación como profesional y como persona.

A mi familia, quiero expresar mi más profundo agradecimiento por su apoyo y su constante ayuda para que pudiera seguir adelante con mi carrera. Su respaldo ha sido fundamental en cada paso del camino, y estoy eternamente agradecido por su amor incondicional y su confianza en mí.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE CÓDIGOS	IX
ÍNDICE DE ECUACIONES	X
RESUMEN	XI
ABSTRACT.....	XII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Evolución del estándar IEEE 802.11[6]	2
1.4.2 Arquitectura y características de IEEE 802.11ax[1]	3
1.4.2.1 Capa Física IEEE 802.11ax – PHY[1]	4
1.4.2.2 Capa de Enlace IEEE 802.11ax[1].....	9
1.4.3 Funcionamiento IEEE 802.11ax.....	10
1.4.3.1 Consideraciones de seguridad y privacidad[9]	10
1.4.3.2 Parámetros a considerar en el despliegue de una WLAN[10]	11
1.4.4 <i>Network Simulator 3 (NS-3)</i>	12
2. METODOLOGÍA.....	14
2.1 Escenarios de simulación IEEE 802.11ax.....	19
2.1.1 Primer escenario de simulación	19
2.1.2 Segundo escenario de simulación	20
2.1.3 Tercer escenario de simulación	21
2.2 Implementación de los escenarios de simulación en NS-3.....	23
2.3 Simulación de los escenarios.....	29
2.3.1 Primer Escenario	30
2.3.2 Segundo Escenario	31
2.3.3 Tercer Escenario	32
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	35

3.1	Resultados	35
3.1.1	Análisis del primer Escenario	36
3.1.2	Análisis del segundo escenario.....	44
3.1.3	Análisis del tercer escenario	50
3.2	Conclusiones	59
3.3	Recomendaciones	60
4.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
5.	ANEXOS	64
	ANEXO I. Códigos de los Escenarios simulados.....	64
	ANEXO II. Uso de Planner para metodología Kanban	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Arquitectura IEEE 802.11[7]	4
Figura 1.2. Diferencias entre OFDM y OFDMA[1]	6
Figura 1.3. Formato de PDDU HE	8
Figura 1.4. Formato de la MAC 802.11ax[8].....	10
Figura 2.1. Diagrama de escenario 1 de simulación.....	20
Figura 2.2. Diagrama de escenario 2 de simulación.....	21
Figura 2.3. Diagrama de escenario 3 de simulación.....	22
Figura 2.4. Diagrama en NS-3 del Escenario 1	30
Figura 2.5. Escenario 1 con 25 STA.....	30
Figura 2.6. Escenario 1 con STA más lejanas al AP	31
Figura 2.7. Escenario 2 al inicio de la simulación	31
Figura 2.8. Escenario 2 al finalizar la simulación	32
Figura 2.9. Escenario 2 con 30 STAs	32
Figura 2.10. Escenario 3 al inicio de la simulación	33
Figura 2.11. Escenario 3 al finalizar la simulación	33
Figura 2.12. Escenario 3 con 30 nodos	34
Figura 3.1. Paquetes perdidos vs Ancho de banda en escenario 1.....	36
Figura 3.2. % Paquetes que llegan correctamente vs AB del escenario 1	37
Figura 3.3. Paquetes perdidos vs número de nodos en escenario 1	38
Figura 3.4. %Paquetes que llegan correctamente vs número de nodos del escenario 1	38
Figura 3.5. Paquetes perdidos vs tamaño de paquete en escenario 1	39
Figura 3.6. %Paquetes que llegan correctamente vs tamaño del paquete del escenario 1	39
Figura 3.7. Paquetes perdidos vs intervalo de tiempo de transmisión escenario 1	40
Figura 3.8. %Paquetes que llegan correctamente vs intervalo de transmisión del escenario 1	41
Figura 3.9. Paquetes perdidos vs distancia escenario 1	42
Figura 3.10. %Paquetes que llegan correctamente vs intervalo de transmisión del escenario 1	42
Figura 3.11. Paquetes perdidos vs MCS escenario 1.....	43
Figura 3.12. %Paquetes que llegan correctamente vs del MCS escenario 1	43
Figura 3.13. Paquetes perdidos vs Ancho de banda en escenario 2.....	44
Figura 3.14. %Paquetes que llegan correctamente vs AB del escenario 2	45
Figura 3.15. Paquetes perdidos vs número de nodos en escenario 2.....	46
Figura 3.16. %Paquetes que llegan correctamente vs número de nodos del escenario 2	46
Figura 3.17. Paquetes perdidos vs tamaño de paquete en escenario 2.....	47
Figura 3.18. %Paquetes que llegan correctamente vs tamaño del paquete del escenario 2	47
Figura 3.19. Paquetes perdidos vs intervalo de tiempo de transmisión escenario 2	48
Figura 3.20. %Paquetes que llegan correctamente vs intervalo de transmisión del escenario 2	49
Figura 3.21. Paquetes perdidos vs MCS escenario 2.....	50
Figura 3.22. %Paquetes que llegan correctamente vs MCS en escenario 2.....	50
Figura 3.23. Paquetes perdidos vs Ancho de banda en escenario 3.....	51
Figura 3.24. %Paquetes que llegan correctamente vs AB del escenario 3	52
Figura 3.25. Paquetes perdidos vs número de nodos en escenario 3.....	53
Figura 3.26. %Paquetes que llegan correctamente vs número de nodos del escenario 3	53
Figura 3.27. Paquetes perdidos vs tamaño del paquete en escenario 3	54
Figura 3.28. %Paquetes que llegan correctamente vs el tamaño del paquete del escenario 3.....	55
Figura 3.29. Paquetes perdidos vs intervalo de tiempo de transmisión escenario 3	56
Figura 3.30. %Paquetes que llegan correctamente vs intervalo de transmisión del escenario 3	56
Figura 3.31. Paquetes perdidos vs distancia escenario 3	57
Figura 3.32. %Paquetes que llegan correctamente vs intervalo de transmisión del escenario 3	58
Figura 3.33. Paquetes perdidos vs MCS escenario 3.....	59
Figura 3.34. %Paquetes que llegan correctamente vs MCS en escenario 3.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Resumen de parámetros IEEE 802.11ax.....	5
Tabla 2.1. Pruebas de simulación a realizar en los tres escenarios	18
Tabla 3.1. Resultados por variación del ancho de banda del escenario 1	36
Tabla 3.2. Resultados por variación del número de nodos del escenario 1	37
Tabla 3.3. Resultados por variación del tamaño del paquete en escenario 1	39
Tabla 3.4. Resultados por variación el intervalo de transmisión en escenario 1	40
Tabla 3.5. Resultados obtenidos por variación de distancia en escenario 1.....	41
Tabla 3.6. Resultados por variación de MCS en escenario 1	43
Tabla 3.7. Resultados por variación del ancho de banda en escenario 2.....	44
Tabla 3.8. Resultados por variación del número de nodos en escenario 2.....	45
Tabla 3.9. Resultados por variación del tamaño del paquete en escenario 2.....	47
Tabla 3.10. Resultados por variación del intervalo de transmisión en escenario 2.....	48
Tabla 3.11. Resultados por variación de MCS en escenario 2	49
Tabla 3.12. Resultados por variación del ancho de banda en escenario 3.....	51
Tabla 3.13. Resultados por variación del número de nodos en escenario 3.....	52
Tabla 3.14. Resultados por variación del tamaño del paquete en escenario 3.....	54
Tabla 3.15. Resultados por variación el intervalo de transmisión en escenario 3.....	55
Tabla 3.16. Resultados por variación de la distancia en escenario 3	57
Tabla 3.17. Resultados por variación de MCS en escenario 3	58

ÍNDICE DE CÓDIGOS

Código 2.1. Creación de STA y AP	23
Código 2.2. Configuración de PHY y MAC con Wi-Fi 6.....	24
Código 2.3. Configuración de IPv4.....	25
Código 2.4. Configuración de tráfico UDP.....	26
Código 2.5. Configuración de visualización de los nodos	28
Código 2.6. Configuración de movilidad de los nodos móviles.....	29
Código 2.7. Configuración de movilidad en nodos estáticos	29
Código 2.8. Configuración de movilidad del AP	29

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1. Porcentaje de paquetes perdidos	35
Ecuación 3.2. Porcentaje de paquetes que llegan correctamente.	35

RESUMEN

Dada la creciente demanda de redes inalámbricas que requieren ser más eficientes y de alto rendimiento, el estudio del estándar IEEE 802.11ax es importante para la implementación de redes WiFi. Este estándar aborda los desafíos actuales de alta velocidad de transmisión, gran número de usuarios y latencia en entornos de red cada vez más saturados.

En este contexto, en el presente trabajo de integración curricular se realizará el análisis del funcionamiento del estándar WLAN (*Wireless Local Area Network*) IEEE 802.11ax, así como parámetros tales como throughput y retardo, utilizando la herramienta de simulación NS-3.

Este documento se estructura en tres capítulos.

El Capítulo 1 presenta el marco teórico del estándar IEEE 802.11ax, explorando aspectos clave como las mejoras en la eficiencia espectral, técnicas de modulación avanzadas y bandas de frecuencia. Este capítulo permite conocer las bases teóricas necesarias para comprender el funcionamiento de este estándar conocido también como Wi-Fi 6.

En el Capítulo 2, se detalla la metodología de implementación de los escenarios de simulación, que incluyen configuraciones de red específicas y se describen los parámetros utilizados para llevar a cabo las simulaciones, junto con la configuración de cada escenario.

Finalmente, el Capítulo 3 se dedica al análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones. Se examina el rendimiento del estándar IEEE 802.11ax en diferentes entornos y condiciones, evaluando métricas como la pérdida de paquetes y eficiencia de transmisión. Este análisis es fundamental para comprender mejor las capacidades y limitaciones de Wi-Fi 6 y su papel en la evolución de las tecnologías de comunicación inalámbrica.

PALABRAS CLAVE: IEEE 802.11ax, Wi-Fi 6, NS-3, Simulación, Eficiencia.

ABSTRACT

Given the increasing demand for wireless networks that need to be more efficient and high performance, understanding the IEEE 802.11ax standard is crucial for implementing WiFi networks. These standard addresses current challenges such as high transmission speed, accommodating many users and reducing latency in increasingly congested network environments.

Within this context, this curricular integration project focuses on analyzing the performance of the IEEE 802.11ax WLAN (*Wireless Local Area Network*) standard, including parameters such as throughput and delay, using the NS-3 simulation tool.

This document is structured in three chapters.

Chapter 1 provides a theoretical overview of the IEEE 802.11ax standard, covering key aspects such as improvements in spectral efficiency, advanced modulation techniques, and frequency bands. This chapter provides the theoretical foundations necessary to understand the operation of this standard, also known as Wi-Fi 6.

Chapter 2 outlines the methodology for implementing simulation scenarios, including specific network configurations and descriptions of the parameters used in the simulations, along with the setup of each scenario.

Finally, Chapter 3 delves into the analysis of the simulation results. It examines the performance of the IEEE 802.11ax standard under various environments and conditions, evaluating metrics such as packet loss and transmission efficiency. This analysis is essential for gaining insight into the capabilities and limitations of Wi-Fi 6 and its role in advancing wireless communication technologies.

KEYWORDS: IEEE 802.11ax, Wi-Fi 6, NS-3, Simulation, Efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente se tiene un proceso de evolución continuo de las tecnologías de redes inalámbricas de área local, encontrándose en pleno auge la sexta generación de Wifi, donde aparecen nuevos desafíos, entre los cuales están los niveles de interferencia en las bandas de frecuencia usadas, así como el throughput y retardo.

En este contexto, el presente proyecto tiene por objetivo analizar la sexta generación de las tecnologías WLAN, para lo cual se definirán los parámetros más relevantes para dicho análisis, tales como throughput y latencia. Además, se plantea implementar diferentes escenarios de simulación que permitan configurar varios parámetros, para finalmente analizar los resultados obtenidos como parte de estas simulaciones y poder observar su comportamiento

La implementación de los escenarios de simulación con IEEE 802.11ax permitirá comprender su funcionamiento y como pueden ser las WLANs aprovechadas para habilitar la conectividad de dispositivos en red en un entorno inalámbrico.

El estándar IEEE 802.11ax conocido como la sexta generación de WiFi, es una tecnología que opera en la banda de frecuencia de 1 a 7.125 GHz, que beneficia a dispositivos que operan por separado en bandas de 2.4 GHz o 5 GHz.

IEEE 802.11ax se presentó por primera vez en 2014 y finalmente luego de varias revisiones se estandarizó oficialmente en 2021 alcanzando una velocidad de hasta 9.6 Gbps [1] [2].

En la actualidad, los usuarios de redes de área local inalámbricas (WLANs) están aumentando sus exigencias en lo que respecta a ancho de banda, y la tecnología IEEE 802.11ax ha sido desarrollada para satisfacer esos requerimientos. Este estándar ha sido diseñado cuidadosamente para brindar compatibilidad y una coexistencia eficiente con dispositivos que utilizan tecnologías anteriores, como IEEE 802.11a/n/ac [2].

Por ello, el presente trabajo ofrece una visión global del estándar IEEE 802.11ax que incluye la simulación de diversos escenarios de red utilizando el NS-3 (*Network Simulator - 3*), que permita observar el comportamiento de esta tecnología. NS-3 es una herramienta para analizar el rendimiento de los nodos de la red frente a distintos tipos de tráfico [3].

Esto conlleva a estudiar y comprender el proceso de funcionamiento de las nuevas generaciones de las tecnologías WLANs. Por este motivo se presenta la necesidad de que los estudiantes de la Carrera de Tecnologías de la Información desarrollen destrezas en el uso y análisis de las nuevas tecnologías de redes inalámbricas de área local.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Simular un Sistema de Comunicaciones utilizando la tecnología IEEE 802.11ax implementando escenarios de prueba en NS-3.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudiar el estándar IEEE 802.11ax.
2. Implementar tres escenarios de prueba para la simulación de IEEE 802.11ax utilizando NS -3.
3. Analizar los resultados obtenidos en las simulaciones

1.3 ALCANCE

En el presente trabajo de integración curricular se realiza el análisis del funcionamiento del estándar WLAN (*Wireless Local Area Network*) IEEE 802.11ax, así como parámetros tales como throughput y retardo, utilizando la herramienta de simulación NS-3.

El proceso comienza con una fase teórica en la que se introducen los conceptos esenciales de la tecnología IEEE 802.11ax, abarcando sus diferentes capas y principales características. El objetivo es familiarizarse con estas bases para luego aplicar el estándar IEEE 802.11ax en la creación de escenarios WLAN.

A continuación, se realiza una fase de análisis del comportamiento de esta tecnología, utilizando tres escenarios de prueba que serán simulados con NS-3. El primer escenario presenta una WLAN con nodos estáticos. El segundo, en cambio, se centra en una WLAN donde predominan nodos móviles. Finalmente, el tercer escenario combina ambos tipos, incorporando nodos en movimiento y nodos estáticos. En cada uno de estos escenarios, se inyecta tráfico para estudiar y analizar el comportamiento de los nodos, mediante el uso de librerías disponibles en NS-3, tal como *he-configuration.h* [4] y *WifiPhyBand* [5], en base a la variación de parámetros obtener resultados de throughput y retardo.

Finalmente, con los de resultados obtenidos en las simulaciones se realiza un análisis de estos y se presentan sus respectivas conclusiones y recomendaciones.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 EVOLUCIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11[6]

La evolución del estándar IEEE 802.11, que define las tecnologías inalámbricas Wi-Fi, ha sido un proceso continuo para mejorar la velocidad, eficiencia y rendimiento de las redes

inalámbricas. A continuación, se presenta un resumen de la evolución del estándar IEEE 802.11 hasta su versión más actual publicada.

- IEEE 802.11 (1997): inicia la 1ra generación, trabaja en la banda de frecuencia de 2.4 GHz y define velocidades de hasta 2 Mbps.
- IEEE 802.11b (1999): es la 2da generación y fue uno de los primeros estándares Wi-Fi populares, opera en la banda de frecuencia de 2.4 GHz y ofrece velocidades de hasta 11 Mbps.
- IEEE 802.11a (1999): junto con 802.11g, corresponde a la 3ra generación. Opera en la banda de frecuencia de 5 GHz y proporciona velocidades más altas, que alcanzan hasta 54 Mbps.
- IEEE 802.11g (2003): Una mejora del estándar 802.11b que opera en la banda de 2.4 GHz, permite velocidades de hasta 54 Mbps, similar a IEEE 802.11a.
- IEEE 802.11n (2009): Se considera la 4ta generación e introduce la tecnología MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) para mejorar el rendimiento inalámbrico. Opera tanto en 2.4 GHz como en 5 GHz y ofrece velocidades de hasta 600 Mbps.
- IEEE 802.11ac (2013): Pertenece a la 5ta generación y es conocida como Wi-Fi 5, opera únicamente en la banda de 5 GHz y utiliza técnicas avanzadas como MU-MIMO (Multi-User MIMO) y canales con mayor ancho de banda para ofrecer velocidades de hasta 6.9 Gpbs.
- IEEE 802.11ax (2021): Representa la 6ta generación, diseñado para abordar alta eficiencia en entornos inalámbricos. Utiliza OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) y MU-MIMO con el objetivo de mejorar la eficiencia y proporcionar velocidades más altas en condiciones de alta densidad de dispositivos.

El presente trabajo se enfoca en el estudio de la 6ta generación, representada por la versión más reciente del estándar oficialmente publicado, que busca mejorar la eficiencia y rendimiento de las redes inalámbricas.

1.4.2 ARQUITECTURA Y CARACTERÍSTICAS DE IEEE 802.11AX[1]

El objetivo del estándar IEEE 802.11ax es proporcionar una experiencia de red inalámbrica más rápida, confiable y eficiente para los usuarios, especialmente en escenarios donde hay una gran cantidad de dispositivos conectados y una alta demanda de datos. El estándar también es conocido como Wi-Fi 6 y fue aprobado por IEEE SA Standards Board en 2021. Las redes inalámbricas con Wi-Fi 6 son capaces de satisfacer las necesidades de conectividad de dispositivos y aplicaciones que se utilizan en la actualidad.

En la **Figura 1.1.** se muestra la arquitectura del estándar IEEE 802.11, que sirve como base para todas las evoluciones de este estándar a lo largo de sus generaciones.

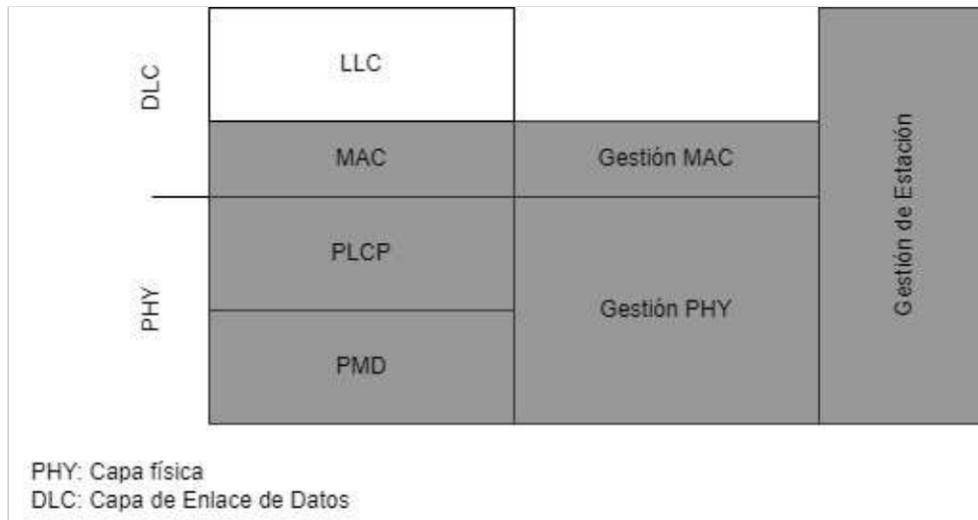


Figura 1.1. Arquitectura IEEE 802.11[7]

1.4.2.1 Capa Física IEEE 802.11ax – PHY[1]

IEEE 802.11ax define una capa física de alta eficiencia (PHY HE - *PHY High Efficiency*), que opera en el rango de frecuencias de 1 GHz a 7.125 GHz, alcanzando una velocidad de transmisión máxima de 9.6 Gbps.

La capa física define canales con anchos de banda contiguos de 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz y 160 MHz, así como un ancho de banda no contiguo de 80 + 80 MHz. La elección del ancho de banda depende de la banda de frecuencia utilizada. En la banda de 2.4 GHz, se emplean anchos de banda de 20 MHz y 40 MHz. En cambio, en la banda de 5 GHz a 7.125 GHz, se pueden utilizar anchos de banda de 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz y 160 MHz. Esta capacidad de ajuste facilita satisfacer diversas demandas en cuanto a capacidad y rendimiento. Además, soporta intervalos de guarda de 0.8 μ s, 1.6 μ s y 3.2 μ s. La PHY HE proporciona soporte para una duración de símbolo de 3.2 μ s, 6.4 μ s y 12.8 μ s, excluyendo la duración del intervalo de guarda.

Las subportadoras de datos de la capa física se modulan mediante BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), BPSK DCM (*Binary Phase Shift Keying with Differential Code Modulation*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), QPSK DCM (*Quadrature Phase Shift Keying with Differential Code Modulation*), 16-QAM (*16-Quadrature Amplitude Modulation*), 16-QAM DCM (*16-Quadrature Amplitude Modulation with Differential Code Modulation*), 64-QAM

(64-Quadrature Amplitude Modulation), 256-QAM (256-Quadrature Amplitude Modulation), y 1024-QAM (1024-Quadrature Amplitude Modulation). Se utiliza codificación FEC (*Forward Error Correction*) con tasas de codificación de 1/2, 2/3, 3/4 y 5/6.

A continuación, se presenta la **Tabla 1.1.** con el resumen de los parámetros de IEEE 802.11ax.

Tabla 1.1. Resumen de parámetros IEEE 802.11ax

Parámetro	Valor
Rango de frecuencias	1 GHz a 7.125 GHz
Velocidad de transmisión máxima	9.6 Gbps
Ancho de canal	20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 160 MHz, 80+80 MHz (no contiguo)
Intervalo de guarda	0.8 μ s, 1.6 μ s, 3.2 μ s
Duración de símbolo	3.2 μ s, 6.4 μ s, 12.8 μ s (excluyendo el intervalo de guarda)
Modulación soportada	BPSK, BPSK DCM, QPSK, QPSK DCM, 16-QAM, 16-QAM DCM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM
Tasa de codificación FEC	1/2, 2/3, 3/4, 5/6

La capa física se divide en 3 subcapas:

- *Physical Medium Dependent* (PMD)
- *Physical Layer Coverage Procedure* (PLCP)
- *Physical management Entity* (PLME)

a) Subcapa PMD (*Physical Medium Dependent*)

Proporciona el procedimiento mediante el cual las PSDU (Unidades de Datos del Protocolo de Servicio) se adaptan para ser transmitidas en el medio inalámbrico.

Durante el proceso de transmisión de las PSDU, en caso de que sea una única PSDU de SU (único usuario) o en caso de varias PSDU de MU (múltiples usuarios), experimentan un tratamiento que implica desordenamiento y codificación de los datos transmitidos en las PSDU. Posteriormente, se agrega el preámbulo de la PHY para formar la PPDU (Unidad de datos de Protocolo de Capa Física).

En el extremo receptor, el preámbulo de la PHY se somete a un procesamiento para facilitar la detección, demodulación y entrega de la PSDU correspondiente. Este preámbulo desempeña una función importante en la correcta interpretación de los datos recibidos.

IEEE 802.11ax utiliza OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) para gestionar el acceso múltiple al canal de comunicación. OFDMA es un esquema basado en OFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal), donde se dividen las bandas

de frecuencia disponibles en subportadoras ortogonales para transmitir datos. En OFDMA, se asignan diferentes subconjuntos de subportadoras a diferentes usuarios, lo que permite la transmisión simultánea de datos a uno o más usuarios. Esta asignación dinámica de subportadoras puede variar de una PPDU a otra, de tal forma, que se adapta a las necesidades de la red y optimiza el uso del espectro disponible. En OFDM el ancho de banda se divide en subportadoras, en función de su ancho de banda. Existen varios tipos de subportadoras: de datos, piloto y no utilizadas.

En la **Figura 1.2.** se muestra la diferencia entre OFDM y OFDMA

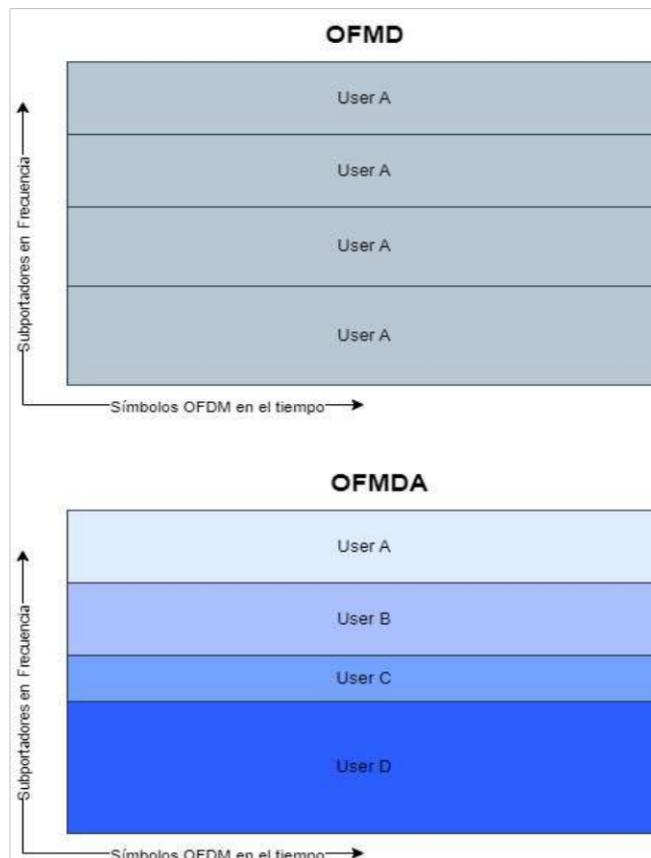


Figura 1.2. Diferencias entre OFDM y OFDMA[1]

IEEE 802.11ax utiliza MU-MIMO para mejorar la eficiencia y el rendimiento de la transmisión de datos cuando hay múltiples dispositivos conectados. Existen dos tipos de MU-MIMO: DL MU-MIMO (MU-MIMO en la dirección descendente) y UL MU-MIMO (MU-MIMO en la dirección ascendente).

En DL MU-MIMO, un AP puede transmitir datos simultáneamente a múltiples estaciones (STAs) con el uso de diferentes subconjuntos de subportadoras. El número máximo de

flujos admitidos para la recepción de DL MU-MIMO depende del ancho de banda y se indica en las capacidades del dispositivo.

En UL MU-MIMO, varias STAs pueden transmitir datos simultáneamente al AP al utilizar la misma frecuencia. Cada STA puede transmitir un número específico de flujos y el número total de flujos no debe exceder 8.

b) Subcapa PLCP (*Physical Layer Converge Procedure*)

Desempeña un papel crucial, ya que, su función principal es encapsular las PPDU de manera estructurada y adecuada antes de transmitir las a la subcapa PMD. La subcapa PLCP opera como un proceso que se encarga de organizar y preparar las PPDU para su transmisión. Este proceso implica la adición de información de control necesaria y estructuración de los datos, de tal forma, que se ajusten a los requisitos de transmisión, así como la implementación de técnicas que aseguren la integridad y confiabilidad de la comunicación.

Se definen cuatro formatos de PPDU HE: HE SU PPDU, HE MU PPDU, HE ER SU PPDU y HE TB PPDU.

- HE SU PPDU: Formato utilizado para transmisión SU (usuario único). El campo HE-SIG-A no se repite en este formato.
- HE MU PPDU: Formato utilizado para transmisión a uno o más usuarios si no es una respuesta a una trama de activación.
- HE ER SU PPDU: Formato utilizado para transmisión SU, en este caso, el campo HE-SIG-A es el doble de largo que en otros formatos HE PPDU.
- HE TB PPDU: Formato utilizado como respuesta a una trama de activación de un punto de acceso (AP). Es similar al formato HE SU PPDU, pero la duración del campo HE-STF es el doble.

En la **Figura 1.3.** se detalla el formato de los PPDU HE, con sus respectivos campos

c) Subcapa PLME (*Physical Management Entity*)

La función principal de la PLME es administrar y configurar los aspectos relacionados con la transmisión y recepción de señales de radio en el medio inalámbrico, por ejemplo, la selección de la frecuencia, para ello utiliza un conjunto de primitivas.

Formatos de PDU HE

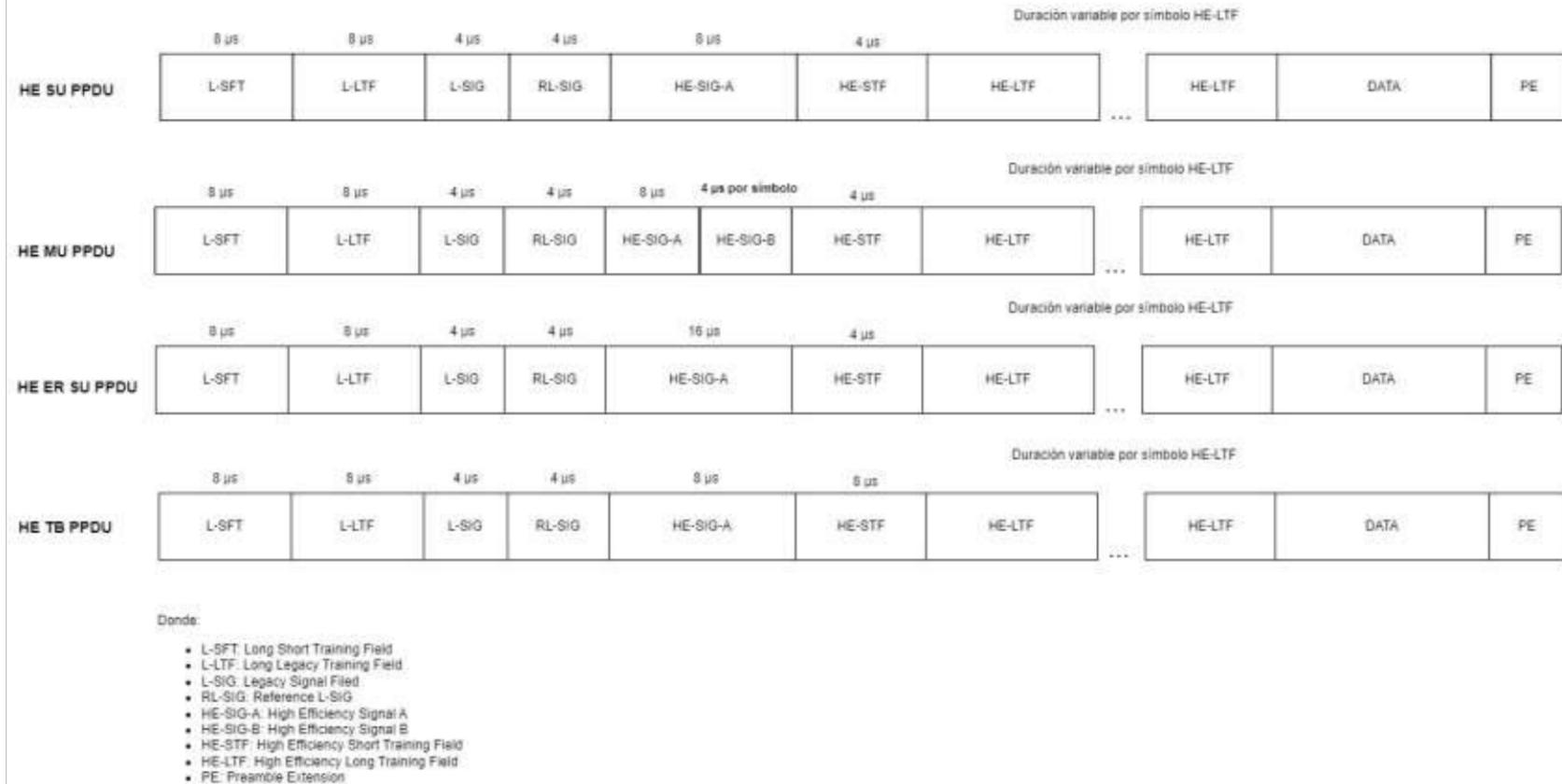


Figura 1.3. Formato de PDU HE

1.4.2.2 Capa de Enlace IEEE 802.11ax[1]

La capa enlace de IEEE 802.11ax presenta avances para abordar desafíos de conectividad en entornos modernos. Su funcionalidad se centra en coordinar el acceso al medio compartido, de tal forma, que mejora la capacidad para manejar múltiples usuarios simultáneamente. Está compuesta por la Subcapa MAC, encargada de gestionar la transmisión de datos y la Capa de Gestión MAC, responsable de aspectos administrativos.

- **Subcapa MAC (*Medium Access Control*)**

En la subcapa MAC se define el formato de las tramas MAC, las cuales son unidades fundamentales de datos utilizadas para coordinar la comunicación entre dispositivos. Se definen tres tipos de tramas: tramas de control, que gestionan el acceso al medio compartido; tramas de datos, que llevan la información a transmitir; y tramas de gestión, que se encargan de tareas administrativas y de control en la red. El formato de la trama se presenta en la **Figura 1.4**.

Además, la subcapa MAC incluye funciones de distribución DCF (Función de Coordinación Distribuida), HCF (Función de Coordinación Híbrida), el acceso ascendente activado por disparo (TUA) y su coexistencia. De estas funciones, DCF se define como obligatoria.

En DCF se intercambian las tramas de control RTS (*Request To Send*) y CTS (*Clear To Send*) antes de enviar una trama de Datos, ésta es una forma de distribuir información para reserva el canal de comunicación.

Las tramas RTS y CTS contienen un campo de duración que incluye el período de tiempo durante el cual el canal de comunicación estará reservado para transmitir la trama de Datos y su Acuse de Recibo (ACK). Una estación que reciba ya sea la trama RTS (enviada por la STA de origen) o la trama CTS (enviada por la STA de destino) procesa la reserva del medio. Otra forma de distribuir la información de reserva del canal es mediante las tramas MU-RTS con sus respectivas respuestas de tramas CTS por STA HE.

El uso del EIFS (*Extended Interframe Space*), DIFS (*Distributed Interframe Space*), y AIFS (*Arbitration Interframe Space*) es esencial para la operación en el DCF. Estos intervalos de tiempos aseguran que las estaciones esperen el tiempo adecuado antes de intentar transmitir por el canal de comunicación, de tal forma que evitan colisiones y se contribuye a la efectividad del acceso al medio.

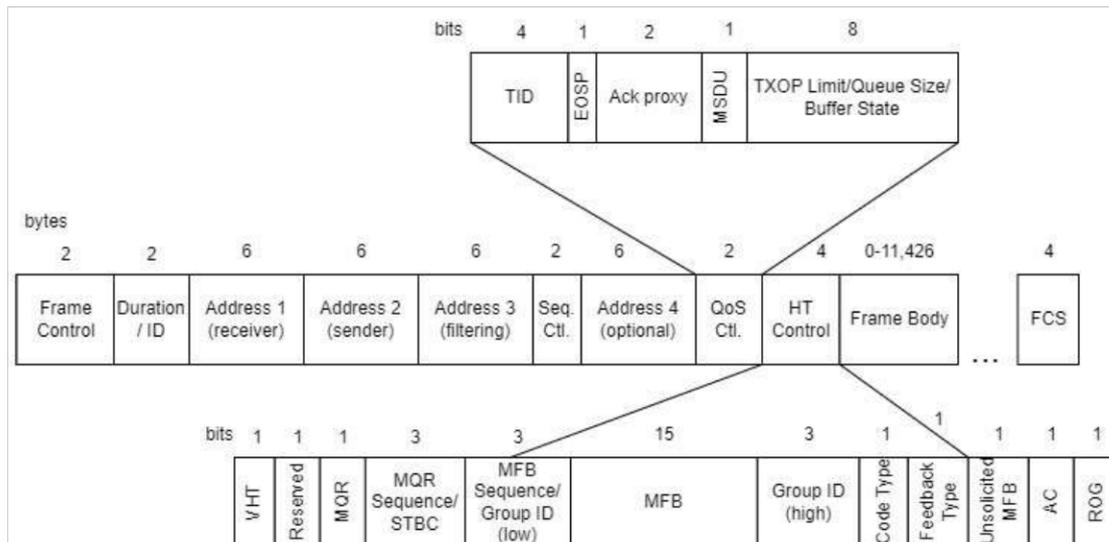


Figura 1.4. Formato de la MAC 802.11ax[8]

El formato de la trama MAC para IEEE 802.11ax es similar al de IEEE 802.11ac e incluye los siguientes componentes: 2 bytes para la trama de control, 2 bytes para la duración / identificación, 6 bytes para la dirección de recepción, 6 bytes para la dirección de envío, 6 bytes para la dirección de filtrado, 2 bytes para el control de secuencia, 6 bytes para una dirección que es opcional, 2 bytes para la calidad de servicio (QoS), 4 bytes para el control de enlace de alta velocidad (HT Control), el cuerpo de la trama que puede variar de 0 a 11,426 bytes, y finalmente, 4 bytes para el código de comprobación de redundancia cíclica (FCS).

1.4.3 FUNCIONAMIENTO IEEE 802.11AX

IEEE 802.11ax representa una notable evolución en el estándar, con un enfoque particular en la mejor de seguridad en entornos inalámbricos. Wi-Fi 6 no solo introduce mejoras en la eficiencia y el rendimiento en redes inalámbricas, y también, aborda de mejor forma los desafíos de seguridad.

1.4.3.1 Consideraciones de seguridad y privacidad[9]

La seguridad y privacidad son aspectos críticos en las redes WLAN, especialmente con la evolución constante de las amenazas cibernéticas. El estándar IEEE 802.11ax presenta diversas características de seguridad, diseñadas para proteger la integridad de la red y la privacidad de los usuarios. Algunos sistemas de seguridad clave que son soportados por IEEE 802.11ax incluyen:

- WPA3 (*Wi-Fi Protected Access 3*): protocolo de autenticación que proporciona mejoras significativas en comparación con su predecesor, WPA2. Fortalece la autenticación mediante el uso de SAE (*Simultaneous Authentication of Equals*), que ofrece una mayor resistencia a los ataques de fuerza bruta y de diccionario.
- *Opportunistic Wireless Encryption* (OWE): es un método de cifrado que protege las comunicaciones, incluso en redes abiertas (sin contraseña). Ayuda a prevenir ataques de tipo "*Man-in-the-Middle*" (MitM) al cifrar las comunicaciones entre el punto de acceso y el dispositivo.
- Filtrado de Direcciones MAC: permite controlar qué dispositivos pueden unirse a la red WLAN. Solo los dispositivos cuyas direcciones MAC estén en la lista de acceso permitido pueden conectarse, lo que reduce el riesgo de acceso no autorizado.
- Firewalls: configurar firewalls en los puntos de acceso y en los dispositivos finales ayuda a bloquear tráfico malicioso y a proteger la WLAN contra ataques externos.
- Segmentación de Redes: utilizar VLANs para segmentar la red en diferentes grupos lógicos de dispositivos ayuda a limitar la exposición en caso de una violación de seguridad.
- Detección y Prevención de Intrusos (IDS/IPS): Estos sistemas monitorean la red en busca de actividad sospechosa y pueden tomar medidas para bloquear o mitigar amenazas identificadas.
- Autenticación de dos Factores (2FA): Agregar una capa adicional de autenticación, como una contraseña y un código de verificación enviado al dispositivo móvil, fortalece la seguridad de las conexiones a la red WLAN.

IEEE 802.11ax implementa estos sistemas de seguridad, que pueden fortalecer la protección contra amenazas cibernéticas y garantizar la privacidad de los datos transmitidos en entornos inalámbricos.

1.4.3.2 Parámetros a considerar en el despliegue de una WLAN[10]

Diseñar y administrar una WLAN eficiente implica considerar diversos parámetros cruciales que afectan su rendimiento y confiabilidad. Además de los aspectos mencionados previamente, hay otros parámetros esenciales que deben tenerse en cuenta:

- Latencia: es tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde el emisor al receptor. Un retardo excesivo puede afectar negativamente aplicaciones en tiempo real como videollamadas y juegos en línea. Por lo que es fundamental minimizar la latencia para brindar una experiencia de usuario fluida.

- **Throughput:** es la cantidad efectiva de datos que pueden transferirse en una red en un período determinado. El throughput es inferior a la velocidad nominal debido a la interferencia, la distancia y otros factores. IEEE802.11ax mejoran el throughput mediante el uso de bandas de frecuencia más amplias y técnicas de modulación avanzadas.
- **Jitter:** Se refiere a las variaciones en el retardo de la transmisión de paquetes en una red. Un jitter alto puede provocar problemas en aplicaciones sensibles al tiempo, como la transmisión de voz y video, por lo que es importante la gestión del jitter para garantizar una transmisión estable y fluida.
- **Cobertura:** Se relaciona con la extensión geográfica que puede abarcar la señal de una WLAN. Es crucial planificar y ubicar los puntos de acceso de manera estratégica para garantizar una cobertura adecuada y evitar puntos muertos.
- **Interferencia:** Son perturbación no deseadas que afecten a una señal de comunicación durante su transmisión. Este fenómeno puede degradar la calidad de la señal en una WLAN y afectar negativamente el rendimiento. Es esencial para mantener un funcionamiento óptimo, identificar y mitigar fuentes de interferencia, como dispositivos electrónicos y otras redes inalámbricas cercanas.
- **Ruido:** Se refiere a señales no deseadas que se mezclan con la señal principal, que pueden afectar la señal y complicar la correcta interpretación de la información transmitida. La SNR (Relación señal-ruido) es un indicador para evaluar la calidad de la señal y busca maximizar la señal y minimizar la presencia de ruido.
- **Calidad de Servicio (QoS):** Permite priorizar el tráfico en la red según la aplicación, lo que es importante para garantizar un rendimiento adecuado en aplicaciones críticas como voz y video. Métodos para gestionar la QoS son la asignación de niveles de prioridad y el uso de colas de tráfico.

Considerar estos parámetros al diseñar, implementar y administrar una WLAN contribuirá a una conectividad confiable, un rendimiento óptimo y una experiencia del usuario satisfactoria

1.4.4 NETWORK SIMULATOR 3 (NS-3)

Network Simulator 3 (NS-3) es un entorno de simulación de redes de código abierto, que se utiliza para modelar y analizar el comportamiento de redes de comunicación. NS-3 permite explorar diferentes escenarios de red y evaluar el rendimiento de protocolos y tecnologías como IEEE 802.11ax [3].

NS-3 posee librerías para la simulación de escenarios de redes inalámbricas, tales como:

- *Applications-module*, permite manipular y configurar aplicaciones de red para simular diversos comportamientos de tráfico, como generadores de datos, clientes y servidores [11].
- *Mobility-module*, proporciona herramientas esenciales para modelar y gestionar la movilidad de nodos en la simulación. Esto resulta crucial para simular escenarios realistas, donde los nodos experimentan desplazamientos en el espacio, que permiten evaluar el impacto de la movilidad en el rendimiento de la red [12].
- *NetAnim*, es una herramienta que facilita la animación visual de la red simulada, permite crear representaciones gráficas que muestran la evolución de la red a lo largo de un tiempo determinado [13].
- *Network-module*, proporciona herramientas para la creación y configuración de topologías de red en la simulación. Esto permite definir nodos, enlaces y configuraciones específicas de red para simular diversos escenarios [14].
- *Ssid.h* maneja los Service Set Identifiers (SSIDs) en redes inalámbricas, permite asociar SSIDs a nodos inalámbricos y simular la conectividad y configuración de redes Wi-Fi [15].
- *Yans-wifi-helper.h* configura y gestiona parámetros específicos de redes Wi-Fi en la simulación, tales como canales y tasas de transmisión. Este módulo facilita la simulación detallada de aspectos relacionados con la creación del canal de comunicación y estándar a utilizar [16].

2. METODOLOGÍA

Para la realización del presente trabajo de integración curricular se utiliza como base la metodología Kanban, que ha demostrado ser un método eficaz para la visualización y optimización de flujos de trabajo. Kanban ha evolucionado para adaptarse a diversas áreas en la administración de proyectos. Se basa en la visualización de tareas y seguimiento de sus procesos a través de tarjetas en un tablero. Cada tarjeta representa una tarea y mientras se mueve a través del tablero, se ve su progreso desde su inicio hasta su finalización.

Una herramienta para utilizar la metodología Kanban es Microsoft Planner, que forma parte del conjunto de aplicaciones de Microsoft 365. Permite la creación de planes, con la asignación de tareas, el seguimiento del progreso de las tareas y colaboración en equipo. Planner utiliza un enfoque Kanban mediante la organización de tareas en tableros con tarjetas. Es especialmente útil para la planificación, ejecución y seguimiento de proyectos (Anexo II) [17][18].

En este capítulo, se plantean escenarios de simulación con NS-3 basados en la tecnología IEEE 802.11ax, donde se consideran diversas configuraciones de red para evaluar el rendimiento de esta tecnología en diferentes condiciones, como densidad de dispositivos y tráfico.

Explicación de los Parámetros para los escenarios de simulación:

1. Ancho de Banda y configuración del estándar:

El ancho de banda es un factor crítico en redes inalámbricas. A medida que se varía el ancho de banda, se puede evaluar cómo impacta en el rendimiento y la capacidad de la red para acomodar flujos de datos que requieren una mayor cantidad de recursos de red para ser transmitidos eficientemente. Estos flujos pueden ser caracterizados por una alta tasa de transferencia de datos o una mayor cantidad de dispositivos conectados simultáneamente a la WLAN.

Utilizando mayor ancho de banda se puede aumentar la velocidad de transmisión, pero también puede introducir interferencias y afectar la coexistencia de múltiples dispositivos en la red.

La selección cuidadosa del ancho de banda es esencial para adaptarse a las necesidades específicas de diferentes aplicaciones y escenarios, como redes de área urbana densamente pobladas o entornos industriales con alta densidad de dispositivos.

2. Número de Nodos:

La capacidad de la red para manejar un aumento en el número de nodos es fundamental para su despliegue en entornos densamente poblados, como áreas urbanas o eventos con alta concentración de dispositivos.

Evaluar la escalabilidad de la red con un aumento en el número de nodos es crucial para comprender su capacidad de manejar situaciones de alta densidad y cómo esto afecta la latencia y la eficiencia de la transmisión. Además, de garantizar un rendimiento consistente y confiable.

3. Tamaño del Paquete:

El tamaño del paquete influye en la eficiencia de la transmisión y la utilización del ancho de banda. Variar el tamaño del paquete permite entender cómo la red responde a diferentes cargas útiles de datos.

Paquetes más pequeños pueden ser beneficiosos para aplicaciones sensibles a la latencia, mientras que paquetes más grandes pueden optimizar la transmisión de datos.

Ajustar el tamaño del paquete según los requisitos específicos de las aplicaciones puede mejorar la eficiencia de la transmisión y garantizar una entrega oportuna de datos.

4. Intervalo del Tiempo de Transmisión:

El tiempo entre transmisiones afecta el patrón de tráfico y la carga en la red. Variar este intervalo permite comprender cómo la red se adapta a diferentes patrones de uso y cómo influye en la congestión de la red.

Intervalos cortos entre transmisiones pueden resultar en una alta tasa de tráfico por el envío continuo de paquetes, causando congestión en la red. Por otro lado, intervalos largos entre transmisiones pueden disminuir la transmisión y recepción de los paquetes, resultando en una entrega más lenta de la información.

La selección adecuada del intervalo de tiempo es crucial para garantizar la entrega oportuna de datos y optimizar el rendimiento de la red en diferentes escenarios de uso.

5. Distancia:

La distancia entre nodos afecta directamente la calidad de la conexión y la atenuación de la señal. Al variar la distancia se puede evaluar la cobertura y la estabilidad de la red en diferentes escenarios.

Comprender cómo la red responde a diferentes distancias es vital en el diseño de una red inalámbrica para garantizar una conectividad confiable.

6. Configuración de MCS (Modo de Codificación y Modulación) [19]:

La tasa de codificación y modulación se encuentra directamente relacionada con la velocidad de transmisión y la estabilidad de la conexión. Variar este parámetro permite evaluar cómo la red se adapta a condiciones cambiantes del canal. Con valores de MCS se consigue variar la velocidad de transmisión.

Para garantizar un alto rendimiento en entornos inalámbricos propensos a cambios en las condiciones de transmisión, es crucial analizar la capacidad de la red para adaptarse dinámicamente a las condiciones del canal.

7. Movilidad de Estaciones Móviles:

La movilidad de los nodos es una característica esencial en las redes inalámbricas. Para estaciones estáticas, se emplea un modelo donde mantienen una posición constante, simulando dispositivos fijos en ubicaciones predefinidas. Por otro lado, para estaciones móviles, se utiliza un modelo de movilidad donde pueden moverse de forma aleatoria en un área limitada, replicando dispositivos en movimiento. Este parámetro proporciona una representación más realista de cómo los dispositivos se desplazan dentro de una red inalámbrica, lo que es crucial para evaluar el rendimiento y la eficiencia del sistema en condiciones dinámicas

8. Configuración de Aplicaciones UDP:

Se instalan aplicaciones de servidor y cliente UDP para simular la transmisión de datos desde las estaciones al punto de acceso. Las aplicaciones generan tráfico en la red, que ha permitido evaluar el rendimiento y la capacidad de la red para manejar flujos de datos. La simulación de tráfico realista es esencial para comprender cómo la red responde a las necesidades de las aplicaciones.

9. Configuración de Red:

Las estaciones estáticas y móviles comparten el mismo punto de acceso, que conecta ambas subredes. Cada conjunto de estaciones tiene su propia identificación de conjunto de servicios (SSID).

Explicación de los Protocolos de Pruebas para la Simulación de los tres escenarios:

A continuación, se presenta el protocolo de pruebas para los tres escenarios:

- Pruebas 1-4 (Variación del Ancho de Banda): En los tres escenarios, se varía el ancho de banda desde 20 MHz hasta 160 MHz. La distancia entre los nodos se mantiene constante a 5 metros, el MCS se mantiene constante en 11, el intervalo entre los paquetes es de 10 s, el tamaño del paquete es de 1024 bytes y en el escenario dos y escenario tres, se configura el movimiento aleatorio a los nodos móviles para verificar como influye estos parámetros en la implementación de cada escenario de simulación.
- Pruebas 5-11 (Variación del Número de Nodos): En este grupo de pruebas, se evalúa cómo la red escala en función del número de nodos. En los tres escenarios, se varía de 20 nodos hasta 50 nodos. Se espera observar posibles congestiones y caídas de rendimiento a medida que aumenta el número de nodos. En el tercer escenario al tener nodos estáticos como nodos móviles, se configura que el número total de nodos se divida en dos partes iguales, para tener la misma cantidad de nodos estáticos como nodos móviles para la simulación.
- Pruebas 12-17 (Variación del Tamaño del Paquete): En estas pruebas, se investiga cómo el tamaño del paquete afecta la eficiencia de la transmisión y la capacidad de la red para manejar diferentes cargas útiles. Comienza con paquetes pequeños de 128 bytes y aumenta gradualmente hasta 4096 bytes, se busca identificar posibles limitaciones en la transmisión de datos
- Pruebas 18-23 (Variación del Intervalo del Tiempo de Transmisión): En este conjunto de pruebas, se examina cómo diferentes intervalos de tiempo entre transmisiones afectan los patrones de tráfico y la eficiencia de la red. Desde intervalos largos de 10 segundos hasta intervalos muy cortos de 0.1 segundos, se busca entender cómo la frecuencia de transmisión impacta en el rendimiento de la red. Esta información es esencial para ajustar la configuración de transmisión en función de las necesidades específicas de la aplicación o del entorno y verificar como afecta a la red al enviar paquetes desde nodos con posición fija y nodos que se mueven en toda el área que cubre la red.
- Pruebas 24-27 (Variación de Distancia): En estas pruebas, se analiza el impacto de la distancia entre los nodos en la calidad de la conexión. Mientras se mantiene otros parámetros constantes y se varía la distancia entre 2.5 y 10 metros entre los nodos, se busca entender cómo la propagación de la señal y el solapamiento afectan la comunicación entre los dispositivos. En el segundo y tercer escenario de simulación, donde se incluyen nodos móviles, la distancia entre los nodos es

variable por la configuración de la movilidad que se aplica a los nodos. Esta serie de pruebas es crucial para diseñar redes que operan en entornos con variaciones significativas en la distancia entre los nodos.

- Pruebas 28-33 (Variación de MCS): En este grupo de pruebas, se evalúa cómo diferentes tasas de codificación y modulación influyen en la velocidad de transmisión y la estabilidad de la conexión. Comienza con una tasa MCS baja de 6 y va en aumento hasta la tasa máxima de 11, se busca entender cómo la selección de MCS afecta el rendimiento de la red.

A continuación, se observa la **Tabla 2.1.** donde se presenta el detalle de cada prueba realizada:

Tabla 2.1. Pruebas de simulación a realizar en los tres escenarios

Pruebas de Simulación		AB (MHz)	MCS	Nodos	Número de Paquetes	Tamaño del paquete (Bytes)	Intervalo entre paquetes (s)	Distancia (m)
Variación del Ancho de Banda	Prueba 1	20	11	20	10	1024	1	5
	Prueba 2	40	11	20	10	1024	1	5
	Prueba 3	80	11	20	10	1024	1	5
	Prueba 4	160	11	20	10	1024	1	5
Variación del número de nodos	Prueba 5	40	11	20	10	1024	1	5
	Prueba 6	40	11	25	10	1024	1	5
	Prueba 7	40	11	30	10	1024	1	5
	Prueba 8	40	11	35	10	1024	1	5
	Prueba 9	40	11	40	10	1024	1	5
	Prueba 10	40	11	45	10	1024	1	5
Variación del tamaño del paquete	Prueba 11	40	11	50	10	1024	1	5
	Prueba 12	40	11	20	10	128	1	5
	Prueba 13	40	11	20	10	256	1	5
	Prueba 14	40	11	20	10	512	1	5
	Prueba 15	40	11	20	10	1024	1	5
	Prueba 16	40	11	20	10	2048	1	5
Variación de intervalo del tiempo de transmisión	Prueba 17	40	11	20	10	4096	1	5
	Prueba 18	40	11	20	10	1024	10	5
	Prueba 19	40	11	20	10	1024	7.5	5
	Prueba 20	40	11	20	10	1024	5	5
	Prueba 21	40	11	20	10	1024	2.5	5
	Prueba 22	40	11	20	10	1024	1	5
Variación de distancia	Prueba 23	40	11	20	10	1024	0.1	5
	Prueba 24	40	11	20	10	1024	1	2.5
	Prueba 25	40	11	20	10	1024	1	5
	Prueba 26	40	11	20	10	1024	1	7.5
Variación de MCS	Prueba 27	40	11	20	10	1024	1	10
	Prueba 28	40	6	20	10	1024	1	5
	Prueba 29	40	7	20	10	1024	1	5
	Prueba 30	40	8	20	10	1024	1	5
	Prueba 31	40	9	20	10	1024	1	5
	Prueba 32	40	10	20	10	1024	1	5
Prueba 33	40	11	20	10	1024	1	5	

2.1 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN IEEE 802.11AX

En esta sección, se definen los escenarios específicos que se implementan. Se han definido, estos escenarios para abarcar diversas configuraciones y condiciones de red WLAN, lo que permite, así una evaluación del rendimiento y la eficiencia de la tecnología IEEE 802.11ax. Variables como la densidad de dispositivos, la variabilidad del tráfico y otros parámetros relevantes se tienen en cuenta para obtener una visión completa de su desempeño en distintos contextos.

Para realizar un análisis del comportamiento de la tecnología IEEE 802.11ax en sistemas WLAN, se plantean 3 escenarios de simulación que abordan nodos estáticos, nodos móviles y una fusión de ambos en un entorno mixto. Estos escenarios se han concebido para evaluar cómo la tecnología responde ante diferentes niveles de movilidad de los dispositivos.

2.1.1 PRIMER ESCENARIO DE SIMULACIÓN

El primer escenario que se propone consiste en una WLAN formada por un AP y varias STAs, que tienen como característica la ausencia de movimiento. En este contexto, se ha establecido una distancia predeterminada entre las estaciones de trabajo y el Punto de Acceso (AP). Tanto el AP como los dispositivos permanecen en posiciones fijas, y la disposición aleatoria de los nodos alrededor del AP se ajusta a la distancia previamente establecida.

Este escenario encuentra aplicabilidad especialmente en entornos con estaciones de escritorio fijas, como computadoras de escritorio o cámaras de seguridad, las cuales no tienen movilidad y pueden enlazarse a la red utilizando tecnologías como Wi-Fi 6. Este enfoque ofrece flexibilidad y capacidad de conexión sin la necesidad de implementar una infraestructura de cableado físico, lo que resulta beneficioso en situaciones donde el cableado es limitado y se requiere una implementación ágil y adaptable.

La **Figura 2.1.** muestra el primer escenario de simulación, el cual implica un AP junto a varias estaciones, que son computadoras de escritorio, equipadas con conectividad inalámbrica para poder conectarse a la WLAN. Dado que las STAs son computadoras de escritorio, no se mueven, lo que las convierte en el ejemplo de nodos estáticos del escenario de simulación.



Figura 2.1. Diagrama de escenario 1 de simulación

En este escenario se busca comprender cómo ciertos parámetros impactan el rendimiento de una red Wi-Fi 6 con estaciones fijas. Se exploran variables clave, como: ancho de banda (AB), número de nodos, tamaño del paquete, intervalo del tiempo de transmisión, distancia entre nodos y modo de codificación y modulación (MCS). Se analizarán los resultados obtenidos con la simulación de este escenario al modificar estos parámetros, para conocer el efecto en la capacidad, velocidad y estabilidad de la red, que proporciona información valiosa para la planificación y optimización de redes Wi-Fi en entornos diversos.

2.1.2 SEGUNDO ESCENARIO DE SIMULACIÓN

El segundo escenario seleccionado para análisis implica un entorno donde se incorpora la movilidad de las estaciones. Se configura una distancia inicial entre los nodos móviles y el AP, de modo, que, al iniciar la simulación, los nodos comienzan a moverse aleatoriamente en toda el área que cubre la red, variando la distancias entre los nodos lo que permite una conectividad fluida en un entorno dinámico.

Este escenario resulta relevante en entornos de red donde la movilidad de las estaciones de trabajo es una necesidad operativa. Las características de movilidad se adaptan a situaciones en las que los dispositivos, como laptops o tablets, requieren desplazarse dentro de la red mientras mantienen una conexión continua. En este contexto, la tecnología IEEE 802.11ax demuestra ser una solución eficiente al ofrecer una conectividad robusta y de alta velocidad, adaptándose a las necesidades cambiantes de ubicación de los dispositivos sin depender de una infraestructura de cableado físico.

Este enfoque móvil y flexible, respaldado por la tecnología inalámbrica avanzada, se convierte en una alternativa valiosa en situaciones donde la infraestructura fija no puede satisfacer las demandas de movilidad dentro de la red. La implementación de IEEE 802.11ax en este escenario promueve una conectividad ágil y adaptable, se proporciona una solución que requiere movilidad y flexibilidad en su infraestructura de red.

Este escenario de simulación representa una red inalámbrica con múltiples estaciones móviles que se mueven en un área específica y se comunican con un AP.

La **Figura 2.2.** representa de forma gráfica el segundo escenario de simulación, que consiste en un AP y las estaciones son laptops o dispositivos móviles que se conectan a la red de forma inalámbrica. Dado que las STAs son laptops y celulares móviles, pueden moverse a través de todo el espacio que cubre la red. Además, el movimiento de estas STAs es aleatoria, ya que, son capaces de desplazarse en toda el área de cobertura de la red, lo que las convierten en el ejemplo de nodos móviles del escenario de simulación.



Figura 2.2. Diagrama de escenario 2 de simulación

2.1.3 TERCER ESCENARIO DE SIMULACIÓN

En el tercer escenario, se configura un entorno que combina tanto nodos estáticos como móviles, representa una solución intermedia que aborde las necesidades de conectividad en una red con diversas demandas operativas. Se establece una distancia predeterminada entre todas las estaciones de trabajo, incluyendo tanto las fijas como las móviles, y el Punto de Acceso. La disposición aleatoria de los nodos alrededor del AP se ajusta a la distancia establecida previamente.

Este escenario mixto se adapta especialmente a una red que requiere una infraestructura que sirva tanto a computadoras de escritorio fijas, como a dispositivos móviles. La coexistencia de nodos estáticos y móviles refleja situaciones comunes en entornos reales, donde la necesidad de flexibilidad y movilidad coexiste con la presencia de dispositivos fijos en estaciones de trabajo específicas.

La tecnología IEEE 802.11ax en este contexto ofrece una solución integral al proporcionar conectividad eficiente para ambos tipos de dispositivos. La red inalámbrica permite la adaptación fluida a los requisitos cambiantes de movilidad, que garantizan al mismo tiempo una conectividad estable para dispositivos estáticos. Este enfoque híbrido resulta beneficioso en entornos que requieren una infraestructura de red versátil, capaz de satisfacer las diversas demandas de conectividad presentes en su entorno real, que puede variar según los diferentes tipos de STAs.

En resumen, este escenario híbrido destaca la capacidad de IEEE 802.11ax para proporcionar una solución que se adapte a las necesidades de conectividad en entornos de red que cuentan con una variedad de dispositivos inalámbricos.

La **Figura 2.3.** representa el tercer escenario de simulación, el cual incluye un AP y varias estaciones de escritorio con conexión inalámbrica, laptops y dispositivos móviles. Esta combinación de STAs, constituyen un escenario híbrido. Los computadores de escritorio representan los nodos estáticos, las laptops y celulares representan los nodos móviles del entorno de simulación.



Figura 2.3. Diagrama de escenario 3 de simulación.

2.2 IMPLEMENTACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN EN NS-3

La configuración del estándar IEEE 802.11ax Wi-Fi 6 en NS-3 implica ajustar parámetros clave en los elementos fundamentales de una WLAN. NS-3, es un software de simulación de redes provee módulos y clases específicas para llevar a cabo esta configuración y simular escenarios que sigan las especificaciones de IEEE 802.11ax.

- Topología de red

Está definida con un conjunto de estaciones Wi-Fi (*wifiStaNodes*) y un punto de acceso (*wifiApNode*). La disposición es relativamente simple, con estaciones dispuestas en una cuadrícula. El **Código 2.1.** crea los nodos que son utilizados como STAs y el AP.

```
// Creación de las STA
NodeContainer wifiStaNodes;
wifiStaNodes.Create(nWifi);
allNodes.Add(wifiStaNodes);
// Creación de AP
NodeContainer wifiApNode;
wifiApNode.Create(1);
allNodes.Add(wifiApNode);
```

Código 2.1. Creación de STA y AP

- Configuración de dispositivos con Wi-Fi 6

La configuración de dispositivos Wi-Fi se realiza con las clases *WifiHelper*, *YansWifiChannelHelper* y *YansWifiPhyHelper*. Se instalan dispositivos Wi-Fi en nodos específicos que utilizan el método *Install* de *WifiHelper* y se vincula configuraciones de PHY y MAC.

Se utiliza el método *ChannelSettings* para configurar los parámetros del canal. El argumento de tipo *StringValue* es un formato de cadena que especifica los detalles del canal.

El método *SetRemoteStationManager* en la clase *WifiHelper* desempeña un papel crucial al configurar el *RemoteStationManager*, encargado de gestionar la configuración de la estación Wi-Fi en un entorno de simulación en NS-3.

Se utiliza un controlador constante representado por la cadena `"ns3::ConstantRateWifiManager"`. Este controlador proporciona tasas de datos constantes, lo que puede ser adaptado y modificado según los requisitos específicos de la simulación.

Además, se realizan configuraciones específicas para la tasa de codificación y modulación que se relaciona directamente con la velocidad que se transmiten las tramas datos y tramas de control de la estación Wi-Fi. En particular, se establece el modo de datos en `"HeMcs"`, que denota un esquema de modulación y codificación específico para Wi-Fi 6. Esta elección está alineada con las capacidades y características de este estándar de Wi-Fi de última generación.

El estándar Wi-Fi 6 es configurado con `wifi.SetStandard(WIFI_STANDARD_80211ax)`. La MAC se establece con `WifiMacHelper`, que define los tipos de MAC para estaciones y puntos de acceso.

El **Código 2.2.** representa las líneas de código que se utilizan para la configuración del estándar.

```
// Creación y configuración del canal de comunicación (PHY)
YansWifiChannelHelper channel = YansWifiChannelHelper::Default();
YansWifiPhyHelper phy;
phy.SetChannel(channel.Create());
phy.Set("ChannelSettings", StringValue("{0, 40, BAND_5GHZ, 0}"));
// Configuración de Wi-Fi 6 y MSC
WifiHelper wifi;
wifi.SetStandard(WIFI_STANDARD_80211ax);
wifi.SetRemoteStationManager("ns3::ConstantRateWifiManager", "DataMode",
StringValue("HeMcs11"), "ControlMode", StringValue("HeMcs11"));
// Configuración de MAC
WifiMacHelper mac;
Ssid ssid = Ssid("ns-3-ssid");
mac.SetType("ns3::StaWifiMac", "Ssid", SsidValue(ssid), "ActiveProbing", BooleanValue(false));
// Instalación de las configuraciones en las STA y AP
NetDeviceContainer staDevices;
staDevices = wifi.Install(phy, mac, wifiStaNodes);
mac.SetType("ns3::ApWifiMac", "Ssid", SsidValue(ssid));
NetDeviceContainer apDevices;
apDevices = wifi.Install(phy, mac, wifiApNode);
```

Código 2.2. Configuración de PHY y MAC con Wi-Fi 6

- Configuración de IPv4

Se realiza la configuración de direcciones IP para los dispositivos de la red. También se establece la puerta de enlace para las estaciones móviles, permitiéndoles acceder a destinos en toda la WLAN.

En NS-3, la clase *Ipv4AddressHelper* simplifica la asignación de direcciones IP a los dispositivos en una red simulada. Se utiliza el método *SetBase*, que define una dirección base y una máscara de subred, lo que permite una asignación de direcciones IP a los diferentes nodos de la red.

Por otro lado, *Ipv4InterfaceContainer* actúa como un contenedor que almacena las interfaces IPv4 asignadas a los distintos dispositivos de la red. Esto facilita el acceso a las interfaces y proporciona una forma organizada de gestionar las direcciones IP asignadas a cada dispositivo.

Se utiliza la clase *Ipv4StaticRoutingHelper* para configurar la tabla de enrutamiento estática de las estaciones. Esta tabla define cómo se deben dirigir los paquetes de datos desde una estación hacia su destino. El método *SetDefaultRoute* de esta clase establece la puerta de enlace predeterminada para la estación móvil. En esta forma, la puerta de enlace se configura en el punto de acceso de la red. El **Código 2.3.** representa la configuración de IPv4 en los escenarios de simulación.

```
// Configuración de direcciones IP para AP y STA móviles
Ipv4AddressHelper address;
address.SetBase("10.1.1.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer apInterface = address.Assign(apDevices);
Ipv4InterfaceContainer staInterfacesMobile = address.Assign(staDevicesMobile);
// Configuración de puerta de enlace para cada nodo STA móvil
for (uint32_t i = 0; i < nWifi; ++i)
{
    Ptr<Ipv4> ipv4Mobile = wifiStaNodesMobile.Get(i)->GetObject<Ipv4>();
    // Configura la puerta de enlace para cada nodo STA móvil
    Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelperMobile;
    Ptr<Ipv4StaticRouting> staticRoutingMobile =
    ipv4RoutingHelperMobile.GetStaticRouting(ipv4Mobile);
    staticRoutingMobile->SetDefaultRoute(Ipv4Address("10.1.1.1"), 1);
}
```

Código 2.3. Configuración de IPv4

- Configuración de aplicaciones y tráfico

Se configuran aplicaciones de tipo UDP (*UdpEcho*) para simular el tráfico en la red. Se utiliza un servidor UDP en el AP y clientes UDP en las STA para enviar paquetes de eco.

Para facilitar la configuración de un servidor UDP se utiliza la clase *UdpEchoServerHelper*. La instancia *echoServer(9)* crea un servidor de eco UDP en el puerto 9. Luego, la función *Install(wifiApNode.Get(0))* permite instalar el servidor en el nodo del punto de acceso (AP), y se asigna la instancia resultante a la variable *serverApps*.

Se emplea la clase *UdpEchoClientHelper* para configurar un cliente UDP. Con *echoClient(...)*, se crea un cliente que enviará paquetes al puerto 9. La dirección IP local del nodo AP se obtiene mediante *GetObject<Ipv4>()->GetAddress(1, 0).GetLocal()*. A través de los métodos *SetAttribute*, se configuran atributos del cliente, como el número máximo de paquetes, el intervalo entre paquetes y el tamaño del paquete.

Finalmente, se instalan clientes UDP en los nodos STA, como se muestra en el **Código 2.4.**, con *echoClient.Install(wifiStaNodes)*, y la instancia resultante se asigna a la variable.

```
// Configuración del Servidor UDP
UdpEchoServerHelper echoServer(9);
ApplicationContainer serverApps = echoServer.Install(wifiApNode.Get(0));
serverApps.Start(Seconds(1.0));
serverApps.Stop(Seconds(15.0));
// Configuración del Cliente UDP
UdpEchoClientHelper echoClient(wifiApNode.Get(0)->GetObject<Ipv4>()->GetAddress(1,
0).GetLocal(), 9);
echoClient.SetAttribute("MaxPackets", UIntegerValue(10));
echoClient.SetAttribute("Interval", TimeValue(Seconds(1)));
echoClient.SetAttribute("PacketSize", UIntegerValue(1024));
ApplicationContainer clientApps = echoClient.Install(wifiStaNodes);
clientApps.Start(Seconds(2.0));
clientApps.Stop(Seconds(15.0));
```

Código 2.4. Configuración de tráfico UDP

- Visualización y Monitoreo

Para gestionar la visualización y monitoreo de la simulación se emplea el módulo *netanim*. El punto de entrada a esta funcionalidad es la clase *AnimationInterface*, que se encarga de configurar la interfaz de animación. Instancia un objeto en este caso llamado 'anim' que

utiliza un archivo de animación denominado "Escenario (nombre del escenario) (número de prueba).xml".

Para personalizar la representación visual de los nodos en la animación, se utilizan los métodos *UpdateNodeDescription* y *UpdateNodeColor* de la clase *AnimationInterface*. El primero se emplea para modificar la descripción de un nodo, que cambia el nombre del nodo AP a "AP" y asigna nombres específicos a las estaciones que incluyen el prefijo "STA" seguido del número correspondiente.

En cuanto a la apariencia visual de los nodos, se utiliza el método *UpdateNodeColor* para definir el color de los nodos en la animación. En este caso, el nodo AP se configura con un color verde, mientras que las estaciones móviles se representan en rojo.

Además de la representación gráfica, se habilita la recopilación de información adicional mediante métodos específicos. Los métodos *EnableWifiMacCounters* y *EnableWifiPhyCounters* proporcionan una visión detallada del funcionamiento de las redes Wi-Fi simuladas a través de la plataforma NS-3.

El método *EnableWifiMacCounters* se encarga de habilitar la monitorización y registro de diversos contadores vinculados a la capa de control de acceso al medio (MAC). Estos contadores abarcan una amplia información, como el número de paquetes transmitidos, recibidos, descartados, así como estadísticas relacionadas con colisiones. Al registrar estos datos, se obtiene una visión integral del comportamiento de las estaciones Wi-Fi en la red simulada, que ha permitido un análisis detallado de la dinámica de la capa MAC.

Por otro lado, se utiliza el método *EnableWifiPhyCounters* para el seguimiento de contadores específicos relacionados con la capa física (PHY) de Wi-Fi. Al capturar esta información, se logra una comprensión detallada del rendimiento de la transmisión y recepción de datos a nivel de la capa PHY. Estos datos son esenciales para evaluar la eficiencia y la calidad de las comunicaciones inalámbricas en el entorno simulado. El **Código 2.5**. representa la configuración que se utiliza para la animación de los nodos; además, de obtener el conteo de los paquetes de capa PHY y MAC.

```

// Cambiar el color y el nombre del nodo AP
AnimationInterface anim("Escenario_(escenario de simulación)_(número de prueba).xml");
anim.UpdateNodeDescription(wifiApNode.Get(0), "AP");
anim.UpdateNodeColor(wifiApNode.Get(0), 0, 255, 0);
for (uint32_t i = 0; i < wifiStaNodesMobile.GetN(); ++i)
{
    std::string nodeNameMobile = "STA Mobile " + std::to_string(i);
    anim.UpdateNodeDescription(wifiStaNodesMobile.Get(i), nodeNameMobile);
    anim.UpdateNodeColor(wifiStaNodesMobile.Get(i), 255, 0, 0);
}
anim.EnablePacketMetadata();
anim.EnableIpv4RouteTracking("routingtable-wifi6_1.xml", Seconds(0), Seconds(5),
Seconds(0.25));
anim.EnableWifiMacCounters(Seconds(0), Seconds(10));

```

Código 2.5. Configuración de visualización de los nodos

- Modelos de Movilidad

Para gestionar la movilidad de los nodos se hace uso de la clase *MobilityHelper* en NS-3. La elección entre la movilidad de las STA o que se mantengan constante se basa en la configuración específica del modelo de movilidad asignado a cada nodo, de tal forma, que existe dos modelos principales: "*RandomWalk2dMobilityModel*" para movilidad aleatoria y "*ConstantPositionMobilityModel*" para mantener una posición constante.

El modelo "*RandomWalk2dMobilityModel*" se utiliza cuando se desea simular nodos que se desplazan de manera aleatoria en el espacio. Este enfoque es ideal para representar dispositivos móviles que pueden cambiar de ubicación de manera impredecible. En el código, las estaciones móviles (STA) se benefician de este modelo, lo que permite realizar movimientos aleatorios dentro de un área definida.

Por otro lado, se aplica el modelo "*ConstantPositionMobilityModel*" cuando se desea mantener la posición de un nodo constante a lo largo de la simulación. Este enfoque es útil para representar nodos que permanecen estáticos, como puntos de acceso (AP) que no se mueven. Por medio, del **Código 2.6**, **Código 2.7** y **Código 2.8** se configura el movimiento de los diferentes elementos de la red, nodos móviles, nodos estáticos y el AP, además, de la posición inicial de cada uno de los nodos.

```
// Configuración de movilidad para nodos STA móviles
MobilityHelper mobilityMobile;
mobilityMobile.SetPositionAllocator("ns3::GridPositionAllocator",
    "MinX", DoubleValue(5.0),
    "MinY", DoubleValue(10.0),
    "DeltaX", DoubleValue(5.0),
    "DeltaY", DoubleValue(2.0),
    "GridWidth", UIntegerValue(5),
    "LayoutType", StringValue("RowFirst"));
mobilityMobile.SetMobilityModel("ns3::RandomWalk2dMobilityModel",
    "Bounds", RectangleValue(Rectangle(0, 50, 0, 50)));
mobilityMobile.Install(wifiStaNodesMobile);
```

Código 2.6. Configuración de movilidad de los nodos móviles

```
// Configuración de movilidad para nodos STA estáticos
MobilityHelper mobilitySta;
mobilitySta.SetPositionAllocator("ns3::GridPositionAllocator",
    "MinX", DoubleValue(5.0),
    "MinY", DoubleValue(10.0),
    "DeltaX", DoubleValue(10.0),
    "DeltaY", DoubleValue(5.0),
    "GridWidth", UIntegerValue(5),
    "LayoutType", StringValue("RowFirst"));
mobilitySta.Install(wifiStaNodes);
```

Código 2.7. Configuración de movilidad en nodos estáticos

```
// Configuración de movilidad para el nodo AP (fijo)
MobilityHelper mobilityAp;
mobilityAp.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobilityAp.Install(wifiApNode);
Ptr<ConstantPositionMobilityModel> mobilityModelAp = wifiApNode.Get(0)-
>GetObject<ConstantPositionMobilityModel>();
mobilityModelAp->SetPosition(Vector(10, 17.5, 0.0));
```

Código 2.8. Configuración de movilidad del AP

2.3 SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS

La sección 2.3 aborda la simulación de los tres escenarios propuestos en NS-3, se presentan las simulaciones obtenidas de cada escenario, lo que proporciona una visión completa desde el inicio hasta el fin de la simulación, lo que permite comprender de mejor forma las diferentes pruebas en los escenarios modelados.

Para la implementación de los escenarios, se crearon tres programas, uno por cada escenario, en donde se pueden cambiar los parámetros que se describieron en la **Tabla 2.1.** para cada escenario de simulación. Mediante las clases, módulos y métodos explicados en el literal 2.2, se obtuvo las siguientes animaciones de los escenarios

2.3.1 PRIMER ESCENARIO

En el primer escenario, que utiliza estaciones estáticas y se obtiene la **Figura 2.4.** Debido a que es un escenario sin movimiento, en todo el tiempo de simulación, permanecen estáticos.

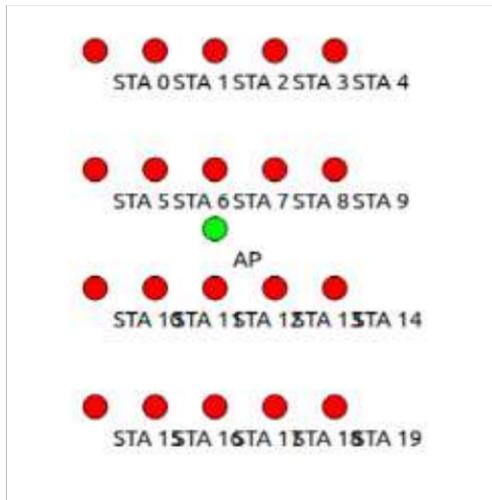


Figura 2.4. Diagrama en NS-3 del Escenario 1

Existen ciertos cambios en la animación del escenario 1, cuando se realizaron las pruebas de variación de número de nodos y la variación de distancias entre nodos con respecto al eje horizontal, como se observa en la **Figura 2.5.** y en la **Figura 2.6.**

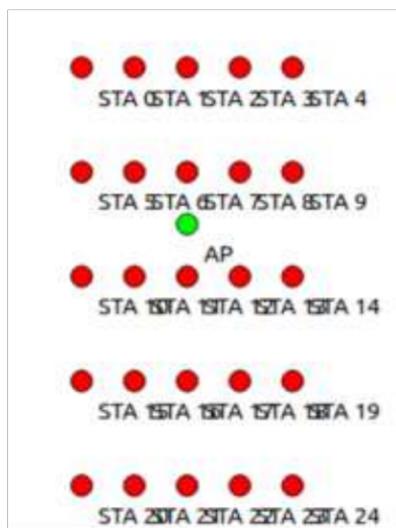


Figura 2.5. Escenario 1 con 25 STA

Para la **Figura 2.5.** existe una variación de la animación ya que aumenta el número de nodos, de la misma forma, se observa el mismo efecto en este tipo de pruebas donde existe la variación de nodos.



Figura 2.6. Escenario 1 con STA más lejanas al AP

En la **Figura 2.6.** existe una variación de la animación debido a la variación de distancia con respecto al eje x u horizontal, de tal forma que, las STA están más lejanas del AP, igualmente, se observa el mismo efecto en este tipo de pruebas donde se varia la distancia de los nodos.

2.3.2 SEGUNDO ESCENARIO

El segundo escenario, que incorpora estaciones móviles, se muestra la **Figura 2.7.** Dado que se trata de un entorno en movimiento, se observa una variación de la posición de la STA a lo largo de la simulación, mientras que, el AP permanece en un único punto fijo.

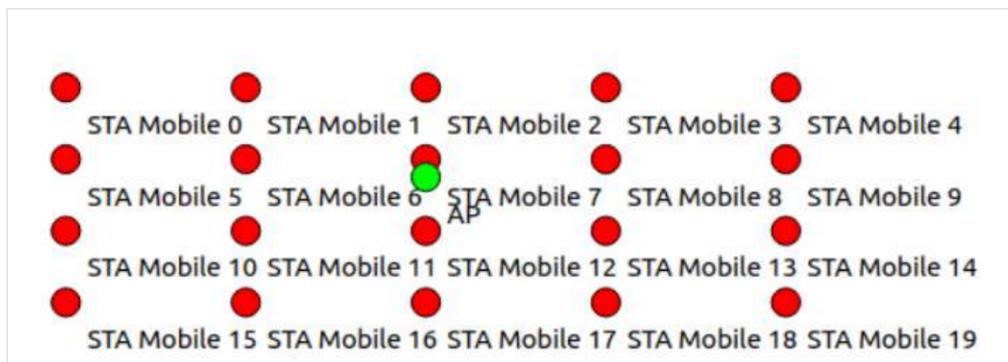


Figura 2.7. Escenario 2 al inicio de la simulación

Al implementar un movimiento aleatorio en las STA, la simulación finaliza con la generación de la **Figura 2.8.** Se exploraron variaciones en parámetros, como el tamaño del paquete, el ancho de banda, tasa de codificación y modulación, etc. Al realizar diversas pruebas, con estas variaciones de parámetros y obtener los resultados de animación, no se registran

cambios en las animaciones. Esto indica que se mantiene el mismo movimiento observado en la **Figura 2.8** a lo largo de las pruebas realizadas.

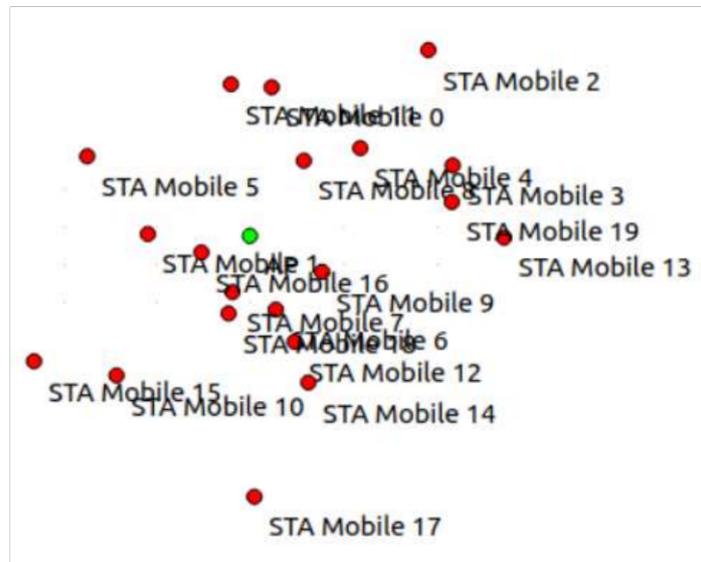


Figura 2.8. Escenario 2 al finalizar la simulación

Se observan cambios en la simulación al realizar pruebas que varían el número de nodos. Como resultado de estas pruebas, se obtiene la **Figura 2.9.**, al incrementar el número de nodos, se aprecia una alteración en la animación en comparación con la **Figura 2.8.**

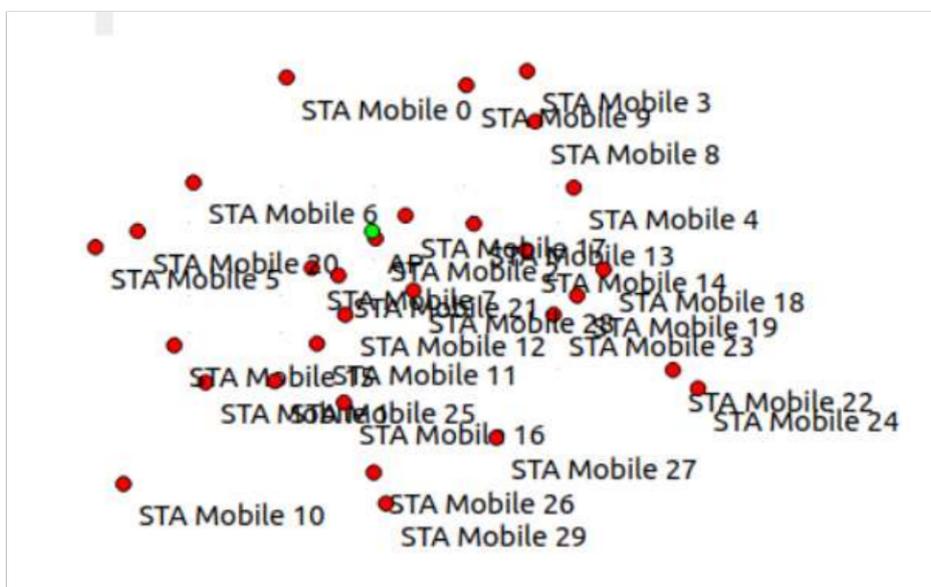


Figura 2.9. Escenario 2 con 30 STAs

2.3.3 TERCER ESCENARIO

En el tercer escenario, se muestra la **Figura 2.10.** Dado que se trata de un entorno que se compone con nodos estáticos y móviles, se observa una variación de la posición de las

STA en movimiento a lo largo de la simulación, mientras que, las STA estáticas y el AP permanece en sus posiciones fijos.

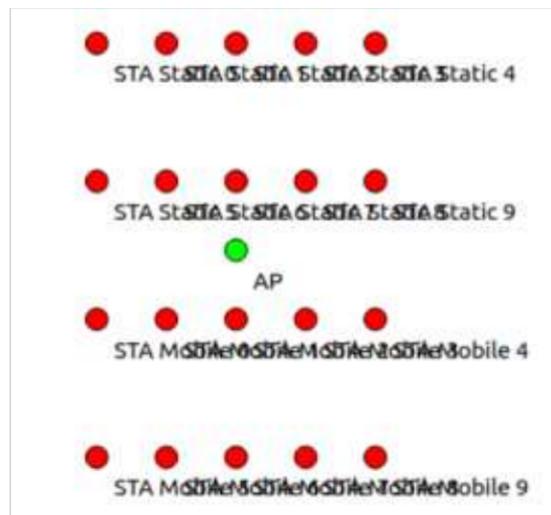


Figura 2.10. Escenario 3 al inicio de la simulación

Al implementar un movimiento aleatorio en las STA móviles y mantener las posiciones las STA estáticas, la simulación concluye con la generación de la **Figura 2.11**. Se exploraron variaciones en parámetros, como el tamaño del paquete, el ancho de banda, tasa de codificación y modulación, etc. No se observaron cambios significativos en relación de la animación del escenario 3 entre las diferentes pruebas, lo que indica que se mantiene el mismo patrón de movimiento aleatorio en las STA móviles, mientras las STA estáticas y el AP permanecen en las mismas posiciones.



Figura 2.11. Escenario 3 al finalizar la simulación

De forma parecida al escenario 2, se observan cambios en la simulación al realizar pruebas que varían el número de nodos. Como resultado de estas pruebas, se genera la **Figura**

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo, se presenta un análisis de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas mediante el módulo IEEE 802.11ax. Además, se incluyen las conclusiones y recomendaciones finales de este caso de estudio. El análisis se centra en evaluar el rendimiento y comportamiento de los escenarios de simulación con condiciones específicas de Wi-Fi 6, de tal forma, que se observe como la modificación de algunos parámetros impactan en la eficiencia y efectividad del protocolo.

3.1 RESULTADOS

Para comprender y analizar el comportamiento del estándar IEEE 802.11ax en diferentes escenarios de simulación, se lleva a cabo una recolección de datos mediante simulaciones. Durante estas simulaciones, se varían algunos parámetros clave. La forma para evaluar el rendimiento del estándar IEEE 802.11ax en cada escenario se lo realiza mediante el cálculo del total de paquetes perdidos. Esta métrica proporcionara una visión del rendimiento de Wi-Fi 6. Además, se utilizará el porcentaje de paquetes perdidos que se la calcula con la **Ecuación 3.1.** y el cálculo del porcentaje de paquetes que llegan correctamente que se lo realiza con la **Ecuación 3.2.** para verificar el rendimiento de la red [20].

$$\%P_{perdidos} = \frac{P_{perdidos}}{P_{totales}} * 100 \quad \text{Ecuación 3.1. Porcentaje de paquetes perdidos}$$

Donde:

- $\%P_{perdidos}$: Porcentaje de paquetes perdidos.
- $P_{perdidos}$: Paquetes perdidos
- $P_{totales}$: Paquetes totales

$$\% \eta = 100 - \%P_{perdidos} \quad \text{Ecuación 3.2. Porcentaje de paquetes que llegan correctamente.}$$

Donde:

- $\% \eta$: % Paquetes que llegan correctamente
- $\%P_{perdidos}$: Porcentaje de paquetes perdidos.

3.1.1 ANÁLISIS DEL PRIMER ESCENARIO

Los resultados obtenidos del primer escenario incluyen el número de paquetes perdidos durante la transmisión, el porcentaje de paquetes perdidos y porcentaje de paquetes que llegan correctamente ($\% \eta$).

En el primer conjunto de pruebas donde se mantienen constantes la cantidad de nodos, el intervalo de transmisión, el MCS, la distancia fija al AP, pero varía el AB, genera como resultados obtenidos de las simulaciones los presentados en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1. Resultados por variación del ancho de banda del escenario 1

Variación de Ancho de banda del canal								
AB	20 MHz		40 MHz		80 MHz		160 MHz	
	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP
Paquetes perdidos	311	312	324	333	275	271	265	258
Paquetes totales	2600		2600		2600		2600	
$\% P_{\text{perdidos}}$	12,00		12,81		10,42		9,92	
$\% \eta$	88,00		87,19		89,58		90,08	

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.1.**, se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.1.** y **Figura 3.2.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y $\% \eta$ a medida que se modifica el que el ancho de banda del canal de transmisión.

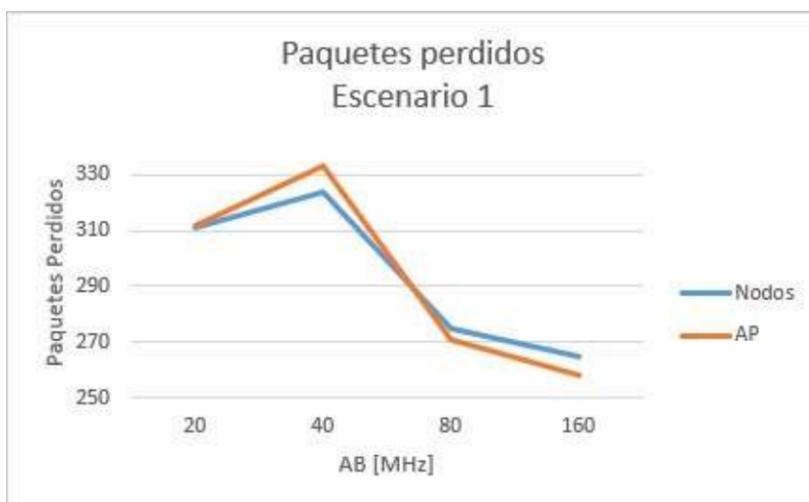


Figura 3.1. Paquetes perdidos vs Ancho de banda en escenario 1

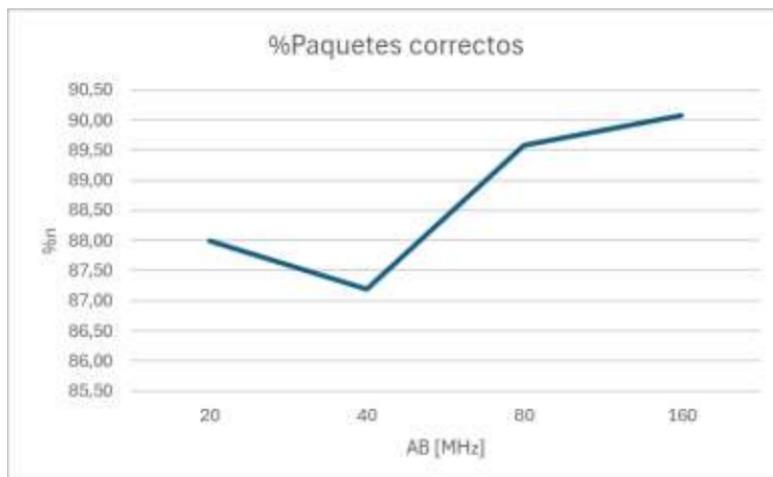


Figura 3.2. % Paquetes que llegan correctamente vs AB del escenario 1

Los resultados presentados en la **Figura 3.1.** y la **Figura 3.2.** proponen que a los 40 MHz tiende a reducir la eficacia de transmisión y a medida que el ancho de banda del canal se incrementa, particularmente a 160 MHz, se observa una disminución en la pérdida de paquetes. Además, se destaca que el $\% \eta$ alcanza un 90%, lo cual indica un rendimiento alto de la red.

En el segundo conjunto de pruebas donde se tiene constante un intervalo de transmisión, un MCS, una distancia fija al AP, tamaño del paquete y ancho de banda del canal, mientras que el número de nodos varía en cada prueba, se obtiene los resultados de las simulaciones resumidos en la **Tabla 3.2.**

Tabla 3.2. Resultados por variación del número de nodos del escenario 1

Variación del número de nodos														
#Nodos	20		25		30		35		40		45		50	
	Nodos	AP												
# de Paquetes perdidos	324	333	435	439	531	523	668	664	815	808	531	518	765	756
Paquetes totales	2600		3250		3900		4550		5200		5850		6500	
%Pperdidos	12,81		13,51		13,41		14,59		15,54		8,85		11,63	
$\% \eta$	87,19		86,49		86,59		85,41		84,46		91,15		88,37	

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.2.**, se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.3.** y **Figura 3.4.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y $\% \eta$ a medida que se modifica el número de nodos.

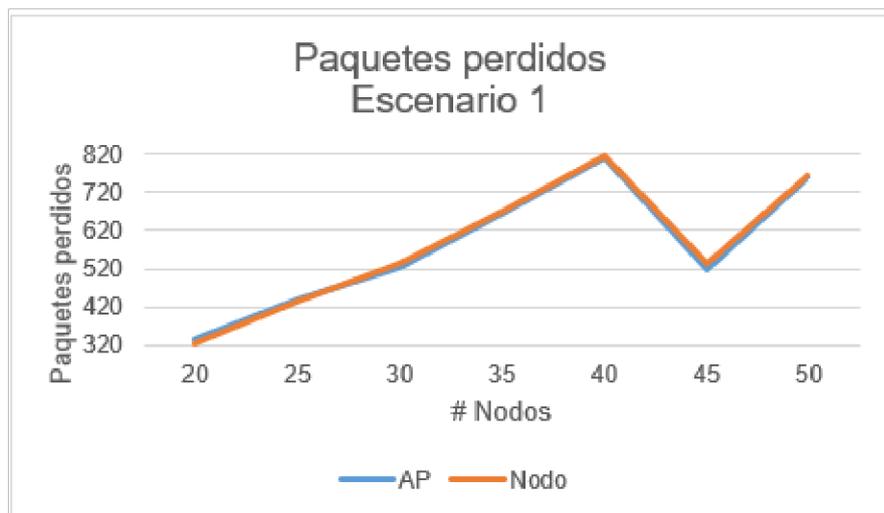


Figura 3.3. Paquetes perdidos vs número de nodos en escenario 1

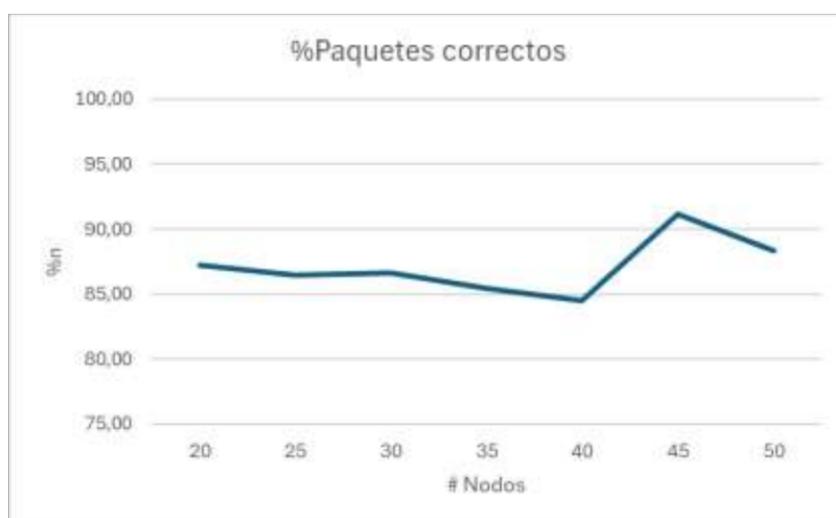


Figura 3.4. %Paquetes que llegan correctamente vs número de nodos del escenario 1

Los resultados presentados en la **Figura 3.3.** y la **Figura 3.4.** proponen que a medida que el número de paquetes va aumentando, se observa un aumento en la pérdida de paquetes. Además, el $\% \eta$ empieza a disminuir. Los dos últimos resultados son atípicos, esto se debe a que se excedió el número de paquetes transmitidos en el simulador NS-3, dando como resultado un valor atípico, ya que la tendencia es que la pérdida de paquetes vaya en aumento y el $\% \eta$ empiece a disminuir.

En el tercer conjunto de pruebas que tiene constante un AB de canal, un intervalo de transmisión, un MCS, una distancia fija al AP, mientras que el tamaño del paquete de transmisión que varía en cada prueba, los resultados obtenidos de las simulaciones se resumen **Tabla 3.3.**

Tabla 3.3. Resultados por variación del tamaño del paquete en escenario 1

Variación del tamaño del paquete												
Tamaño del Paquete	128 B		256 B		512 B		1024 B		2048 B		4096 B	
	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP
Paquetes perdidos	328	327	339	341	325	328	331	327	340	338	144	138
Paquetes totales	2600		2600		2600		2600		2600		2600	
%Pperdidos	12,58		13,12		12,62		12,58		13,00		5,31	
% η	87,42		86,88		87,38		87,42		87,00		94,69	

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.3.**, se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.5.** y **Figura 3.6.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el % η a medida que se modifica el tamaño de paquete a enviar.

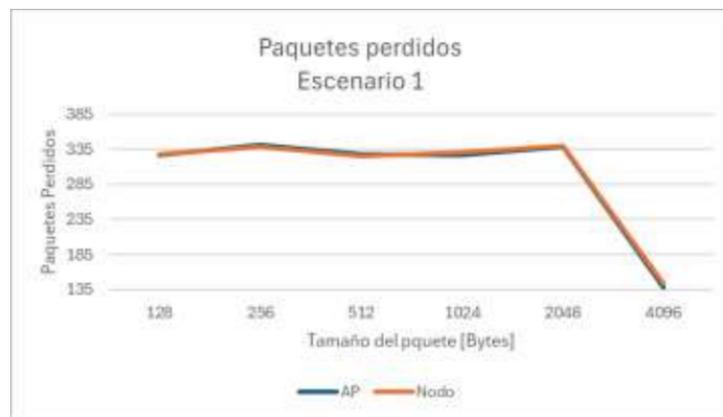


Figura 3.5. Paquetes perdidos vs tamaño de paquete en escenario 1

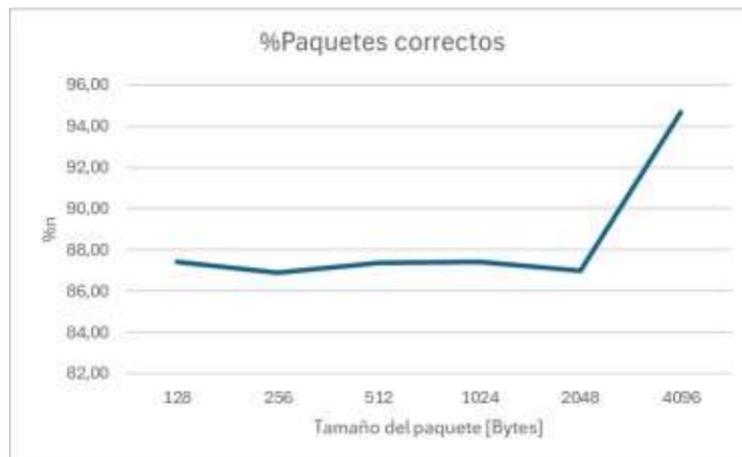


Figura 3.6. %Paquetes que llegan correctamente vs tamaño del paquete del escenario 1

Los resultados presentados en la **Figura 3.5.** y la **Figura 3.6.** proponen que a medida que el tamaño del paquete va aumentando, se observa que no existe un cambio significativo del número de paquetes perdidos. De forma similar, el % η no cambia mientras se cambia

el tamaño del paquete. De la misma forma que el escenario anterior, al realizar la prueba con 4096 Bytes se obtuvo el mensaje que se excedió el número de paquetes transmitidos en el simulador NS-3, dando como resultado un valor atípico.

En el cuarto conjunto de pruebas que tiene constante un AB de canal, tamaño del paquete, un MCS, una distancia fija al AP, mientras que el intervalo del tiempo transmisión que varía en cada prueba, los resultados obtenidos de las simulaciones se resumen en **Tabla 3.4.**

Tabla 3.4. Resultados por variación el intervalo de transmisión en escenario 1

Variación del intervalo de transmisión												
Intervalo de tiempo de transmisión	10 S		7.5 S		5 S		2.5 S		1 S		0.1 S	
	Nodos	AP										
Paquetes perdidos	117	117	144	145	143	145	198	200	324	333	357	343
Paquetes totales	260		347		520		1040		2600		26000	
%Pperdidos	45,00		41,79		27,88		19,23		12,81		1,32	
% η	55,00		58,21		72,12		80,77		87,19		98,68	

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.4.**, se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.7.** y **Figura 3.8.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el % η a medida que se modifica el intervalo de transmisión entre paquetes.

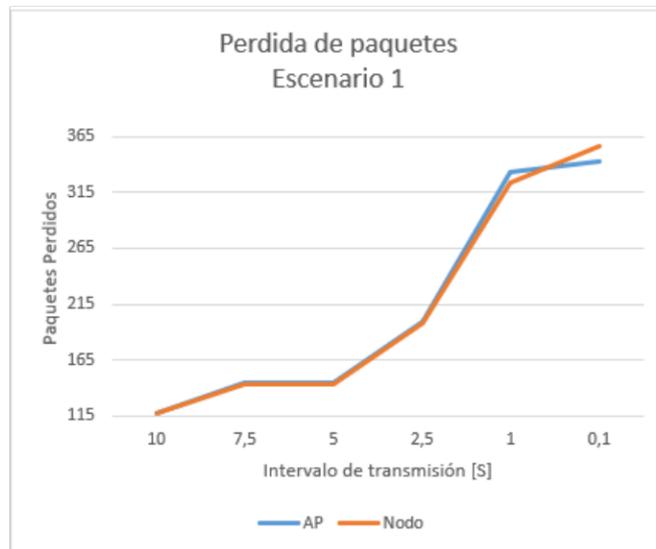


Figura 3.7. Paquetes perdidos vs intervalo de tiempo de transmisión escenario 1

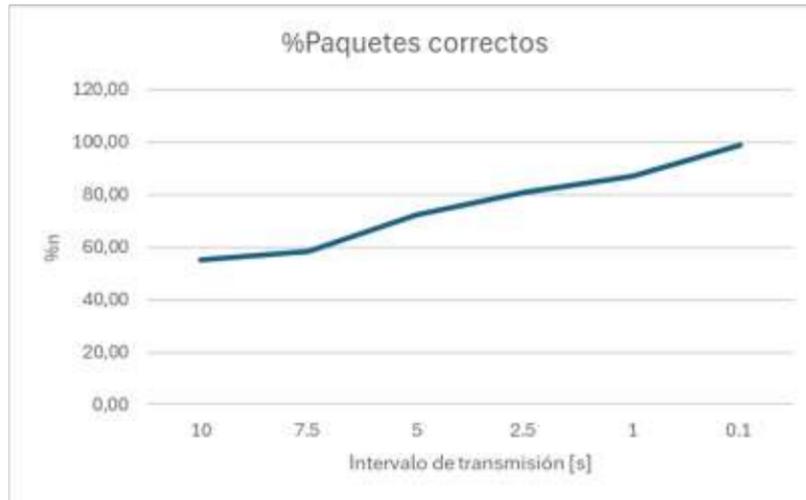


Figura 3.8. %Paquetes que llegan correctamente vs intervalo de transmisión del escenario 1

De los resultados presentados en la **Figura 3.7.** y la **Figura 3.8.** se observa que a medida que el intervalo de transmisión va variando, existe un aumento en el número de paquetes perdidos. Por otro lado, el % η va en aumento, esto se debe a que al disminuir el intervalo de tiempo entre paquetes, da como resultado el aumento de la cantidad de paquete transmitidos; es decir, que mientras el intervalo de transmisión de paquetes es de 10 segundos, se transmiten un total de 260 paquetes en total por todos los nodos, mientras que al configurar el intervalo de transmisión a 0.1 segundos, se transmiten un total de 26000 paquetes en total por todos los nodos, si se compara la cantidad de paquetes transmitidos con la cantidad de paquete perdidos, se obtiene un 1.32% de paquetes perdidos.

En el quinto conjunto de pruebas que tiene constante un AB de canal, tamaño del paquete, un tiempo de transmisión, el MCS, mientras que la distancia de los nodos con el AP que varía en cada prueba, los resultados están resumidos en la **Tabla 3.5.**

Tabla 3.5. Resultados obtenidos por variación de distancia en escenario 1

Variación de distancia en el eje horizontal								
distancia	2.5 m		5 m		7.5 m		10 m	
	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP
Paquetes perdidos	324	333	303	308	248	252	266	271
Paquetes totales	2600		2600		2600		2600	
%Pperdidos	12,81		11,85		9,69		10,42	
% η	87,19		88,15		90,31		89,58	

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.5.**, se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.9.** y **Figura 3.10.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el % η a medida que se modifica la distancia entre nodos.

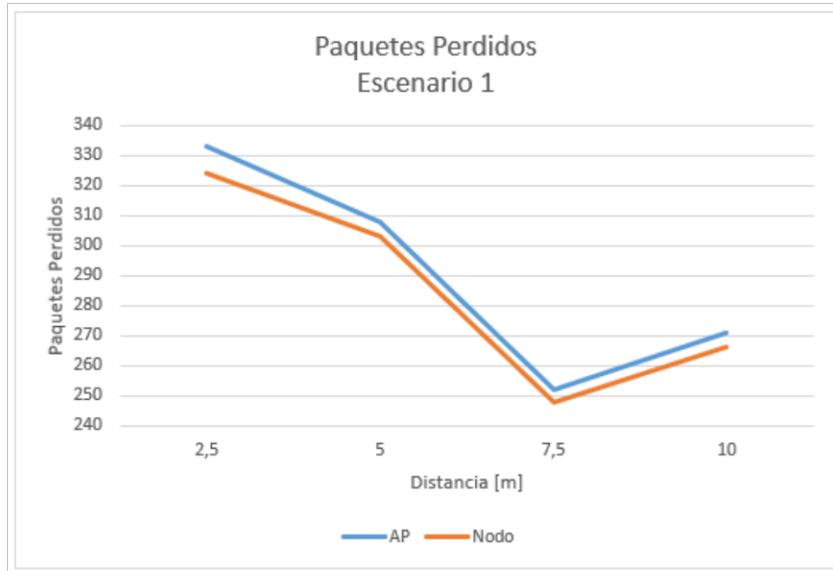


Figura 3.9. Paquetes perdidos vs distancia escenario 1

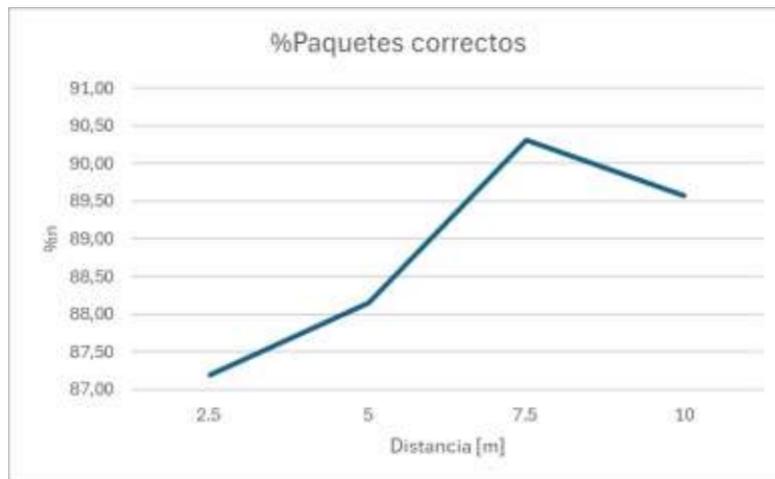


Figura 3.10. %Paquetes que llegan correctamente vs intervalo de transmisión del escenario 1

Los resultados presentados en la **Figura 3.9.** y la **Figura 3.10.** proponen que a medida que la distancia va aumentando. Se observa que existe una disminución en el número de paquetes perdidos. Además, el % η va en aumento, esto se debe a que al incrementar la distancia entre STAs, pero seguir en el rango de cobertura de la red, disminuye el solapamiento de paquetes entre las estaciones.

En el sexto conjunto de pruebas que tiene constante un AB de canal, tamaño del paquete, un tiempo de transmisión, una distancia al AP, mientras que MCS que varía en cada prueba, los resultados están resumidos en la **Tabla 3.6**.

Tabla 3.6. Resultados por variación de MCS en escenario 1

Variación del MCS												
MCS	HeMcs6		HeMcs7		HeMcs8		HeMcs9		HeMcs10		HeMcs11	
	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP
Paquetes perdidos	310	314	311	314	302	300	334	337	311	314	303	308
Paquetes totales	2600		2600		2600		2600		2600		2600	
%Pperdidos	12,08		12,08		11,54		12,96		12,08		11,85	
% η	87,92		87,92		88,46		87,04		87,92		88,15	

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.6.**, se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.11.** y **Figura 3.12.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el % η a medida que se modifica el MCS.

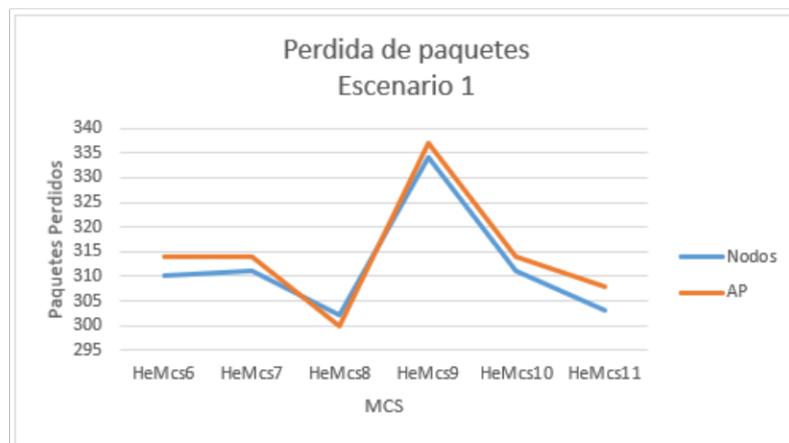


Figura 3.11. Paquetes perdidos vs MCS escenario 1

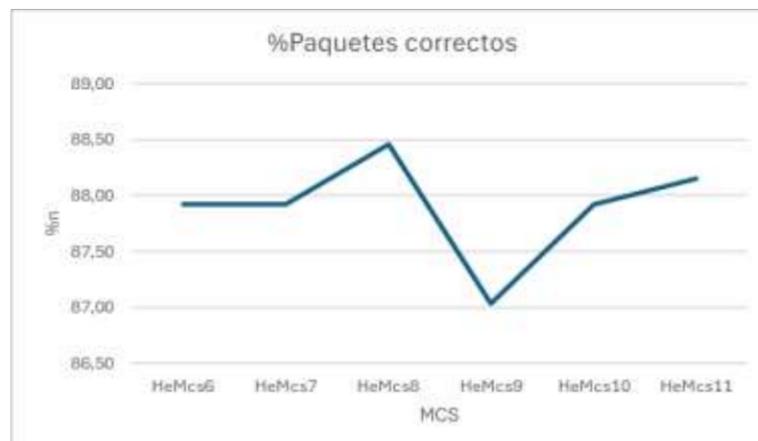


Figura 3.12. %Paquetes que llegan correctamente vs del MCS escenario 1

Los resultados presentados en la **Figura 3.11.** y la **Figura 3.12.** proponen que a medida que el MCS va cambiando, no se observa un cambio significativo en el número de paquetes perdidos de la cantidad de paquetes. De la misma forma, el $\% \eta$ no varía mucho en las diferentes pruebas.

3.1.2 ANÁLISIS DEL SEGUNDO ESCENARIO

Los resultados obtenidos del segundo escenario constan del número de paquetes perdidos durante la transmisión y el $\% \eta$, en el primer conjunto de pruebas que tiene constante una cantidad de nodos, un intervalo de transmisión, un MCS, una distancia fija al AP, mientras que el AB del canal varía en cada prueba, los resultados obtenidos de las simulaciones están resumidos en la **Tabla 3.7.**

Tabla 3.7. Resultados por variación del ancho de banda en escenario 2

AB	Variación de Ancho de banda del canal							
	20 MHz		40 MHz		80 MHz		160 MHz	
	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP
Paquetes perdidos	315	322	359	357	333	322	286	279
Paquetes totales	2600		2600		2600		2600	
%Pperdidos	12,38		13,73		12,38		10,73	
$\% \eta$	87,62		86,27		87,62		89,27	

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.7.**, se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.13.** y **Figura 3.14.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el $\% \eta$ a medida que se modifica el AB.

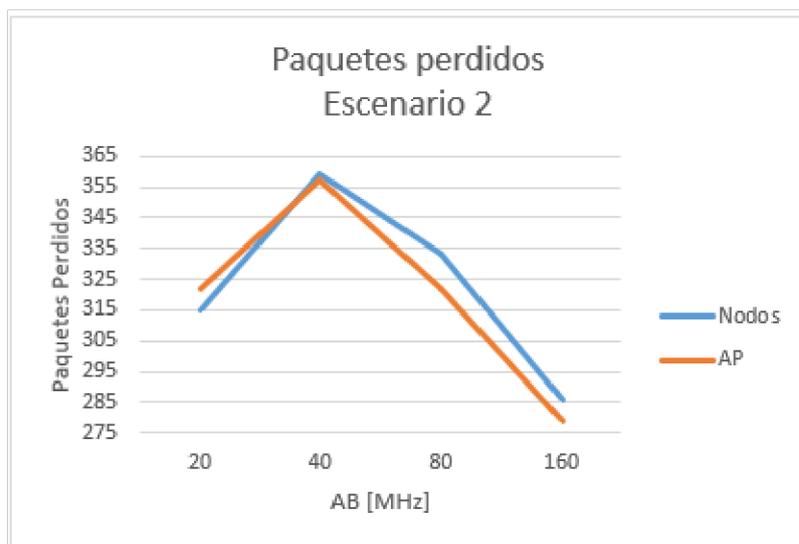


Figura 3.13. Paquetes perdidos vs Ancho de banda en escenario 2

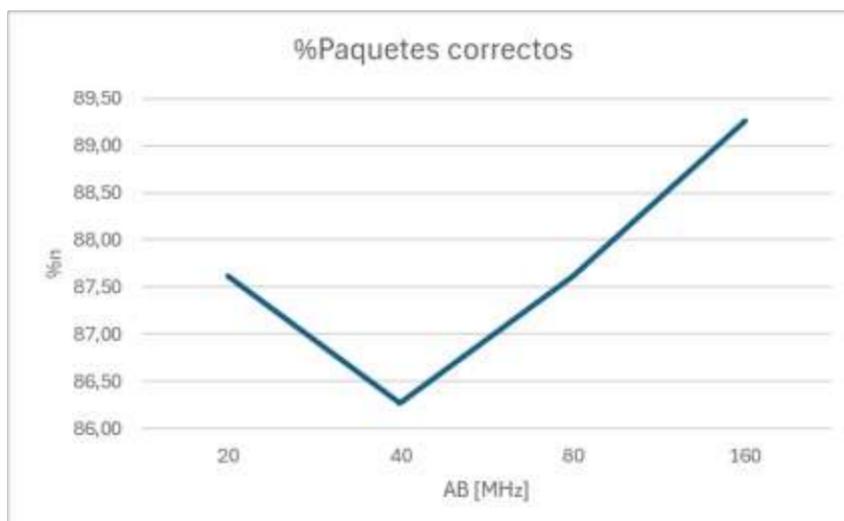


Figura 3.14. %Paquetes que llegan correctamente vs AB del escenario 2

Los resultados presentados en la **Figura 3.13.** y la **Figura 3.14.** proponen que a los 40 MHz empieza a reducir el e; $\% \eta$ a medida que el ancho de banda del canal se incrementa, se observa una disminución en la pérdida de paquetes y una mejora en el $\% \eta$ de los paquetes también incrementa.

En el segundo conjunto de pruebas que tiene constante un AB de canal, un intervalo de transmisión, un MCS, una distancia fija al AP, mientras que el número de nodos que varía en cada prueba, los resultados obtenidos de las simulaciones se resumen en **Tabla 3.8.**

Tabla 3.8. Resultados por variación del número de nodos en escenario 2

#Nodos	Variación del número de nodos													
	20		25		30		35		40		45		50	
	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP
Paquetes perdidos	359	357	416	425	585	583	360	370	762	776	858	845	890	894
%Pperdidos	13,73		13,08		14,95		8,13		14,92		14,44		13,75	
$\% \eta$	86,27		86,92		85,05		91,87		85,08		85,56		86,25	

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.8.**, se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.15.** y **Figura 3.16.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el $\% \eta$ a medida que se modifica el número de nodos.

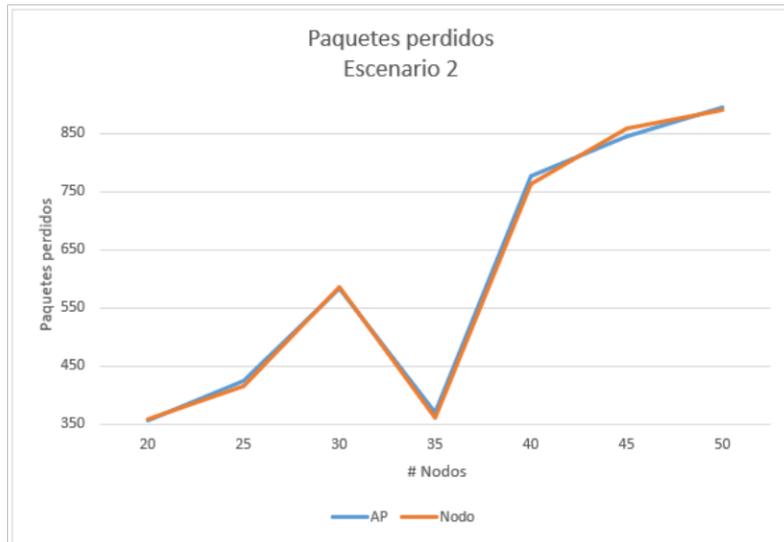


Figura 3.15. Paquetes perdidos vs número de nodos en escenario 2

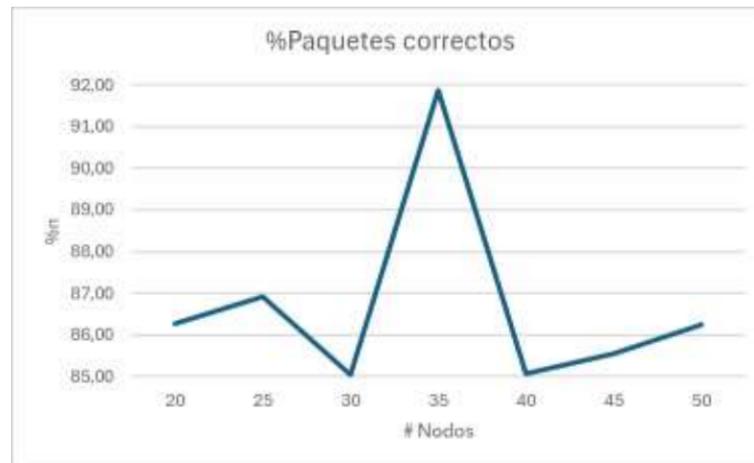


Figura 3.16. %Paquetes que llegan correctamente vs número de nodos del escenario 2

Los resultados presentados en la **Figura 3.15.** y la **Figura 3.16.** proponen que a medida que el número de nodos se incrementa, se observa un aumento en la pérdida de paquetes. Por otro lado, el η permanece en un rango en donde no varía, esto se debe a que, al aumentar el número de nodos, también se aumenta el número de paquetes transmitidos, por lo tanto, aunque haya 894 paquetes perdidos cuando se tiene 50 nodos, los paquetes transmitidos, también, aumentan a 6500 por todos las STAs.

En el tercer conjunto de pruebas que tiene constante un AB de canal, un intervalo de transmisión, un MCS, una distancia fija al AP, mientras que el tamaño del paquete de transmisión que varía en cada prueba, los resultados están resumidos en la **Tabla 3.9.** obtenidos de las simulaciones.

Tabla 3.9. Resultados por variación del tamaño del paquete en escenario 2

Variación del tamaño del paquete												
Tamaño del Paquete	128 B		256 B		512 B		1024 B		2048 B		4096 B	
	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP
Paquetes perdidos	321	326	338	339	329	334	359	357	353	348	232	213
Paquetes totales	2600		2600		2600		2600		2600		2600	
%Pperdidos	12,54		13,04		12,85		13,73		13,38		8,19	
% η	87,46		86,96		87,15		86,27		86,62		91,81	

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.9.**, se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.17.** y **Figura 3.18.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el % η a medida que se modifica el tamaño del paquete.

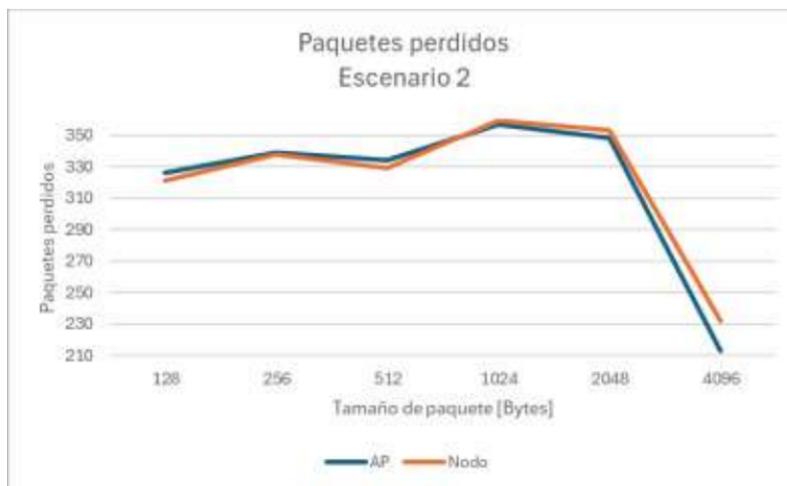


Figura 3.17. Paquetes perdidos vs tamaño de paquete en escenario 2

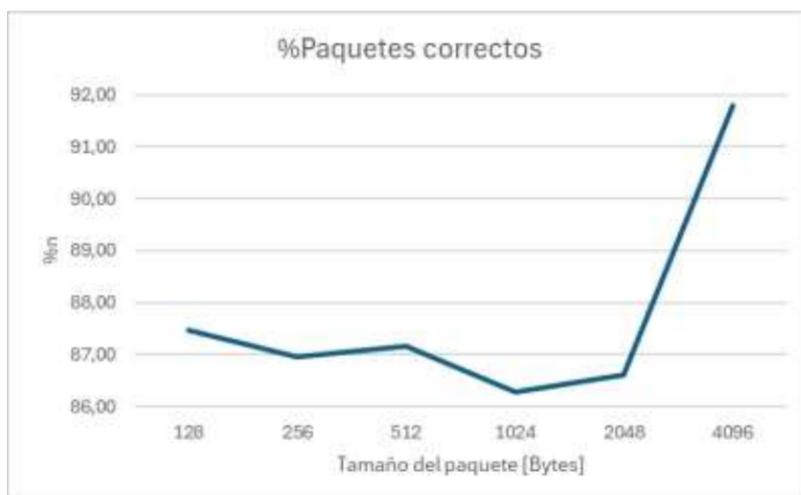


Figura 3.18. %Paquetes que llegan correctamente vs tamaño del paquete del escenario

Los resultados presentados en la **Figura 3.17.** y la **Figura 3.18.** proponen que a medida que el tamaño del paquete va aumentando, se observa que no existe un cambio significativo de la cantidad de la pérdida de paquetes. Por otro lado, el % η no cambia mientras se cambia el tamaño del paquete. De la misma forma que el escenario anterior, al realizar la prueba con 4096 Bytes se obtuvo el mensaje que se excedió el número de paquetes transmitidos en el simulador NS-3, dando como resultado un valor atípico.

En el cuarto conjunto de pruebas que tiene constante un AB de canal, tamaño del paquete, un MCS, una distancia fija al AP, mientras que el intervalo del tiempo transmisión que varía en cada prueba, los resultados obtenidos de las simulaciones se resumen en **Tabla 3.10.**

Tabla 3.10. Resultados por variación del intervalo de transmisión en escenario 2

Intervalo de tiempo de transmisión	Variación del intervalo de transmisión											
	10 s		7.5 s		5 s		2.5 s		1 s		0.1 s	
	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP
Paquetes perdidos	137	136	172	167	166	169	232	229	359	357	333	313
Paquetes totales	260		347		520		1040		2600		26000	
%Pperdidos	52,31		48,13		32,50		22,02		13,73		1,20	
% η	47,69		51,87		67,50		77,98		86,27		98,80	

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.10.**, se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.19.** y **Figura 3.20.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el % η a medida que se modifica el intervalo de transmisión.

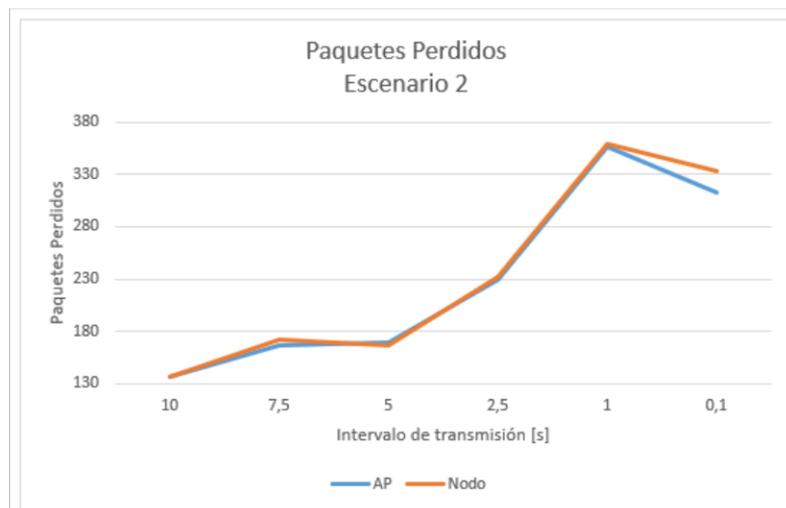


Figura 3.19. Paquetes perdidos vs intervalo de tiempo de transmisión escenario 2

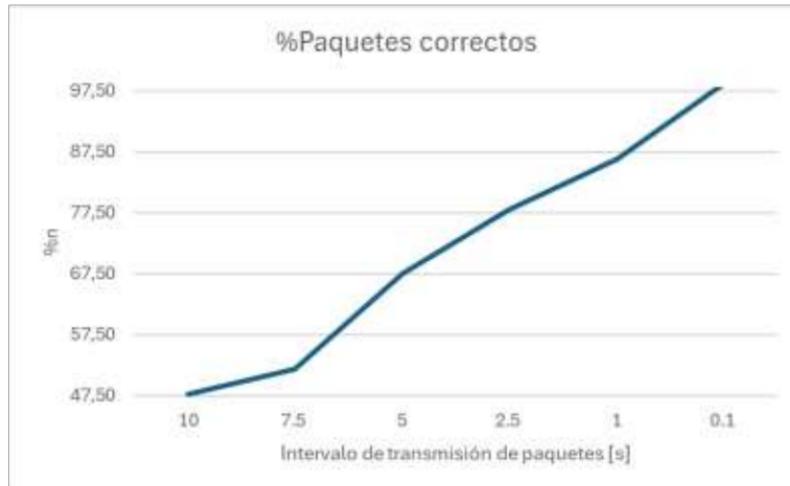


Figura 3.20. %Paquetes que llegan correctamente vs intervalo de transmisión del escenario 2

Los resultados presentados en la **Figura 3.19.** y la **Figura 3.20.** proponen que a medida que el intervalo de transmisión va variando, se observa que existe un aumento en la pérdida de la cantidad de paquetes. Por otro lado, el $\% \eta$ va en aumento, esto se debe a que al disminuir el intervalo de tiempo entre paquetes, da como resultado un aumento de la cantidad de paquete transmitidos, es decir, que mientras el intervalo de transmisión de paquetes es de 10 segundos, se transmiten un total de 260 paquetes en total por todos los nodos, mientras que al configurar el intervalo de transmisión a 0.1 segundos, se transmiten un total de 26000 paquetes en total por todos los nodos, si comparamos la cantidad de paquetes transmitidos con la cantidad de paquete perdidos, da el 1.20% de paquetes perdidos.

En el quinto conjunto de pruebas que tiene constante un AB de canal, tamaño del paquete, un tiempo de transmisión, una distancia fija al AP, mientras que la tasa de MCS que varía en cada prueba, los resultados obtenidos de las simulaciones están resumidos en la **Tabla 3.11.**

Tabla 3.11. Resultados por variación de MCS en escenario 2

Variación del MCS												
MCS	HeMcs6		HeMcs7		HeMcs8		HeMcs9		HeMcs10		HeMcs11	
	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP	Nodos	AP
Paquetes perdidos	324	326	314	313	320	324	315	316	318	321	359	357
Paquetes totales	2600		2600		2600		2600		2600		2600	
%Pperdidos	12,54		12,04		12,46		12,15		12,35		13,73	
$\% \eta$	87,46		87,96		87,54		87,85		87,65		86,27	

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.11.**, se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.21.** y **Figura 3.22.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el % η a medida que se modifica el MCS.

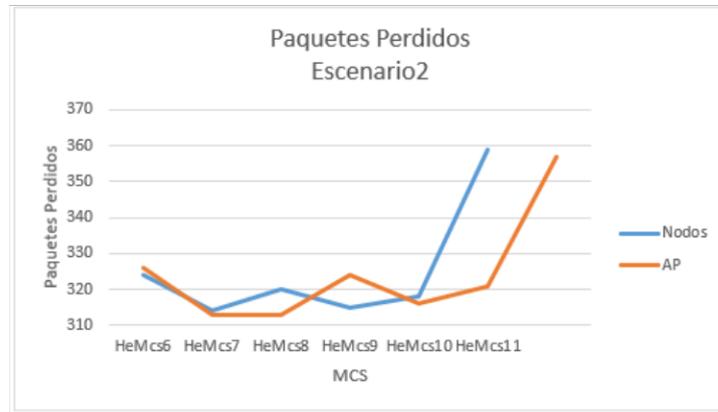


Figura 3.21. Paquetes perdidos vs MCS escenario 2

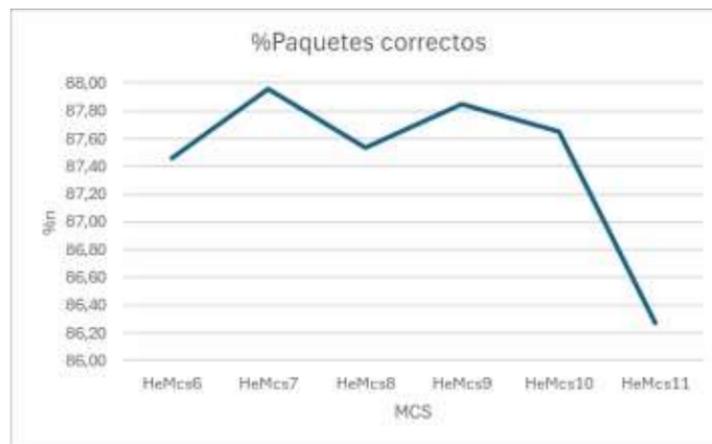


Figura 3.22. %Paquetes que llegan correctamente vs MCS en escenario 2

Los resultados presentados en la **Figura 3.21.** y la **Figura 3.22.** proponen que a medida que el MCS va cambiando, no se observa un cambio en el número de paquetes perdidos, solo cuando se utiliza un MCS11, al utilizar este Esquema de Modulación y Codificación, y tener nodos en movimiento, existe mayor posibilidad de pérdida de paquetes. De la misma forma, el % η no varía demasiado en las diferentes pruebas, excepto en el caso cuando se utiliza un MCS11, en este caso igual el % η disminuye.

3.1.3 ANÁLISIS DEL TERCER ESCENARIO

Los resultados obtenidos del tercer escenario constan del número de paquetes perdidos durante la transmisión, en el primer conjunto de pruebas que tiene constante una cantidad de nodos, un intervalo de transmisión, un MCS, una distancia fija al AP, los resultados obtenidos de las simulaciones se resumen en **Tabla 3.12.**

Tabla 3.12. Resultados por variación del ancho de banda en escenario 3

Variación del ancho de banda					
AB	Tipo de Nodo	# Paquetes perdidos	# Paquetes totales	%Pperdidos	% η
20 MHz	Nodos Estático	122	2600	4,85	95,15
	Nodos Móviles	124			
	AP	126			
40 MHz	Nodos Estático	126	2600	5,19	94,81
	Nodos Móviles	136			
	AP	135			
80 MHz	Nodos Estático	98	2600	3,88	96,12
	Nodos Móviles	100			
	AP	101			
160 MHz	Nodos Estático	91	2600	3,62	96,38
	Nodos Móviles	94			
	AP	94			

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.12.**, se genera la **Figura 3.23.** y **Figura 3.24.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el % η a medida que se modifica el AB.

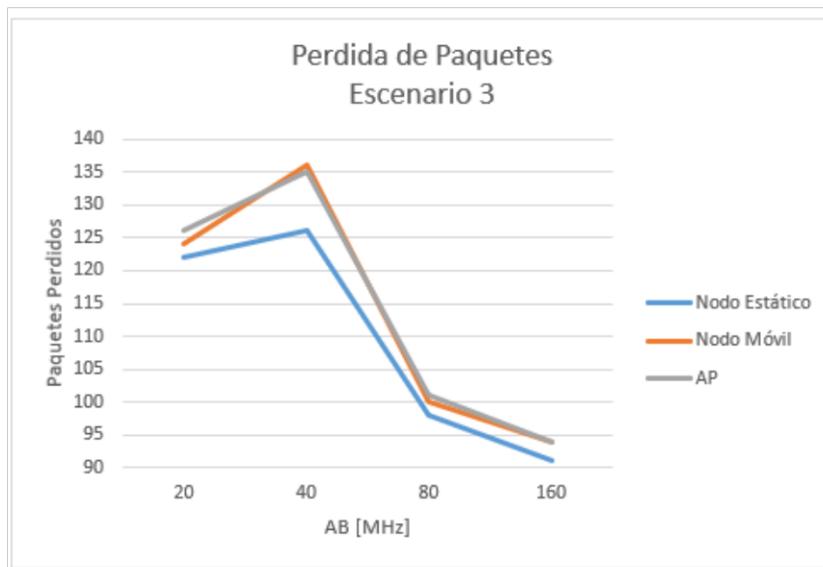


Figura 3.23. Paquetes perdidos vs Ancho de banda en escenario 3

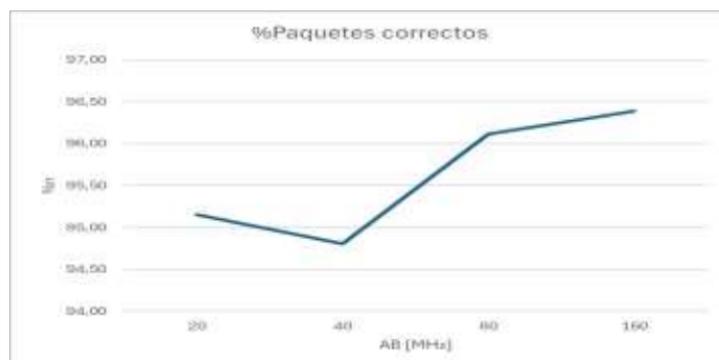


Figura 3.24. %Paquetes que llegan correctamente vs AB del escenario 3

Los resultados presentados en la **Figura 3.23.** y la **Figura 3.24.** de la misma forma que en los anteriores escenarios, se concluye que cuando el Ancho de Banda es 40 MHz tiende perder más paquetes, pero, a medida que el ancho de banda del canal se incrementa, se observa una disminución en la pérdida de paquetes. Además, el $\% \eta$ también incrementa.

En el segundo conjunto de pruebas que tiene constante un AB de canal, un intervalo de transmisión, un MCS, una distancia fija al AP, mientras que el número de nodos que varía en cada prueba, los resultados están resumidos en la **Tabla 3.13.** obtenidos de las simulaciones.

Tabla 3.13. Resultados por variación del número de nodos en escenario 3

Variación del número de nodos					
# Nodos	Tipo de Nodo	# Paquetes perdidos	# Paquetes totales	%Pperdidos	$\% \eta$
20	Nodos Estático	126	2600	5,19	94,81
	Nodos Móviles	136			
	AP	135			
25	Nodos Estático	156	3250	5,11	94,89
	Nodos Móviles	151			
	AP	166			
30	Nodos Estático	227	3900	5,82	94,18
	Nodos Móviles	236			
	AP	227			
35	Nodos Estático	256	4550	5,67	94,33
	Nodos Móviles	263			
	AP	258			
40	Nodos Estático	329	5200	6,54	93,46
	Nodos Móviles	337			
	AP	340			
45	Nodos Estático	375	5850	5,81	94,19
	Nodos Móviles	387			
	AP	340			
50	Nodos Estático	366	6500	5,55	94,45
	Nodos Móviles	396			
	AP	361			

Se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.15.** y **Figura 3.16,** en base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.13.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el % η a medida que se modifica el número de nodos.

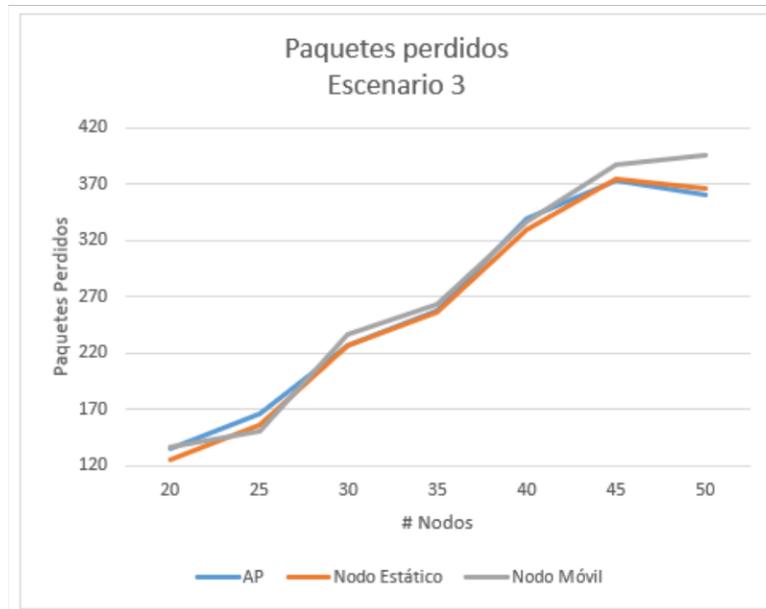


Figura 3.25. Paquetes perdidos vs número de nodos en escenario 3



Figura 3.26. %Paquetes que llegan correctamente vs número de nodos del escenario 3

Los resultados presentados en la **Figura 3.25.** y la **Figura 3.26.** proponen que a medida que el número de nodos se incrementa, donde se observa un aumento en la pérdida de paquetes. Por otro lado, el % η permanece en un rango en donde no varía mucho (93% al 95%), esto se debe a que, al aumentar el número de nodos, también se aumenta el número de paquetes transmitidos.

En el tercer conjunto de pruebas que tiene constante un AB de canal, un intervalo de transmisión, un MCS, una distancia fija al AP, mientras que el tamaño del paquete de

transmisión que varía en cada prueba, los resultados obtenidos de las simulaciones están resumidos en la **Tabla 3.14**.

Tabla 3.14. Resultados por variación del tamaño del paquete en escenario 3

Variación del tamaño del paquete					
Tamaño del paquete	Tipo de Nodo	# Paquetes perdidos	# Paquetes perdidos	%Pperdidos	% η
128 B	Nodos Estático	120	2600	4,85	95,15
	Nodos Móviles	127			
	AP	126			
256 B	Nodos Estático	120	2600	4,92	95,08
	Nodos Móviles	126			
	AP	128			
512 B	Nodos Estático	130	2600	5,15	94,85
	Nodos Móviles	138			
	AP	134			
1024 B	Nodos Estático	126	2600	5,19	94,81
	Nodos Móviles	136			
	AP	135			
2048 B	Nodos Estático	116	2600	4,92	95,08
	Nodos Móviles	128			
	AP	128			
4096 B	Nodos Estático	43	2600	1,77	98,23
	Nodos Móviles	43			
	AP	46			

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.14.**, se genera la **Figura 3.27.** y **Figura 3.28.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el % η a medida que se modifica el tamaño del paquete.

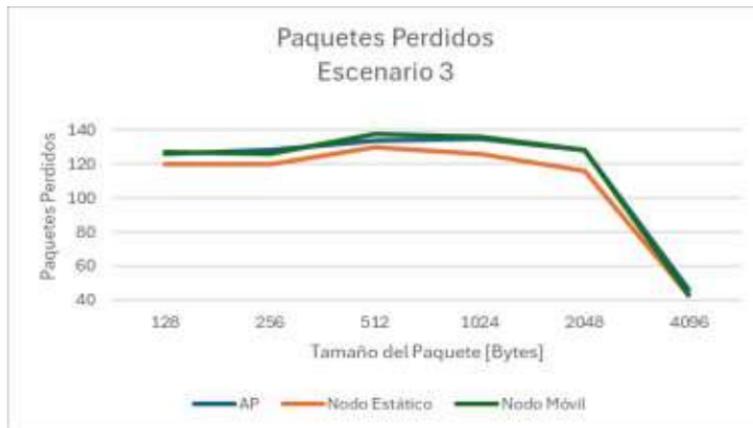


Figura 3.27. Paquetes perdidos vs tamaño del paquete en escenario 3

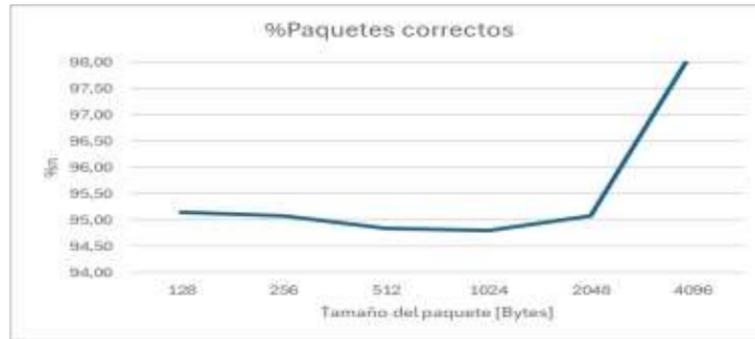


Figura 3.28. %Paquetes que llegan correctamente vs el tamaño del paquete del escenario 3

Los resultados presentados en la **Figura 3.27.** y la **Figura 3.28.** proponen que a medida que el tamaño del paquete va aumentando, se observa que no hay un cambio significativo en el número de paquetes perdidos. De la misma forma, el $\% \eta$ no cambia significativamente cuando se cambia el tamaño del paquete. Al realizar la prueba con 4096 Bytes se obtuvo el mensaje que se excedió el número de paquetes transmitidos en el simulador NS-3, dando como resultado un valor atípico.

En el cuarto conjunto de pruebas que tiene constante un AB de canal, tamaño del paquete, un MCS, una distancia fija al AP, mientras que el intervalo del tiempo transmisión que varía en cada prueba, los resultados obtenidos de las simulaciones están resumidos en la **Tabla 3.15.**

Tabla 3.15. Resultados por variación el intervalo de transmisión en escenario 3

Variación del intervalo de transmisión de paquetes					
Intervalo de transmisión de paquetes	Tipo de Nodo	# Paquetes perdidos	# Paquetes totales	%Pperdidos	$\% \eta$
10 s	Nodos Estático	43	260	17,69	82,31
	Nodos Móviles	45			
	AP	46			
7,5 s	Nodos Estático	56	347	17,00	83,00
	Nodos Móviles	58			
	AP	59			
5 s	Nodos Estático	56	520	11,35	88,65
	Nodos Móviles	58			
	AP	59			
2,5 s	Nodos Estático	81	1040	8,56	91,44
	Nodos Móviles	88			
	AP	89			
1 s	Nodos Estático	126	2600	5,19	94,81
	Nodos Móviles	136			
	AP	135			
0,1 s	Nodos Estático	154	26000	0,55	99,45
	Nodos Móviles	149			
	AP	144			

Con base a los resultados obtenidos en la **Tabla 3.15.**, se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.29.** y **Figura 3.30.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el % η a medida que se modifica el intervalo de transmisión.

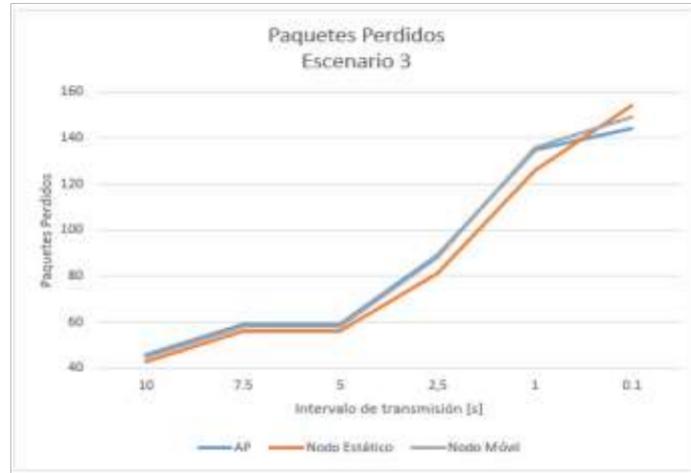


Figura 3.29. Paquetes perdidos vs intervalo de tiempo de transmisión escenario 3



Figura 3.30. %Paquetes que llegan correctamente vs intervalo de transmisión del escenario 3

De los resultados presentados en la **Figura 3.29.** y la **Figura 3.30.** se puede observar que a medida que el intervalo de transmisión va variando, existe un aumento en el número de paquetes perdidos. De igual forma, el % η va en aumento, esto se debe a que, al disminuir el intervalo de tiempo entre paquetes, da como resultado un aumento de la cantidad de paquete transmitidos.

En el quinto conjunto de pruebas que mantiene constante un AB de canal, tamaño del paquete, un tiempo de transmisión, el MCS, mientras se varía la distancia de los nodos con el AP, los resultados obtenidos de las simulaciones están resumidos en la **Tabla 3.16.**

Tabla 3.16. Resultados por variación de la distancia en escenario 3

Variación de la distancia entre nodos					
Distancia	Tipo de Nodo	# Paquetes perdidos	# Paquetes totales	%Pperdidos	% η
2,5 m	Nodos Estático	126	2600	5,19	94,81
	Nodos Móviles	136			
	AP	135			
5 m	Nodos Estático	98	2600	3,77	96,23
	Nodos Móviles	102			
	AP	98			
7,5 m	Nodos Estático	99	2600	4,04	95,96
	Nodos Móviles	102			
	AP	105			
10 m	Nodos Estático	90	2600	3,58	96,42
	Nodos Móviles	93			
	AP	93			

Con la **Tabla 3.16.**, se obtienen los gráficos presentados en la **Figura 3.31.** y **Figura 3.32.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el % η a medida que se modifica la distancia entre nodos.

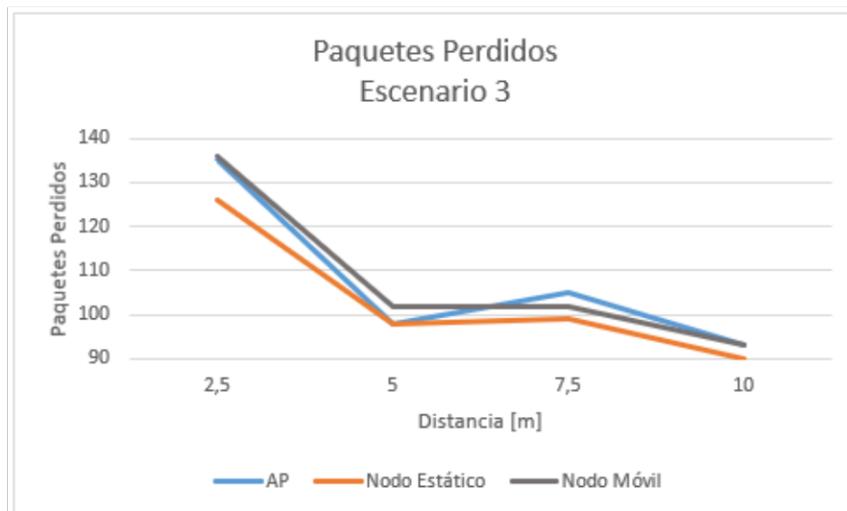


Figura 3.31. Paquetes perdidos vs distancia escenario 3



Figura 3.32. %Paquetes que llegan correctamente vs intervalo de transmisión del escenario 3

De los resultados presentados en la **Figura 3.31.** y la **Figura 3.32.** se observa que a medida que la distancia va aumentando, existe una ligera disminución en la pérdida de la cantidad de paquetes. Además, el $\% \eta$ aumenta, esto se debe a que al incrementar la distancia entre STAs, disminuye el solapamiento de paquetes entre STAs, dando como resultado la reducción de la pérdida de paquetes de los nodos.

En el sexto conjunto de pruebas que tiene constante un AB de canal, tamaño del paquete, un tiempo de transmisión, una distancia al AP, mientras que MCS que varía en cada prueba, los resultados obtenidos de las simulaciones se resumen en la **Tabla 3.17.**

Tabla 3.17. Resultados por variación de MCS en escenario 3

Variación del MCS					
MCS	Tipo de Nodo	# Paquetes perdidos	# Paquetes totales	%Pperdidos	$\% \eta$
HeMcs6	Nodos Estático	109	2600	4,23	95,77
	Nodos Móviles	118			
	AP	110			
HeMcs7	Nodos Estático	117	2600	4,38	95,62
	Nodos Móviles	117			
	AP	114			
HeMcs8	Nodos Estático	115	2600	4,62	95,38
	Nodos Móviles	122			
	AP	120			
HeMcs9	Nodos Estático	126	2600	4,69	95,31
	Nodos Móviles	126			
	AP	122			
HeMcs10	Nodos Estático	109	2600	4,04	95,96
	Nodos Móviles	110			
	AP	105			
HeMcs11	Nodos Estático	98	2600	3,77	96,23
	Nodos Móviles	102			
	AP	98			

Con los resultados obtenidos en la **Tabla 3.17.**, se elaboran los gráficos presentados en la **Figura 3.33.** y **Figura 3.34.** En estos gráficos se observa el comportamiento de los paquetes perdidos y el % η a medida que se modifica el MCS.

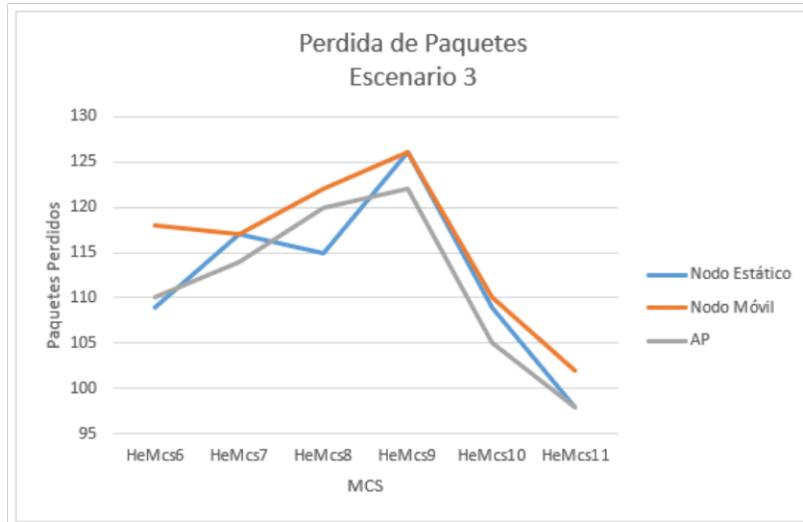


Figura 3.33. Paquetes perdidos vs MCS escenario 3

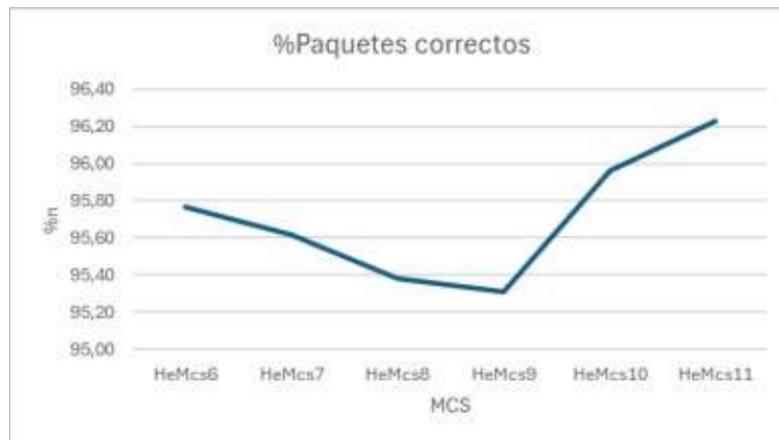


Figura 3.34. %Paquetes que llegan correctamente vs MCS en escenario 3

Los resultados presentados en la **Figura 3.33.** y la **Figura 3.34.** proponen que a medida que el MCS va cambiando, no se observa mayores cambios en el número de paquetes perdidos, de la misma forma, el % η no varía mucho en las diferentes pruebas.

3.2 CONCLUSIONES

- De los resultados de las pruebas obtenidas, se observa que, al aumentar el ancho de banda del canal, especialmente en configuraciones de 160 MHz, la pérdida de paquetes disminuye de manera significativa en los 3 escenarios de simulación, debido a una mayor capacidad de transmisión que facilita el flujo de información y reduce la pérdida de paquetes en la red.

- Las pruebas de simulación revelaron una relación directa entre el número de nodos en la red y la pérdida de paquetes. A medida que se incrementa la cantidad de nodos, aumenta la congestión en la red, lo que resulta en una mayor probabilidad de pérdida de paquetes debido a la saturación de los buffers de los nodos y del AP.
- Se encontró que, en las pruebas de simulaciones, el tamaño del paquete no tiene un impacto significativo en la pérdida de paquetes. Aunque se observa algunas variaciones, especialmente con paquetes de tamaño grandes, estos casos atípicos no representan el comportamiento general de la red.
- Reducir el intervalo de transmisión de los paquetes genera un aumento en la pérdida de paquetes. Este fenómeno se debe a una mayor saturación de los buffers de los nodos y del AP, ya que una transmisión más continua implica una mayor carga en la red.
- En el segundo y tercer escenario se observa que el uso de un MCS más alto en nodos móviles aumentó la pérdida de paquetes. Este resultado concluye que la movilidad de los nodos introduce desafíos adicionales en la transmisión de datos, especialmente a velocidades más altas.
- Se descubrió que, a mayor distancia entre los nodos, menor es la pérdida de paquetes. Este resultado destaca la importancia de la separación adecuada entre nodos para evitar la superposición de paquetes y reducir la congestión en la red.
- NS-3, aunque es un simulador poderoso, tiene sus limitaciones en la reproducción exacta de redes en entornos reales. Es crucial tener en cuenta estas limitaciones al interpretar los resultados de las simulaciones y al diseñar redes en entornos de la vida real.

3.3 RECOMENDACIONES

- Es importante mantener el software NS-3 actualizado con la versión más reciente. Esto garantiza que se pueda aprovechar al máximo las nuevas características y mejoras, especialmente aquellas relacionadas con Wi-Fi 6. Además, se recomienda considerar la instalación en un sistema operativo Linux, ya que puede hacer que la gestión del simulador sea mucho más fácil y fluida.
- La documentación oficial de NS-3 es la mejor forma de aprender cuando se trata de simular estándares como Wi-Fi 6. Se sugiere que se la consulte como la guía principal. Se puede hallar ejemplos prácticos, explicaciones detalladas y consejos

útiles que ayudan a configurar las simulaciones de manera efectiva y a obtener resultados precisos.

- Para trabajar eficientemente con NS-3, es útil tener conocimientos básicos de programación en C++. Esto permitirá comprender mejor el funcionamiento interno del simulador y se tendrá la capacidad de realizar ajustes o extensiones según sea necesario en los diferentes scripts a simular.
- Si se lleva el experimento a un entorno real en el futuro, es importante asegurarse de que todos los dispositivos, desde el punto de acceso hasta los dispositivos inalámbricos puedan conectarse a una WLAN, y sean compatibles con IEEE 802.11ax. Esto asegurará que los resultados de simulación sean aplicables en situaciones del mundo real.
- En las pruebas de simulación, es posible experimentar con diversas configuraciones de parámetros y métricas adicionales como el intervalo de guarda o el número de antenas de las estaciones, además, se puede realizar pruebas con la variación simultánea de dos parámetros. Estas pruebas permitirán obtener más información sobre cómo optimizar y mejorar el rendimiento de la WLAN en una variedad de escenarios y condiciones.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE, "IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," *IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016)*, pp. 1–4379, 2021, doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9363693.
- [2] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi, "A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 197–216, 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2871099.
- [3] NS-3, "ns-3 Tutorial Release ns-3-dev ns-3 project," 2021.
- [4] NS-3, "ns-3: ns3::HeConfiguration Class Reference." Accessed: Sep. 07, 2023. [Online]. Available: https://www.nsnam.org/docs/release/3.33/doxygen/classns3_1_1_he_configuration.html
- [5] NS-3, "ns-3: Wifi Models." Accessed: Sep. 07, 2023. [Online]. Available: https://www.nsnam.org/docs/release/3.33/doxygen/group__wifi.html#ga715d05b6312d284d44d694de5e6719e6
- [6] S. Fernández, "De 11Mbps a 11Gbps: La evolución de los estándares WiFi hasta el WiFi 802.11ax." Accessed: Jul. 26, 2023. [Online]. Available: <https://www.xatakamovil.com/conectividad/11mbps-11gbps-evolucion-estandares-wifi-wifi-802-11ax>
- [7] J. Schiller, J. S. Schiller, and A. Wesley, "Second Edition Second Edition Second Edition ADDISON-WESLEY," 2003. [Online]. Available: www.pearson-books.com
- [8] M. Gast, "3. The MAC - 802.11ac: A Survival Guide [Book]." Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.oreilly.com/library/view/80211ac-a-survival/9781449357702/ch03.html?_gl=1*_jaln*x*_ga*MzcyMzQ0MTcuMTcwNzkyMTgzNg..*_ga_092EL089CH*MTcwODE0MDgwMzC4zLjEuMTcwODE0MDg5NC42MC4wLjA.
- [9] A. Mora-Olivero, R. Macías-Lara, J. Rodríguez Vizuete, and H. Sacón-Klinger, "Estudio de la tecnología de comunicación inalámbrica en el estándar IEEE 802.11ax orientada al despliegue en Ecuador para el desarrollo del internet de las cosas," *Dominio de las Ciencias*, vol. 7, pp. 729–762, Nov. 2021, doi: 10.23857/dc.v7i4.2447.
- [10] R. Liu and N. Choi, "A First Look at Wi-Fi 6 in Action: Throughput, Latency, Energy Efficiency, and Security," *Proc. ACM Meas. Anal. Comput. Syst.*, vol. 7, no. 1, Mar. 2023, doi: 10.1145/3579451.
- [11] NS-3, "ns-3: Applications." Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.nsnam.org/docs/release/3.16/doxygen/group__applications.html
- [12] NS-3, "22. Mobility — Model Library." Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/mobility.html>
- [13] NS-3, "NetAnim 3.108 - Nsnam." Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.nsnam.org/wiki/NetAnim_3.108

- [14] NS-3, “ns-3: Network.” Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.nsnam.org/doxygen/db/d3a/group__network.html
- [15] NS-3, “ns-3: ns3::Ssid Class Reference.” Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.nsnam.org/doxygen/d0/d2e/classns3_1_1_ssid.html
- [16] NS-3, “ns-3: ns3::YansWifiPhyHelper Class Reference.” Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.nsnam.org/docs/release/3.20/doxygen/classns3_1_1_yans_wifi_phy_helper.html
- [17] A. Kisliak, “Kanban boards for project management: comparing Microsoft Planner and Jira Software - Polontech.” Accessed: Jan. 25, 2024. [Online]. Available: <https://polontech.com/blog/kanban-boards-for-project-management-comparing-microsoft-planner-and-jira-software/>
- [18] T. Žužek, J. Kušar, L. Rihar, and T. Berlec, “Agile-Concurrent hybrid: A framework for concurrent product development using Scrum,” *Concurr Eng Res Appl*, vol. 28, no. 4, pp. 255–264, Dec. 2020, doi: 10.1177/1063293X20958541.
- [19] Cisco, “Wi-Fi 6 (802.11ax) Technical Guide Overview,” 2023.
- [20] UIT-T, “Definición de parámetros de calidad de funcionamiento para aplicaciones de voz y otras aplicaciones en la banda vocal que utilizan redes del protocolo Internet,” 2003.

5. ANEXOS

ANEXO I. Códigos de los Escenarios simulados

Enlace a OneDrive: [Trabajo de Integración Curricular \(TIC\)](#)

ANEXO II. Uso de Planner para metodología Kanban

