

Simulación y evaluación de enlaces Wi-Fi para una Máquina de Tomografía Computarizada

Neidy Liliana Florido Triana

Noviembre 2025

Universidad Santo Tomás
Ingeniería de Telecomunicaciones

Contenido

Resumen	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
2.1 Definición del Problema	9
2.2 Justificación	11
3. OBJETIVOS	12
3.1 Objetivo General.....	12
3.2 Objetivos Específicos	12
4. MARCO TEÓRICO	13
4.1 Redes WLAN y Wi-Fi	13
4.2 Evolución de los estándares IEEE 802.11	14
4.3 Modulación de canal	16
4.4 Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM).....	19
4.5 Canales inalámbricos	22
4.6 Procesamiento en la recepción	24
4.7 Métricas de desempeño	26
5. METODOLOGÍA	27
6. DESARROLLO	30
7. RESULTADOS	42
7.1 Validación del cumplimiento del objetivo general	47
7.2 Ventajas del uso de herramientas de simulación en los ámbitos académico, de investigación y desarrollo	48
8. CONCLUSIONES	50
9. REFERENCIAS	52
Anexos	55

Lista de figuras

Figura 1. Señal Wi-Fi 6 con campos WLAN en el dominio del tiempo. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)	16
Figura 2. Diagramas de Constelación PSK. Fuente: LICHTMAN, Marc. *Modulación digital* [en línea]. [citado 29 septiembre 2025]. Disponible en: https://pysdr.org/es/content-es/digital_modulation.html	17
Figura 3. Diagramas de constelación QAM. Fuente: LICHTMAN, Marc. *Modulación digital* [en línea]. [citado 29 septiembre 2025]. Disponible en: https://pysdr.org/es/content-es/digital_modulation.html	18
Figura 4. Subportadoras en OFDM. Fuente: MATHWORKS. OFDM Modulator [en línea]. [citado 29 septiembre 2025]. Disponible en: https://www.mathworks.com/help/comm/ref/ofdmmod.html	21
Figura 5. Imagen de referencia de una CT Machine. Fuente: South Florida Hospital News and Healthcare Report. Siemens Healthineers announces first U.S. install of SOMATOM X.ceed premium single-source CT scanner [en línea]. 1 feb. 2022 [citado 24 oct. 20].....	31
Figura 6. Estructura básica del sistema de comunicación	31
Figura 7. Espectro de trama Wi-Fi 802.11a transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)	32
Figura 8. Espectro de trama Wi-Fi 802.11a recibida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)	32
Figura 9. Trama Wi-Fi 802.11a recibida en el tiempo. Fuente. Elaboración propia (MATLAB,2025)	33
Figura 10. Espectro de trama Wi-Fi 802.11ac transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)	34
Figura 11. Espectro de trama Wi-Fi 802.11ac recibida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)	34
Figura 12. Trama Wi-Fi 802.11ac recibida en el tiempo. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)	35
Figura 13. Diagrama de constelación de trama Wi-Fi 802.11ac. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)	35
Figura 14. Espectro de trama Wi-Fi 802.11ax transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)	36
Figura 15. Espectro de trama Wi-Fi 802.11ax recepción. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)	36
Figura 16. Trama Wi-Fi 802.11ax recibida en el tiempo. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)	37
Figura 17. Diagrama de constelación de trama Wi-Fi 802.11ax. Fuente:Elaboración propia (MATLAB, 2025)	37
Figura 18. Código de interpolación	38
Figura 19. Código de escalado de amplitud	39

Figura 20. Código de separación de partes real e imaginaria	40
Figura 21. Función de conversión a complemento a dos	40
Figura 22. Función de concatenación hexadecimal.	40
Figura 23. Función de representación hexadecimal en complemento a dos	41
Figura 24. Función de combinación	41
Figura 25. Aplicación de las funciones y archivo de la señal	41
Figura 26. Trama Wi-Fi 6 original generada. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)	43
Figura 27. Trama Wi-Fi 6 upsampled. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025).....	43
Figura 28. Trama Wi-Fi 6 recibida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025).....	44
Figura 29. Relación señal a ruido vs ángulo de posición.....	45
Figura 30. Relación señal a interferencia más ruido vs ángulo de posición.....	45
Figura 31. Constelación y espectro de la señal recibida implementando código en MATLAB. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)	46
Figura 32. Análisis en Wireless Waveform Analyzer de la señal recibida	46
Figura 33. Configuración inicial VHT	55
Figura 34. Definición del Payload en VHT	56
Figura 35. Estructura de la trama VHT 802.11ac. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)	57
Figura 36. Configuración del canal para VHT	59
Figura 37. Función de procesamiento y estimación de canal para VHT	60
Figura 38. Estimación de ruido para VHT	61
Figura 39. Proceso de ecualización para VHT	61
Figura 40. Trama 802.11ac transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025).....	62
Figura 41. Espectro de trama 802.11ac transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)	62
Figura 42. Trama 802.11ac recibida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025).....	63
Figura 43. Espectro de trama 802.11ac recibida (Channel Model-A). Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)	63
Figura 44. Constelación de símbolos recibidos 16-QAM (Channel Model-A).Fuente:Elaboración propia (MATLAB,2025)	64
Figura 45. Espectro de trama 802.11ac recibida (Channel Model-B). Fuente:Elaboración propia (MATLAB, 2025)	65
Figura 46. Constelación de símbolos recibidos 16-QAM (Channel Model-B). Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025).....	65
Figura 47. Configuración inicial para HESU	66
Figura 48. Definición del payload para HESU	67
Figura 49. Estructura de la trama HESU 802.11ax.....	68
Figura 50. Configuración del canal para HESU.....	71
Figura 51. Función de procesamiento y estimación de canal para HESU	72
Figura 52. Estimación del ruido para HESU	72
Figura 53. Ecualización para HESU	73
Figura 54. Trama 802.11ax transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025).....	73
Figura 55. Espectro de la trama 802.11ax transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)	74
Figura 56. Trama 802.11ax recibida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025).....	74

Figura 57. Espectro Trama 802.11ax recibida (Channel Model-D). Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025) 75

Figura 58. Constelación de símbolos recibidos 64-QAM (Channel Model-D). Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)..... 75

Resumen

En entornos de desarrollo, investigación e implementación de tecnologías de comunicaciones inalámbricas, se hace evidente la importancia del uso de herramientas de simulación que permitan validar prototipos y predecir el comportamiento de un sistema. Este documento describe el proceso con el cual se validó y se realizaron pruebas del prototipo de sistema de transmisión Wi-Fi para una CT Machine en Siemens Healthineers, utilizando principalmente MATLAB y su WLAN Toolbox como herramientas de generación de señales y simulación. El objetivo durante este proceso fue comprender la estructura de las tramas Wi-Fi bajo los estándares Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) y Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), analizando los diferentes esquemas de modulación, los modelos de canal que podrían afectar la transmisión, y los procesos de estimación de canal y ecualización necesarios para una recepción exitosa. Posteriormente, se lograron identificar los limitantes de los componentes de hardware del prototipo, donde se tuvo que adecuar la frecuencia de muestreo de la señal a transmitir para que se ajustara al funcionamiento del DAC y de la memoria FIFO del sistema, manteniendo el ancho de banda original.

Finalmente, se evidenciaron los efectos del canal sobre la señal, puesto que, aunque esta contaba con la potencia suficiente para garantizar una buena relación señal a ruido, posiblemente la propagación en un entorno rotatorio compuesto por elementos metálicos provocaba distorsiones en la transmisión. De esta manera, se reafirma la importancia de los elementos que permiten la sincronización de las tramas, la estimación y la ecualización del canal ya que brindan ayuda fundamental al momento de garantizar una comunicación eficiente. Durante este proceso se permitió la integración de la teoría y la práctica en el análisis y transmisión de señales Wi-Fi confirmando la importancia de la comprensión del sistema a utilizar para lograr implementar simulaciones que aporten información, y procesos de prueba que permitan implementar cambios y mejoras dentro del prototipo.

Palabras Clave: Simulación, CT Machine, Wi-Fi, OFDM, Modulación Digital, Interpolación, Estimación de canal, Ecualización, Símbolos, SNR, Canal, Campos.

1. INTRODUCCIÓN

Siemens Healthineers es una empresa multinacional de origen alemán, que se especializa en el desarrollo y comercialización de tecnología médica. Su oferta de productos y servicios más destacados tienen que ver con sistemas de Angiografía y Rayos X, Tomografía Computarizada, Oncología Radioterápica y demás sistemas de diagnóstico. Siemens Healthineers cuenta con presencia en más de 180 países y se destaca por ser líder en innovación de avances para la salud, haciéndolo de manera global y sostenible. Fue fundada en el 2017 surgiendo a partir de su empresa matriz, *Siemens*, su sede principal se encuentra ubicada en Erlangen Alemania, lugar donde se encuentra el departamento de *Technology Excellence, Medical Electronics y Predevelopment*, siendo este el departamento específico donde se realizó la pasantía. Este es el lugar en el cual se realiza la investigación y predesarrollo de tecnología médica, trabajando en este caso específico, en el desarrollo de Máquinas de Tomografía Computarizada o CT Machines donde el objetivo era implementar en ellas un sistema de telecomunicación.

En el campo de la ingeniería y del desarrollo, las herramientas de simulación desempeñan un papel fundamental en el diseño, análisis y verificación de sistemas de telecomunicaciones inalámbricos. En Siemens Healthineers, trabajando en el departamento de predesarrollo, se requirió el uso de herramientas de simulación, el WLAN Toolbox de MATLAB en específico, para el desarrollo, implementación y validación de un sistema de comunicación inalámbrico que buscaba ser aplicado a una Máquina de Tomografía Computarizada o CT Machine (*Computed Tomography Machine*). Al utilizar las funciones del WLAN Toolbox se lograba modelar el comportamiento de la transmisión y recepción de señales Wi-Fi, simulando canales

inalámbricos realistas y evaluando las características de las diferentes configuraciones de modulación. Además, esta herramienta brindó la posibilidad de tomar la señal, transmitida y recibida en el modelo real, aplicándole el procesamiento de recepción requerido, de esta manera se logra analizar la funcionalidad del prototipo físico e implementar las mejoras o ajustes pertinentes.

En el presente documento se pretende evidenciar la versatilidad y robustez que posee el WLAN Toolbox de MATLAB como una herramienta completa para la modelación de los sistemas de telecomunicaciones basados en los estándares de Wi-Fi (IEEE 802.11). Por medio de su uso, se abre la posibilidad de simular canales de transmisión inalámbrica realistas, y aplicar las funciones de procesamiento de señales requeridas en cada caso, esto facilita el análisis y validación de resultados en escenarios prácticos. De igual manera, se busca enfatizar en la importancia del uso de herramientas de simulación en contextos de formación e investigación, pues estas permiten a estudiantes, ingenieros e investigadores realizar análisis en escenarios complejos dentro de un marco controlado.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Definición del Problema

Durante el proceso de desarrollo de un prototipo de una Máquina de Tomografía Computarizada (*Computed Tomography Machine*) en la empresa Siemens Healthineers, donde se buscaba implementar un sistema de comunicación inalámbrico basado en las tecnologías Wi-Fi, con el objetivo de lograr una comunicación eficiente entre los elementos, módulos o componentes del equipo, nació la necesidad de utilizar una herramienta de simulación que permitiera realizar pruebas modelando el comportamiento de una señal al ser transmitida por un canal inalámbrico similar al real y, de esta forma, lograr analizar aspectos como el desempeño del canal, las interferencias del medio y la calidad de la transmisión. El desarrollo de prototipos y la realización de pruebas directamente sobre ellos significa adquirir costos adicionales y un aumento en el tiempo dedicado al desarrollo. Además, también se buscaba utilizar esta herramienta como simulador de procesamiento, con el propósito de evaluar un prototipo ya realizado y, así, implementar mejoras, ajustes y adaptaciones.

El desafío principal se encontró en el proceso de simulación, debido a la falta de conocimiento por parte del equipo de predesarrollo con relación al uso de herramientas de simulación de sistemas de comunicación inalámbrica. Al indagar acerca de las diferentes opciones de entornos de simulación se optó por adquirir la licencia del WLAN Toolbox de MATLAB, pues, además de que MATLAB ofrece herramientas completas con la documentación apropiada, la empresa ya contaba con la licencia de base y esto facilitaba el proceso de implementación de la herramienta en el proyecto. Sin embargo, se desconocía el manejo del WLAN Toolbox de MATLAB y también las características, composición, especificaciones y parámetros propios de las señales Wi-Fi definidas por los distintos estándares IEEE

802.11, ratificando que los conocimientos acerca de conceptos como modulación, OFDM, y composición de tramas Wi-Fi son indispensables para lograr un análisis adecuado del sistema. En este contexto, como practicante, fue imprescindible emprender un proceso de aprendizaje y documentación, tanto en relación con los conceptos básicos de comunicaciones Wi-Fi como con el uso de la herramienta, tomando ejemplos y documentación oficial como base para el uso adecuado del Toolbox. Esto significó un retraso en el proceso de simulación, pues inicialmente, y debido al desconocimiento, hubo una limitación en el aprovechamiento de la herramienta al implementarla en un escenario de desarrollo real. Durante el periodo de práctica se evidencia que entornos de simulación, como el del WLAN Toolbox de MATLAB, ofrecen herramientas que brindan información vital para la toma de decisiones relacionadas al desarrollo de un producto, pero ¿cómo provechar estas mismas herramientas en otros contextos como el académico?

2.2 Justificación

En entornos de desarrollo de tecnologías médicas, la implementación de herramientas de simulación confiables resulta ser fundamental, pues estas permiten adquirir conocimiento y anticipar el comportamiento de sistemas de telecomunicaciones que se buscan aplicar en escenarios específicos. Este tipo de herramientas, además de facilitar los análisis previos a la implementación real, brindan un lugar controlado para la evaluación del funcionamiento de los prototipos, como en el caso del desarrollo de la Máquina de Tomografía Computarizada en Siemens Healthineers.

Por otro lado, en contextos académicos, los servicios de simulación representan un recurso pedagógico de gran valor, debido a que brindan la oportunidad de poner en práctica los conceptos más importantes en Tecnologías de la Información y la Comunicación, implementando sistemas completos, con transmisión, recepción y procesamiento, de manera controlada dentro de entornos de simulación. De esta forma, los estudiantes, maestros e investigadores tienen la posibilidad de afianzar y fortalecer sus conocimientos y habilidades de desarrollo sin incurrir en los gastos elevados que representan las pruebas físicas que se encuentran más expuestas a daños.

En este marco, el WLAN Toolbox de MATLAB se valida como una solución eficiente y completa al momento de llevar a cabo los procesos de simulación mencionados, pues permite la integración de la creación de las tramas Wi-Fi, en sus distintas versiones del estándar IEEE 802.11, del modelado de diferentes tipos canales de transmisión, y del procesamiento de las señales que se reciben.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Utilizar el WLAN Toolbox de MATLAB como una herramienta de simulación práctica para la generación, transmisión, recepción y análisis de señales Wi-Fi basadas en los estándares IEEE 802.11, con el fin de apoyar el proceso de desarrollo de un sistema de comunicaciones inalámbricas implementado en una Máquina de Tomografía Computarizada para Siemens Healthineers.

3.2 Objetivos Específicos

Explicar los fundamentos teóricos de los sistemas de comunicación inalámbricos, específicamente de los sistemas Wi-Fi, abarcando los principios de modulación y estructura de tramas.

Especificar el uso de los objetos y funciones contenidas en el WLAN Toolbox, resaltando su aplicación en los modelos simulados y describiendo cómo realizar la configuración y generación de distintos tipos de tramas bajo los diferentes estándares IEEE 802.11.

Identificar las ventajas y oportunidades que brinda el uso del WLAN Toolbox dentro de contextos académicos, de investigación o de desarrollo.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Redes WLAN y Wi-Fi

Una red WLAN o una red de área local inalámbrica consiste en un grupo de dispositivos que se encuentran normalmente ubicados dentro de un mismo espacio, formando una red, y se conectan entre sí de manera inalámbrica utilizando radiotransmisiones. La información en redes WLAN es enviada en forma de paquetes que poseen etiquetas con instrucciones determinadas para ser direccionadas a las ubicaciones correctas [1].

Una red WLAN ofrece la posibilidad de conexión sin las restricciones de movilidad que implican las redes cableadas, permitiendo la conexión en lugares donde la implementación de cableado es complicada, reduciendo costos y dando mayor posibilidad de escalabilidad.

Por otro lado, Wi-Fi es una marca de una tecnología de red inalámbrica que se basa en el estándar IEEE 802.11, proporciona comunicación por medio de ondas de radio en las bandas de 2.4GHz, 5GHz y 6GHz. Como Wi-Fi, existen otros tipos de estándares para comunicaciones inalámbricas, como Bluetooth y HyperLAN2, sin embargo, el Wi-Fi es el más utilizado debido a su facilidad de implementación, su fiabilidad, flexibilidad y bajo coste, al punto que hoy en día es prácticamente el sinónimo de WLAN, pero en términos técnicos WLAN es el sistema de red y Wi-Fi es una tecnología propia de este sistema [1].

En comunicación WLAN, el transmisor aplica una codificación en la fuente a la información para convertirla en señales digitales; luego se realiza una modulación y codificación de canal antes de transmitir la información en ondas de radio. Finalmente, en el lado del receptor se aplica el proceso contrario, es decir, la demodulación y decodificación, con lo que se obtiene la información original [2].

4.2 Evolución de los estándares IEEE 802.11

El conjunto de especificaciones desarrolladas por la IEEE para la implementación de sistemas WLAN en las bandas 2.4, 3.6 y 5 GHz se conoce como estándar IEEE 802.11, en realidad, es un conjunto de estándares que definen la base de las tecnologías Wi-Fi y sus versiones. El primer estándar IEEE 802.11 fue aprobado en 1997 con el propósito de definir los parámetros que se utilizarían para las redes de área local inalámbricas (WLAN), esta primera versión brindaba velocidades de 1 a 2 Mbps e implementaba tecnologías para el ensanchado de espectro como Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) y Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), estas capacidades iniciales eran limitadas, pero representaron el primer paso para las tecnologías siguientes [3].

Posteriormente, en 1999 se desarrollaron dos extensiones muy importantes: 802.11a y 802.11b.

- El IEEE 802.11a utilizaba Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) operando en la banda de 5GHz logrando velocidades de hasta 54 Mbps, pero debido a su complejidad y mayor costo de implementación la adopción de esta se dio más lentamente [3].
- El IEEE 802.11b operaba en la banda de 2.4 GHz implementando DSSS y brindando velocidades de hasta 11 Mbps. Este brindaba una mejor compatibilidad con los equipos ya existentes, por ende, un menor costo de implementación, lo que provocó su adopción rápidamente convirtiéndose en el primer estándar para Wi-Fi comercializado globalmente [3].³

En 2003 surgió el estándar IEEE 802.11g combinando los puntos fuertes del 802.11a y del 802.11b, funcionando también en la banda de 2.4GHz, pero utilizando modulación OFDM; logrando velocidades de 54Mbps y garantizando la compatibilidad con los equipos del 802.11b, lo que permitió su expansión exitosa, pues los usuarios no necesitaron reemplazar por completo sus dispositivos [3].

Seis años después, en 2009, se presentó el IEEE 802.11n, incorporando nuevos e influyentes avances como el Multiple Input Multiple Output (MIMO), que permite la transmisión y recepción de manera simultánea en varias antenas. La utilización de canales de 40MHz, que significaron la duplicación del ancho de banda y el aumento a velocidades de hasta 600Mbps. Esta versión del estándar y sus innovaciones consolidaron la tecnología Wi-Fi como una tecnología esencial en el ámbito de las telecomunicaciones [3].

Debido al incremento en la demanda de datos, se desarrollaron estándares con mayor capacidad y rendimiento:

- El IEEE 802.11ac, conocido comúnmente como Wi-Fi 5, se estableció como estándar en 2014, operando en la banda de 5GHz únicamente y brindando velocidades sobre el gigabit, esto se logró implementando canales de hasta 160MHz y modulación de 256-QAM la cual aumenta la eficiencia espectral, además, se incorporó una nueva versión de MIMO, el Multi-User MIMO (MU-MIMO) que hace posible atender a diferentes usuarios al mismo tiempo [3].

- El IEEE 802.11ax o Wi-Fi 6, aprobado como estándar en 2019, fue diseñado con el fin de funcionar en contextos de mayor cantidad de dispositivos, para lugares como aeropuertos o estadios. En este estándar se implementaron nuevas versiones de tecnologías, como el uso de Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) con el objetivo de dividir los recursos de una forma más eficiente para múltiples usuarios o dispositivos, además, brindando compatibilidad para 2.4GHz y también para 5GHz e implementando una versión más robusta de modulación, la 1024-QAM que ofrece un aumento en la capacidad de transmisión [3], en la *Figura 1* se muestra una trama Wi-Fi 6 típica, dividida en cada uno de sus campos.

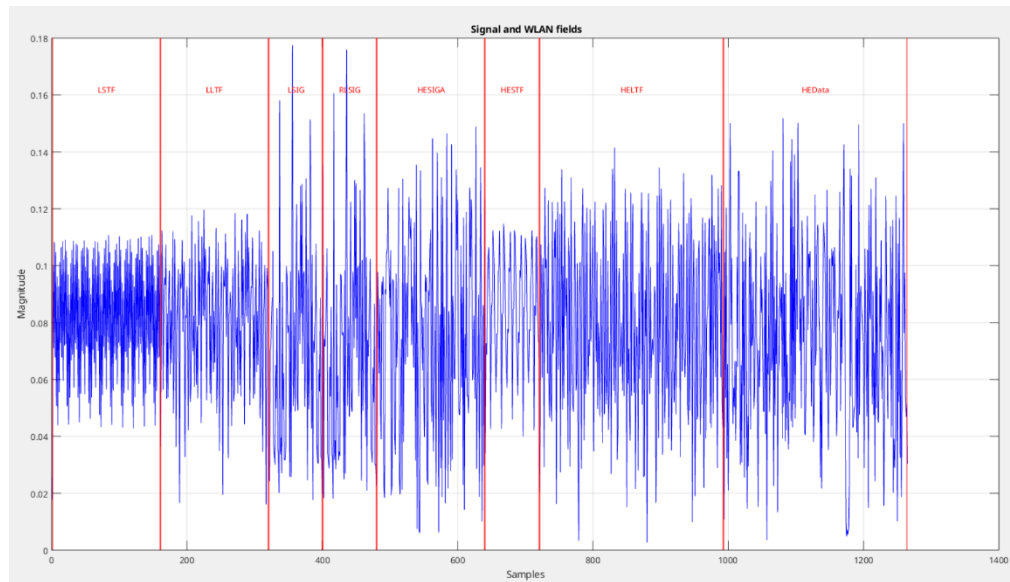


Figura 1. Señal Wi-Fi 6 con campos WLAN en el dominio del tiempo. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)

Aumentar la velocidad de transmisión, mejorar la calidad de servicio, y optimizar la eficiencia espectral, han sido los objetivos foco en el desarrollo de los diferentes estándares IEEE 802.11. Por medio de cada una de las mejoras implementadas desde sus inicios, Wi-Fi se ha establecido como una tecnología fundamental en los sistemas de telecomunicaciones, ya que ofrece soluciones eficientes para los escenarios de incremento de usuarios [3].

4.3 Modulación de canal

La modulación de canal, en el contexto de las telecomunicaciones, permite la conversión de datos binarios a señales indicadas para ser transmitidas por un medio físico. En este tipo de modulaciones, los sistemas encargados agrupan una cantidad específica de bits para asignarlos a unas estructuras conocidas como símbolos. Estos símbolos modifican la amplitud, fase o frecuencia de la onda portadora o carrier. El objetivo principal de la modulación de canal es hacer un uso más eficiente del espectro disponible para la comunicación y asegurar la recepción correcta de la información; incluso con las

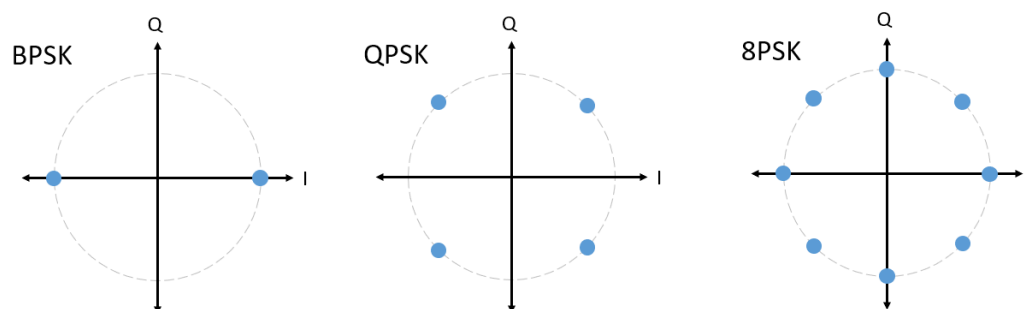
afectaciones del canal sobre la señal, como el ruido, la interferencia o los desvanecimientos [4].

La eficiencia espectral se define como la cantidad de bits que se transmiten por segundo en un sistema de comunicación, en los sistemas Wi-Fi, donde se aplican los estándares IEEE 802.11, la modulación de canal es indispensable, porque no solamente garantiza la eficiencia espectral sino también la robustez de la comunicación [4].

A medida que las versiones de Wi-Fi han evolucionado, se han implementado en ellas nuevas configuraciones de modulación logrando alcanzar tasas de transmisión de datos más altas y mayores niveles de confiabilidad.

- PSK (Phase Shift Keying) es una modulación por desplazamiento de fase, tiene diferentes formas, la más básica se conoce como BPSK, donde se representa un bit por símbolo y es mayormente empleada en contextos donde el canal presenta condiciones complejas [4].

- QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) implementa cuatro configuraciones de fase diferentes logrando la transmisión de 2 bits por símbolo, esto aumenta la eficiencia espectral comparándola con BPSK [4]. En la *Figura 2* se puede ver la comparación de los diagramas de constelación de los distintos tipos de modulación PSK.



*Figura 2. Diagramas de Constelación PSK. Fuente: LICHTMAN, Marc. *Modulación digital* [en línea]. [citado 29 septiembre 2025]. Disponible en: https://pysdr.org/es/content-es/digital_modulation.html*

- QAM (Quadrature Amplitude Modulation) es una modulación que combina configuraciones de variación en fase y amplitud para representar más bits por símbolo, en la *Figura 3* se muestran los diagramas de constelación de las más utilizadas en Wi-Fi. 16-QAM, donde se representan 4 bits por símbolo, 64-QAM con 6 bits por símbolo, 256-QAM incrementando la tasa a 8 bits por símbolo y 1024-QAM con 10 bits por símbolo, siendo esta la utilizada en Wi-Fi 6 [4].

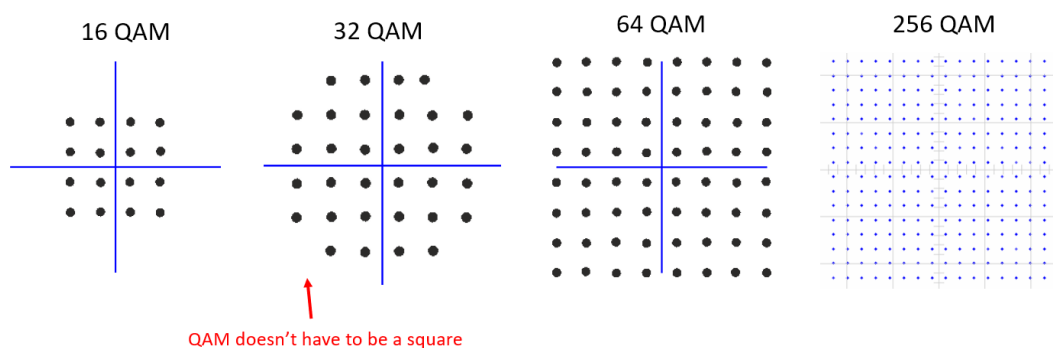


Figura 3. Diagramas de constelación QAM. Fuente: LICHTMAN, Marc. *Modulación digital* [en línea]. [citado 29 septiembre 2025]. Disponible en: https://pysdr.org/es/content-es/digital_modulation.html

Este tipo de modulaciones son representadas en diagramas de constelación, donde cada punto representa un símbolo. A medida que aumenta el orden de modulación, estos símbolos están más cercanos entre sí, lo que se traduce como mayor cantidad de información siendo transmitida por unidad de tiempo, pero a la vez, esto exige una mayor relación señal a ruido (SNR) para que se logre la decodificación correcta de los datos.

Wi-Fi permite la combinación dinámica entre la modulación y la tasa de codificación, esto se conoce como Modulation and Coding Scheme (MCS). El estándar IEEE 802.11 a/g destacó la implementación de

modulación y codificación adaptativa, donde se permite seleccionar entre los diferentes modelos de modulación, de acuerdo con la calidad del canal a utilizar, junto a distintas configuraciones de tasas de codificación, como $\frac{1}{2}$ donde se transmiten dos bits, pero sólo uno es de información y el otro es de redundancia, o $\frac{3}{4}$, donde de cada 4 bits que se transmiten, 3 son de información y el restante es redundante. Otras investigaciones han propuesto el uso del mismo concepto de modulación adaptativa, pero aplicándola por subportadora donde cada sub-canal OFDM podría utilizar una configuración diferente [4].

Las versiones más recientes de estándares como 802.11ac y 802.11ax han adoptado modulaciones de los órdenes más altos, 256-QAM y 1024-QAM de manera respectiva, lo que incrementa significativamente la capacidad de la transmisión. En el caso de 1024-QAM, se aumenta cerca de un 25% en el rendimiento frente a su esquema anterior, aunque la implementación no siempre es sencilla, pues se requiere adquirir un SNR más alto, lo que provoca que su uso eficiente se dé solamente en condiciones donde el canal es favorable [4].

4.4 Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM)

OFDM es una técnica de modulación que se implementa al dividir el ancho de banda de un canal en varias subportadoras ortogonales, lo que permite que estas subportadoras se solapen entre sí sin que exista interferencia entre ellas y, aumentando el aprovechamiento del ancho de banda asignado. Cada subportadora se encarga de transportar un símbolo a una tasa más baja y de manera paralela. Esta forma de modulación reduce la interferencia entre símbolos (ISI) ya que la duración del símbolo es más larga y, además, facilita la ecualización cuando los canales incorporan

desvanecimiento selectivo en frecuencia como es el caso de los canales multi-trayectoria.

Las comunicaciones Wi-Fi requieren sistemas robustos y de buena capacidad, pues normalmente se enfrentan a entornos o canales inalámbricos complejos, por esta razón OFDM se ha adoptado para dar solución a muchas de esas necesidades. En OFDM se destaca el hecho de que cada subportadora experimenta el canal como si este fuese prácticamente plano, lo que reduce la pérdida de información en las frecuencias específicas; además, los efectos de trayectorias múltiples se ven minimizados pues en OFDM los símbolos aumentan su duración; por otro lado, en el momento de la ecualización simplemente es necesario aplicar una corrección por subportadora lo que reduce la complejidad. Finalmente, esta técnica posibilita la implementación de modulación adaptativa y la división del espectro destinado a distintos usuarios, dispositivos o servicios [5] [6].

En Wi-Fi las tramas OFDM están compuestas por diferentes elementos:

- Las subportadoras de datos son las encargadas de transportar la información útil o el Payload, en el caso del estándar IEEE 802.11 a/g se utilizan 48 subportadoras de las 52 dispuestas para esta función [6].
- Las subportadoras piloto transmiten símbolos específicamente definidos que se utilizan para estimar el canal, realizar la corrección de frecuencia y sincronizar fases [6].
- Las Subportadoras nulas separan espectralmente el canal y de esta forma minimizan las interferencias [6].
- El Intervalo de guarda o GI representa el tiempo que se adiciona entre los símbolos OFDM evitando así el solapamiento y la interferencia entre símbolos [6].

- Los Preámbulos y símbolos de entrenamiento son ubicados en el inicio de la trama, pues se encargan de la sincronización en tiempo y en frecuencia y permiten inicialmente obtener la estimación de la respuesta del canal [6].

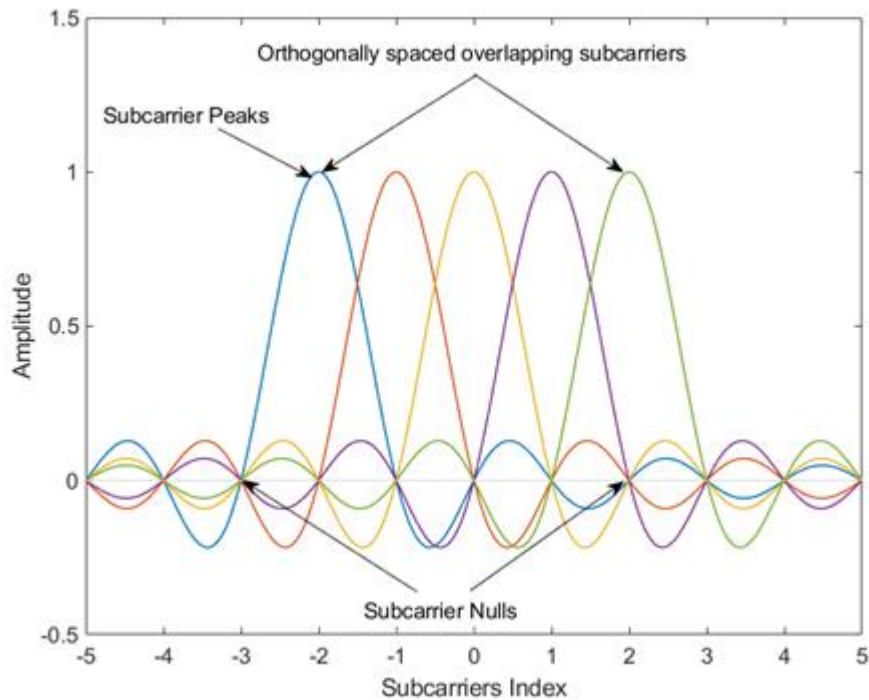


Figura 4. Subportadoras en OFDM. Fuente: MATHWORKS. OFDM Modulator [en línea]. [citado 29 septiembre 2025]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/ofdmmod.html>

En la evolución del Wi-Fi y sus estándares, el OFDM estableció las bases para el desarrollo de una nueva técnica, la Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), esta ha sido implementada en el estándar de Wi-Fi 6 IEEE 802.11ax. La diferencia de OFDMA, con respecto a OFDM, es que en OFDM todas las subportadoras son asignadas a un mismo usuario en el intervalo de tiempo definido, mientras que en OFDMA es posible dividir las subportadoras entre diferentes usuarios, esto reduce la latencia en contextos de alta demanda de

dispositivos y mejora la eficiencia espectral [4]. La *Figura 4* busca explicar gráficamente cómo se verían las subportadoras en OFDM.

4.5 Canales inalámbricos

Los canales inalámbricos se definen como el medio físico por el cual se propagan las ondas electromagnéticas, desde el transmisor hasta el receptor, en un sistema de telecomunicación inalámbrica. Estos canales no son ideales, pues son altamente propensos a ruido, interferencias, atenuaciones y dispersión, lo que perjudica la calidad de la señal que se recibe. En el análisis y diseño de sistemas de telecomunicación inalámbrica, se emplean los modelos de canal que reúnen las características más comunes e importantes durante la propagación de las señales por el medio, permitiendo reproducir los escenarios en entornos simulados [7].

La propagación inalámbrica es afectada por fenómenos como el del Ruido Gaussiano, este tipo de ruido AWGN se asume en todos los modelos, pues representa las interferencias térmicas y electrónicas presentes en el medio. Este fenómeno se caracteriza por tener una densidad de potencia que no varía en el tiempo y, como su nombre lo indica, una distribución de amplitud de tipo gaussiana.

Otro fenómeno típico en modelos inalámbricos es la atenuación y pérdida de trayecto, donde la potencia de la señal captada disminuye en razón a la distancia entre el transmisor y el receptor. También, debido a los obstáculos del entorno o del medio, como paredes o edificaciones, se presentan variaciones en la señal. Estos efectos se conocen como sombreado o shadowing [8].

Por otro lado, a causa de los fenómenos multi-trayectoria (Multipath), donde la señal llega al receptor por caminos diversos, debido a que ha sufrido de reflexiones, difracciones y dispersiones en el camino, se obtiene interferencia constructiva o destructiva y también puede ocurrir desvanecimiento selectivo en frecuencia [9].

También un fenómeno que tiene relación con el multipath, es el desvanecimiento (fading), donde ocurren cambios rápidos en la amplitud de la señal, de este se conocen dos tipos: el Rayleigh fading donde no se presenta una trayectoria dominante, y el Rician fading donde existe una trayectoria más fuerte [10].

Con el objetivo de poder modelar y simular sistemas Wi-Fi, los estándares IEEE desarrollaron modelos de canales de referencia, los cuales ofrecen la posibilidad de evaluar el comportamiento de las transmisiones en condiciones parecidas a las reales.

- TGN Channel Models

Este modelo de canal fue diseñado para evaluar las tecnologías de comunicación inalámbrica relacionadas al IEEE 802.11n o Wi-Fi 4. Allí se definen seis variaciones donde la complejidad y retardo son distintas. En el caso de modelo A, se modela un canal de línea de vista, que no tiene dispersión de retardo. En los modelos B y C se busca simular entornos residenciales y de oficinas, mientras que en los modelos D, E y F se establecen fenómenos más severos como lo de espacios abiertos [11].

- TGac Channel Models

Para el estándar IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) que opera en anchos de banda de hasta 160 MHz, se propuso el modelo de canal TGac que se adaptó a partir del TGN, incorporando la simulación de entornos interiores de capacidades y demandas más altas y en donde se hace uso de varias antenas. En este modelo de canal se tienen en cuenta mayores fenómenos de dispersión de retardo y variación de la correlación espacial en MIMO (Multiple Input Multiple Output) [12].

- TGax Channel Models

El modelo TGax es el modelo implementado para el estándar de Wi-Fi más reciente, el IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6), este modelo combina los modelos

anteriores con nuevos efectos propios de entornos con densidades elevadas de usuarios, como residencias, estadios u oficinas, permitiendo también la compatibilidad con anchos de banda de hasta 160 MHz. Incluye, además, fenómenos más complejos en la propagación como la correlación espacial avanzada y la variabilidad en el retardo multipath, lo que permite evaluar las técnicas aplicadas en este estándar, como OFDMA, en contextos simulados similares a los reales [13].

4.6 Procesamiento en la recepción

La transmisión de señales en sistemas de telecomunicaciones inalámbricos no se da en canales ideales, lo que provoca efectos de ruido, desvanecimientos, retardos y errores de sincronización en las señales. Esto hace que sea indispensable la aplicación de procesos que compensen estos efectos y, así, garantizar la recuperación de la información que fue transmitida.

Uno de los principales inconvenientes en sistemas que utilizan OFDM es el desplazamiento de frecuencia de la portadora (CFO), que se obtiene a causa de los desajustes de los osciladores de recepción y transmisión, y de los efectos Doppler. Cuando esto ocurre, las subportadoras ya no son ortogonales entre sí, sino que producen interferencia interpoladora (ICI). Con el objetivo de corregir este efecto, se hace uso de símbolos de entrenamiento específicamente conocidos, lo que hace posible la estimación del desplazamiento y su compensación previa a la demodulación [14].

Es importante también realizar la estimación del canal inalámbrico, pues este introduce en la señal transmitida desvanecimientos selectivos en frecuencia y tiempo. En el caso específico de OFDM se utilizan igualmente subportadoras piloto para hacer una estimación de la función de transferencia del canal en el dominio de la frecuencia y, a partir de ella, implementar la compensación por

medio de una ecualización, donde básicamente se divide la señal recibida por la estimación del canal [15].

En el proceso de ecualización lo que se busca es corregir los efectos del canal sobre la señal, como en OFDM las subportadoras perciben el canal como plano, la ecualización se simplifica dando paso a tres enfoques diferentes:

- Zero Forcing, donde la señal recibida es directamente dividida por la estimación del canal, pero se puede amplificar el ruido [16].
- Minimum Mean Square Error (MMSE) implementa un equilibrio entre la minimización del ruido y la cancelación de los efectos del canal.
- Ecualización adaptativa o LMS, RLS donde los coeficientes son ajustados según las variaciones que se presenten en el canal en tiempo real.

Finalmente, cuando la señal a la señal recibida ya ha sido corregida en frecuencia y ecualizada, el paso siguiente es la demodulación digital. Este proceso, en sistemas como el Wi-Fi consiste en la recuperación de los símbolos que corresponden a un grupo de bits, donde se toman muestras de cada subportadora y se ubica el punto recibido en la constelación para determinar a qué símbolo fue transmitido. Posteriormente, se aplica la decodificación de canal, proceso en el cual se corrigen los errores que se obtuvieron en la demodulación. Para este proceso se utilizan los bits de redundancia implementados en la codificación de canal, los métodos más comunes en Wi-Fi son Viterbi en Wi-Fi 4 y 5, y LDPC en Wi-Fi 6 [17].

4.7 Métricas de desempeño

Las métricas de desempeño brindan información fundamental a la hora de evaluar un sistema o un modelo de sistema. En los estándares Wi-Fi esta evaluación de desempeño se basa en las siguientes tres métricas fundamentalmente:

- La Tasa de error de bit (BER) es la relación entre el número de bits erróneos recibidos y el número total de bits que se transmitieron en un intervalo de tiempo determinado. Este valor es influenciado directamente por la relación señal a ruido (SNR) y el tipo de modulación que se implemente, pues, cuando un sistema posee una robustez mayor se minimiza el BER aun si las condiciones del canal de propagación se mantienen [18].
- La tasa de transmisión efectiva (Throughput efectivo) es una métrica que define la cantidad de información útil que se recibe por unidad de tiempo. Aquí no se tienen en cuenta los bits erróneos, y es bastante importante en Wi-Fi, debido a que los efectos del canal y las interferencias hacen que esa tasa de transmisión efectiva se reduzca de manera significativa con respecto a la tasa de transmisión nominal [19].
- La relación señal a ruido (SNR) es otra métrica fundamental en comunicaciones, pues compara la potencia de la señal con la potencia del ruido introducido en el canal. Cuando el SNR es alto significa que la calidad de recepción es buena, pero este tipo de resultados en sistemas de transmisión inalámbricos son bastante complicados, pues existen muchos efectos de interferencia, ruido y desvanecimiento, así que el SNR se utiliza para determinar qué esquemas de modulación y codificación

serían necesarios aplicar en el sistema para obtener efectividad en la comunicación [20].

5. METODOLOGÍA

En el desarrollo de proyectos de desarrollo y de investigación es importante definir una metodología clara, que se construya con base en los objetivos, el propósito del proyecto y teniendo en cuenta las herramientas a utilizar. De esta manera se garantiza una estructura para la ejecución del proceso, brindando coherencia en la obtención de resultados. Una metodología facilita la toma de decisiones, que se basan en los resultados y en el análisis del proceso; la metodología implementada en este caso se constituyó secuencialmente por nueve pasos, iniciando con la lectura y análisis documental necesario, pasando por la aplicación de la herramienta en simulación y en prototipo, y culminando con la evaluación de los resultados. Este proceso sirvió para apoyar el proceso de desarrollo del sistema de comunicación inalámbrica implementado en una CT Machine, dirigiendo el proceso de simulación de sistemas Wi-Fi IEEE 802.11 utilizando el WLAN Toolbox de MATLAB, pues aseguró que cada parte de la investigación e implementación contribuyera a la comprensión y validación de los modelos, y al cumplimiento de los objetivos.

1. Estudio preliminar y documentación

En la primera etapa se realizó una investigación sobre los estándares que rigen Wi-Fi (IEEE 802.11), se indagó acerca de la estructura de las tramas Wi-Fi y sus tipos de modulaciones digitales, modulación OFDM, modelos de canal inalámbrico, procesamiento de las señales recibidas y demás conceptos importantes en sistemas de comunicaciones inalámbricas. Este proceso de documentación incluyó la revisión oficial de las herramientas de MathWorks y de ejemplos de uso del WLAN Toolbox en específico.

2. Configuración del sistema de modulación

En segunda instancia, se definieron los parámetros de simulación de un sistema Wi-Fi probando cada estándar IEEE 802.11 con sus diferentes especificaciones. Se establecen los diferentes valores de ancho de banda, esquemas de modulación, longitudes de trama e intervalos de guarda.

3. Generación de la señal a transmitir

Al definir los parámetros, se procedió a la generación de las tramas Wi-Fi correspondientes a cada selección de parámetros y de estándar. Para esto se utiliza la función *wlanWaveformGenerator* del WLAN Toolbox, analizando los campos de preámbulos, de entrenamiento y de datos para posteriormente implementar de manera correcta la recuperación de la información.

4. Selección del canal y transmisión simulada

Cada señal correspondiente a diferente selección de parámetros y de estándar Wi-Fi fue sometida a los efectos de los distintos modelos de canal disponibles en el WLAN Toolbox de MATLAB, conociendo que estos buscan reproducir las condiciones reales de propagación. Para esto se utilizaron canales como el AWGN y canales multipath.

5. Recepción y procesamiento simuladas

Al simular la recepción de la señal, se implementaron algoritmos de procesamiento que se encargaron de corrección de frecuencia, la estimación y corrección de los efectos del canal, la ecualización, de la demodulación y decodificación con el fin de recuperar los datos que fueron transmitidos.

6. Evaluación de desempeño de la simulación

Se analizan las métricas de desempeño que permitan comparar las distintas configuraciones de simulación, fijándose especialmente en la Relación señal a ruido (SNR) y en la Relación Señal a Interferencia y Ruido (SINR). Además, se analizan las gráficas de constelación de los símbolos obtenidos.

7. Transmisión de señales en el prototipo real

Una vez evaluados los modelos de sistemas Wi-Fi en simulación se procedió a transmitir las tramas Wi-Fi generadas a través del prototipo de sistema de comunicación inalámbrico de la CT Machine.

8. Recepción y procesamiento en prototipo

Al obtener la señal en el receptor del prototipo se procedió a su análisis. Utilizando los mecanismos de procesamiento brindados por el WLAN Toolbox de MATLAB se logró la obtención de los símbolos graficados en constelación, el análisis de su espectro en potencia y el SNR en distintas posiciones del sistema.

9. Evaluación de resultados

Se analizan las métricas obtenidas, buscando obtener mejoras en el proceso de procesamiento y ajustar parámetros del prototipo físico y lógico de transmisión. Por otro lado, se realiza un análisis de la ayuda que brindó el WLAN Toolbox de Matlab, identificando las ventajas de su aplicación en contextos no solo de desarrollo e investigación, sino también en entornos académicos.

6. DESARROLLO

La primera etapa de la pasantía, dentro del departamento de Predesarrollo del área de Medical Electronics en Siemens Healthineers, consistió en la realización de la simulación de generación y transmisión de tramas Wi-Fi utilizando MATLAB y su WLAN Toolbox como herramienta, implementando las configuraciones definidas en los estándares IEEE 802.11. En esta primera fase se generaron y verificaron tramas completas identificando sus preámbulos de sincronización, los campos de entrenamiento y el campo que segmenta los datos, por medio de diferentes esquemas de modulación como PSK o QAM en sus distintas variaciones.

Posteriormente, la generación de las señales se adaptó según la transmisión que se realizaría a través del sistema físico de la CT Machine, en la *Figura 5* se muestra una imagen de referencia de una CT Machine perteneciente a Siemens Healthineers. El sistema está conformado por dos antenas transmisoras y dos antenas receptoras, sin embargo, la transmisión no se realizaba utilizando las cuatro antenas al mismo tiempo como en un sistema MIMO, sino desde una transmisora a su receptora, con el objetivo de probar el sistema gradualmente, en la *Figura 6* se presenta un esquema básico de la ubicación de las antenas en la CT Machine.



Figura 5. Imagen de referencia de una CT Machine. Fuente: South Florida Hospital News and Healthcare Report. Siemens Healthineers announces first U.S. install of SOMATOM X.ceed premium single-source CT scanner [en línea]. 1 feb. 2022 [citado 24 oct. 20]

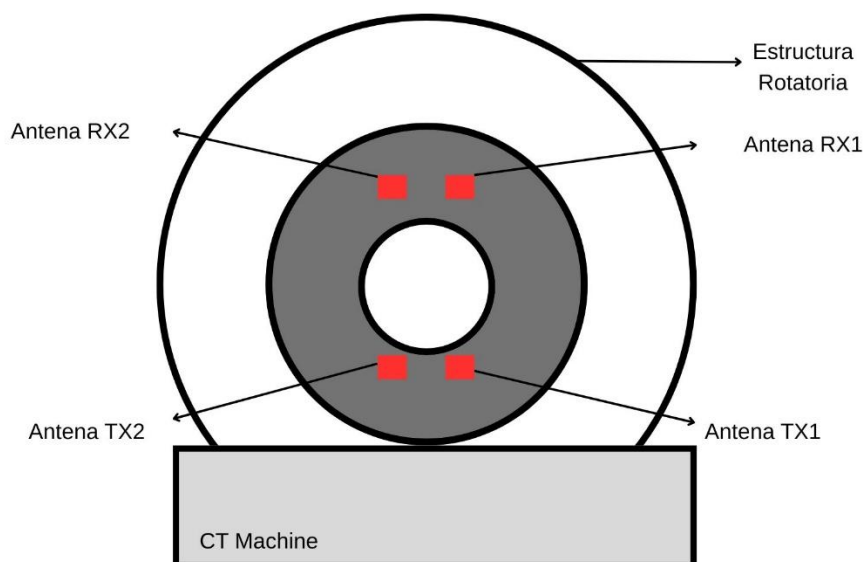


Figura 6. Estructura básica del sistema de comunicación

A continuación, se muestran ejemplos de señales generadas, transmitidas y recibidas en el entorno de simulación. En la *Figura 7* se muestra el espectro de una trama Wi-Fi 802.11a con un ancho de banda de 20 MHz antes de ser transmitida, en esa figura se puede evidenciar claramente dicho ancho de banda y también que

la señal se encuentra libre de ruido. Por otro lado, esta señal fue transmitida simulando un canal que aplicó ruido e interferencias; en la *Figura 8* se muestra la señal recibida, misma que posee un ancho de banda de 20 MHz igualmente, pero se evidencia la presencia de ruido tras haber sido transmitida por el canal. Finalmente, en la *Figura 9* se muestra la misma señal, esta vez graficada con respecto al tiempo. En dicha imagen se pueden evidenciar los campos que componen la trama.

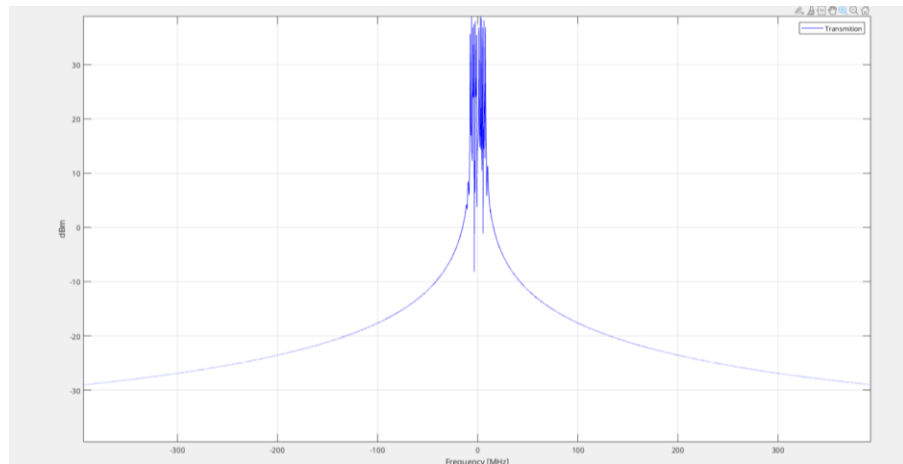


Figura 7. Espectro de trama Wi-Fi 802.11a transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)

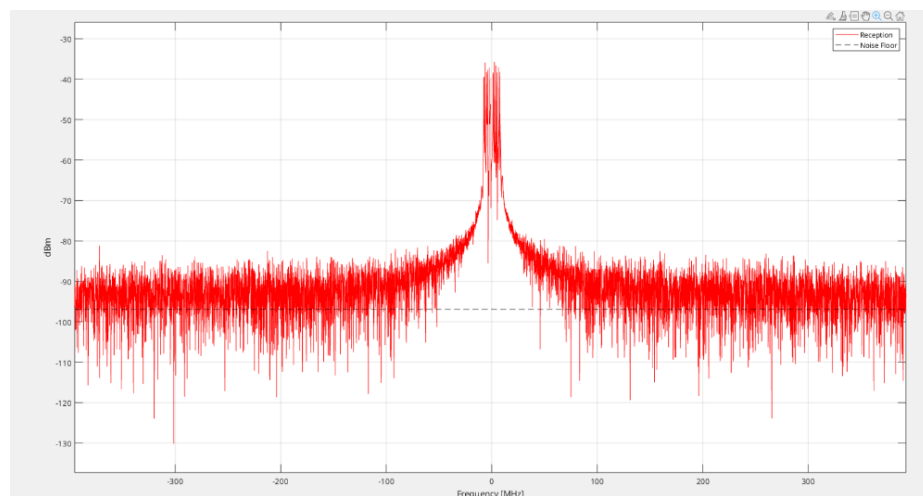


Figura 8. Espectro de trama Wi-Fi 802.11a recibida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)

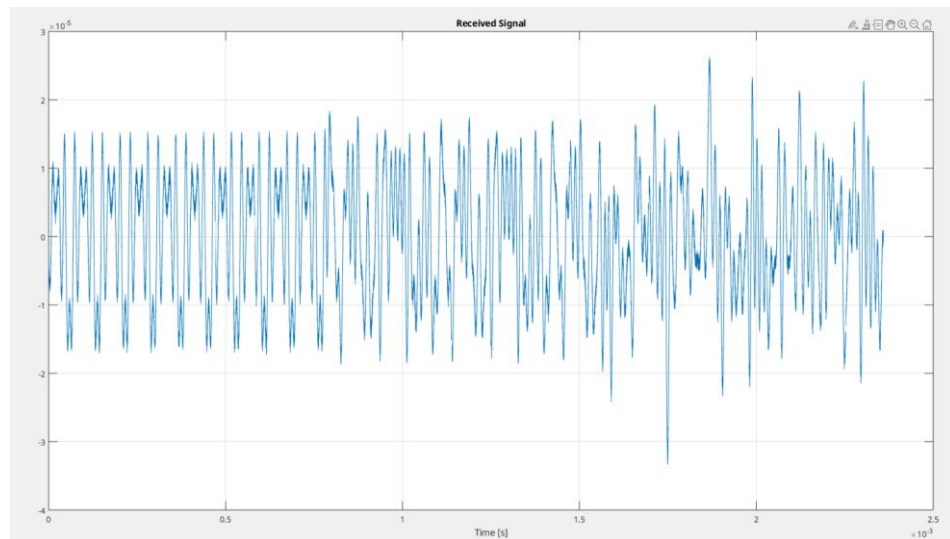


Figura 9. Trama Wi-Fi 802.11a recibida en el tiempo. Fuente. Elaboración propia (MATLAB, 2025)

Posteriormente, se realizó el mismo ejercicio, pero generando una trama Wi-Fi 802.11ac con un ancho de banda de 80MHz, en la *Figura 10* se muestra el espectro de esta señal antes de ser transmitida por el canal simulado, mientras que en la *Figura 11* evidencia la señal recibida que fue afectada por un canal con más efectos que el anterior. En la *Figura 12* se tiene la señal recibida con respecto al tiempo, allí se evidencia que una trama Wi-Fi 802.11ac es más compleja que una Wi-Fi 802.11a, pues cuenta con más campos que componen la trama lo que ayuda al receptor al momento de detectar la señal, demodularla y decodificar la información. Luego, en la *Figura 13* se hace evidente el tipo de modulación que se aplicó, en este caso 16 QAM, visualizando el diagrama de constelación de la señal que se recibió simuladamente. Este se obtuvo tras realizar el proceso de recepción, estimación del canal y ecualización también de manera simulada en MATLAB.

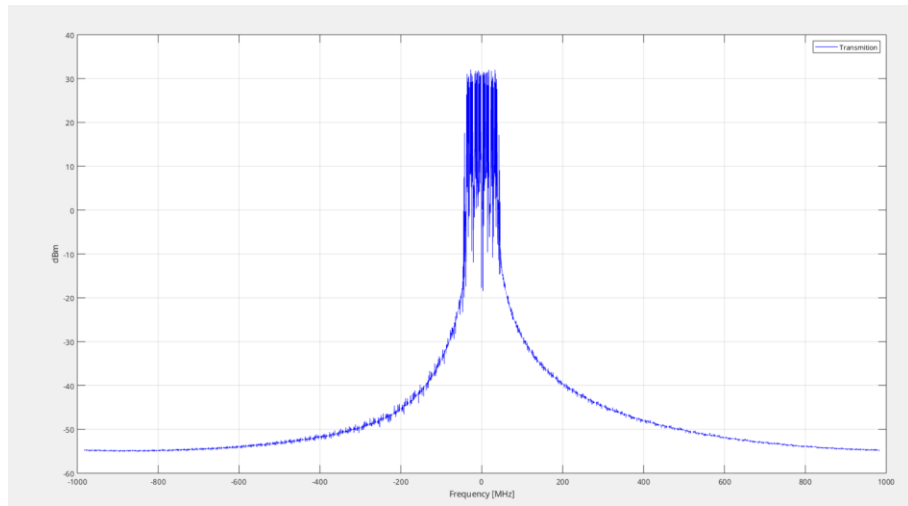


Figura 10. Espectro de trama Wi-Fi 802.11ac transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)

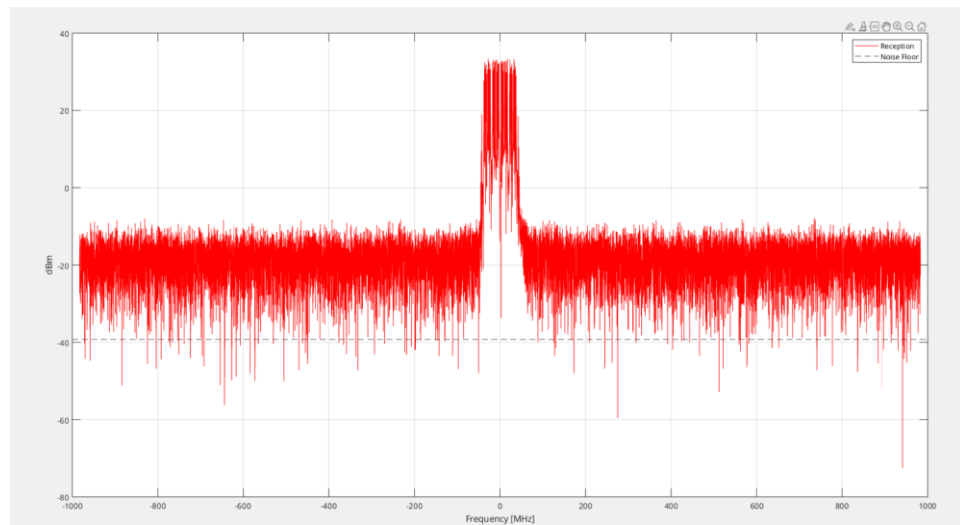


Figura 11. Espectro de trama Wi-Fi 802.11ac recibida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)

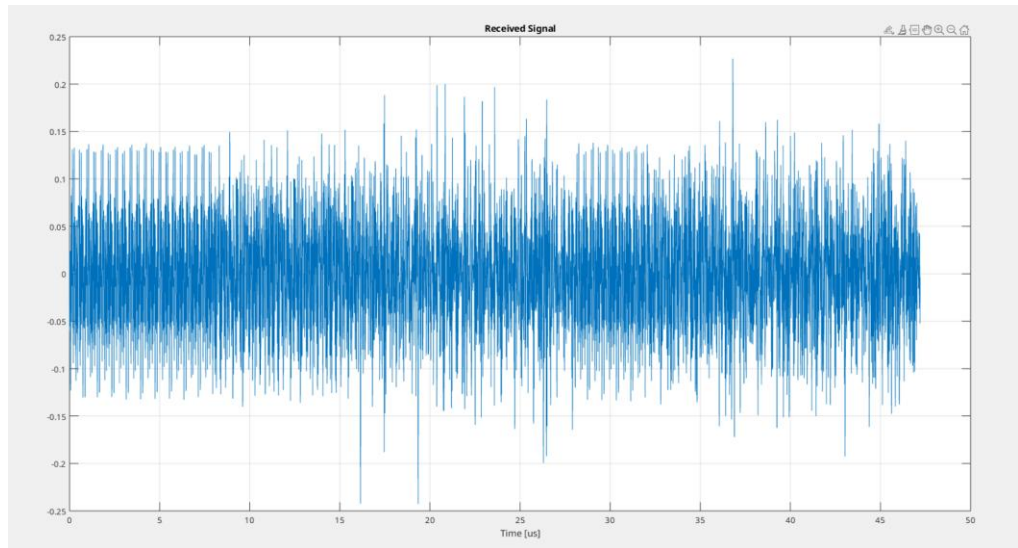


Figura 12. Trama Wi-Fi 802.11ac recibida en el tiempo. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)

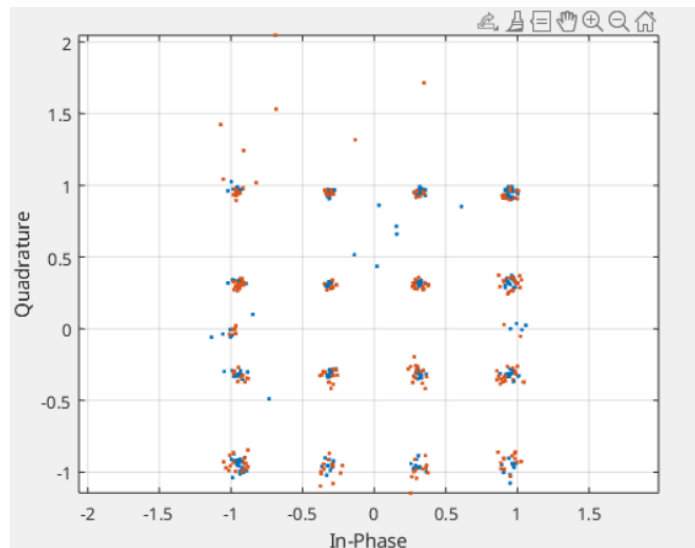


Figura 13. Diagrama de constelación de trama Wi-Fi 802.11ac. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)

Finalmente, se realizó el ejercicio utilizando una trama Wi-Fi 802.11ax también con un ancho de banda de 80 MHz, el espectro de la señal antes de ser transmitida se muestra en la *Figura 14* y, en la *Figura 15* se muestra la señal que se recibió luego de que se transmitiera por un canal simulado que aplicó, no solo

ruido y atenuación, sino también efectos multipath. En la *Figura 16* se muestra la gráfica de la señal recibida en el tiempo logrando ver que en este caso también la cantidad de campos que compone la trama aumenta y, que, aplicando todo el proceso de recepción simulada, se obtiene la gráfica de la constelación como se evidencia en la *Figura 17*.

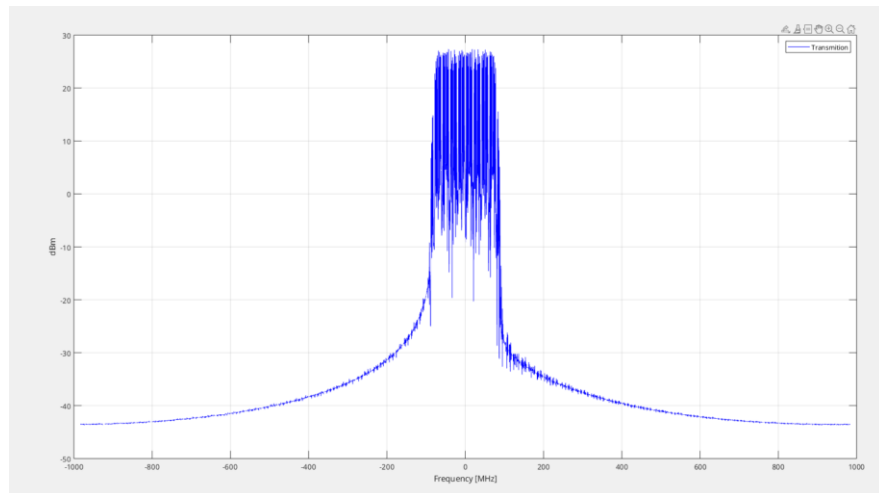


Figura 14. Espectro de trama Wi-Fi 802.11ax transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

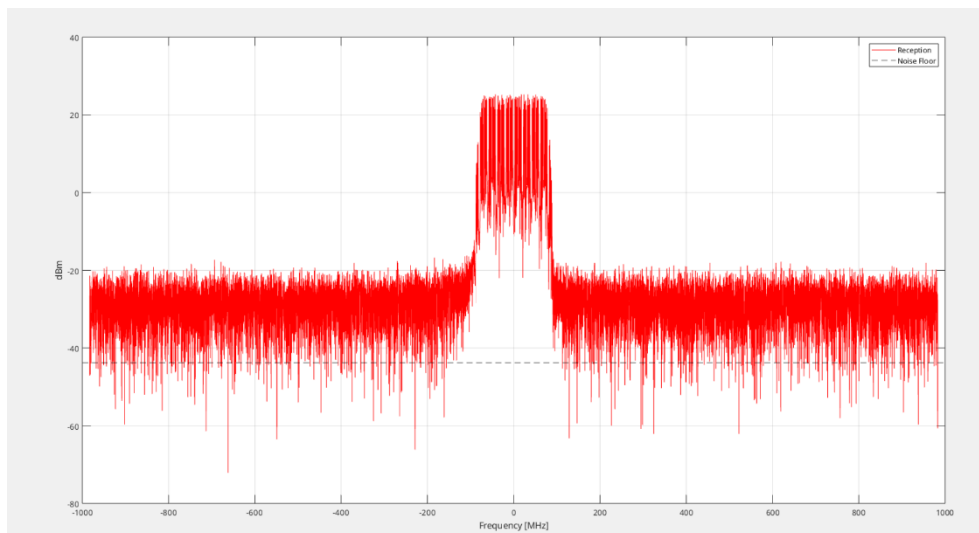


Figura 15. Espectro de trama Wi-Fi 802.11ax recepción. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)

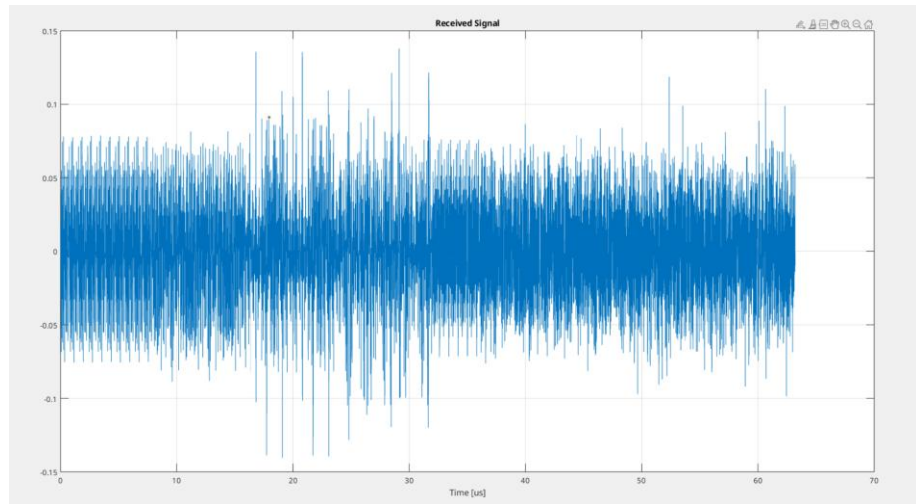


Figura 16. Trama Wi-Fi 802.11ax recibida en el tiempo. Fuente: Elaboración propia (MATLAB, 2025)

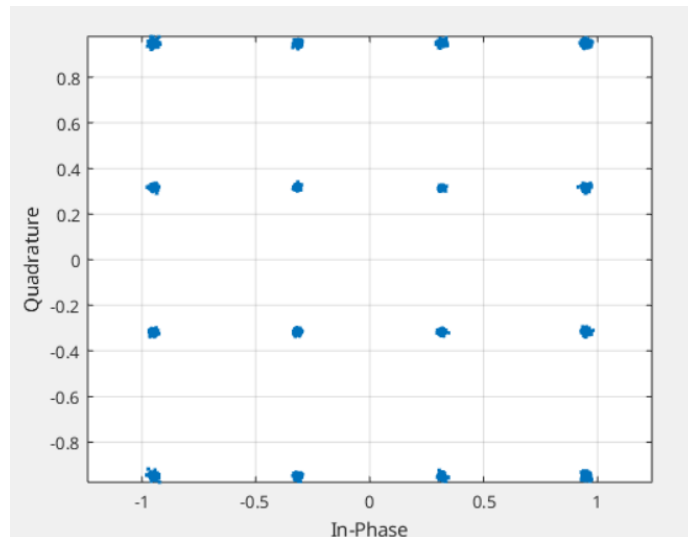


Figura 17. Diagrama de constelación de trama Wi-Fi 802.11ax. Fuente:Elaboración propia (MATLAB, 2025)

El paso a paso de los ejemplos de generación y simulación de transmisión y recepción utilizando el WLAN Toolbox de MATLAB se especifica en los *Anexos*.

Continuando con el proceso de prueba, se identificó que la memoria FIFO (First Input First Output) del sistema era un limitante, pues no permitía almacenar y transmitir paquetes o tramas de una duración mayor a 12 microsegundos. Esto significó una restricción importante, ya que una trama típica de Wi-Fi 6 supera en gran medida esa duración pues está compuesta por diversos preámbulos y campos de señalización y entrenamiento.

Con el fin de solucionar esta limitación se aplicó una interpolación temporal a la señal antes de transmitirla, buscando acelerarla de manera artificial y aumentar su frecuencia de muestreo de tal forma que la trama lograra ser transmitida completamente en el tiempo que permitía el hardware. Como se muestra en el código de la presente en la *Figura 18*, el DAC (Conversor Digital a Análogo) del sistema operaba a una frecuencia de muestreo de 7.86432 GHz, aplicando una interpolación de 4x, lo que significa que la tasa efectiva de transmisión es de 1.96608 GHz. Entonces, el proceso consistió en reescalar la señal original generada con el WLAN Toolbox donde la frecuencia de muestreo base era de 20MHz (el mismo valor del ancho de banda), utilizando la función *resample* de MATLAB. Con el objetivo de mejorar la precisión de la interpolación y de alguna manera “engañar” el cálculo de reescalado entre la frecuencia de muestreo original y la tasa efectiva de transmisión para que fuese una relación más manejable; se asumió la tasa de muestreo original como el doble de la real, es decir, dos veces 20MHz.

```
%DAC parameters

sample_rate_dac = 7.86432e9; % frecuencia de muestreo del DAC
interpolation_tx = 4; % interpolación aplicada por el DAC
data_sample_rate_tx = sample_rate_dac / interpolation_tx; % tasa efectiva( 1.96608 GHz)

%resampling
sample_rate_x2 = fs * 2; % duplicar 20MHz
[P, Q] = rat(data_sample_rate_tx / sample_rate_x2 ); % fracción aproximada de interpolación
signal_interpolated = resample(txWaveform, P, Q); % señal resampleada
```

Figura 18. Código de interpolación

Al interpolar la señal de esta manera, la señal conserva su estructura espectral original, pero se comprime en el tiempo, esto permitió transmitir tramas completas de Wi-Fi 6 utilizando el sistema de transmisión de la CT Machine sin desbordar la memoria FIFO.

El siguiente paso, que se muestra en la *Figura 19*, consiste en el escalado de amplitud, en este caso se escala la señal al rango que espera el hardware DAC/FPGA.

```
% amplitude scale
amplitude_max = '2300'; %rf_dac_resolution_max = 0x2300;
amplitude = twos_complement(amplitude_max); %2240

signal_scaled = signal_interpolated * amplitude;
```

Figura 19. Código de escalado de amplitud

Como la señal generada en MATLAB es una señal compleja en banda base, pero el sistema de transmisión únicamente entiende de valores digitales, donde el DAC cuenta con dos canales de entrada, uno para la parte real (I) y otro para la parte imaginaria (Q), en la *Figura 20* se muestran las líneas de código que se utilizaron para separar las dos partes de la señal (real e imaginaria). Además, en este caso, el hardware está esperando recibir palabras de 32 bits por muestra, es decir 16 bits para I y 16 bits para Q, entonces se implementa una función denominada *decimal_to_hex_twos_complement* que se encarga de cuantizar cada muestra I y Q a 14 bits y añade 2 ceros de padding en los bits menos significativos para así completar 16 bits por rama. El código que implementa esta función está presente en la *Figura 23*. Dentro de esta función se hace la conversión a *complemento a dos*, utilizando la función *twos_complement* que se muestra en la *Figura 21*, con el fin de lograr la representación tanto de valores negativos como de valores positivos, devolviendo el valor obtenido en un formato hexadecimal de 16 bits por rama. Utilizando la función *concatenate_hex*, que se especifica en la *Figura*

22, se combinan las dos partes de la señal (I y Q) usando la función *combine* de la *Figura 24* y finalmente, se guarda la señal en formato *uint32*, como se muestra en la *Figura 25*, de manera que el archivo esté listo para cargarse en la memoria FIFO del sistema transmisor.

```
% real and imag parts
real_signal_1 = real(signal_tx);
imag_signal_1 = imag(signal_tx);
```

Figura 20. Código de separación de partes real e imaginaria

```
function decimal_value = twos_complement(hex_value)

    binary_value = dec2bin(hex2dec(hex_value), 16);
    truncated_binary = binary_value(1:14);

    if truncated_binary(1) == '1'
        inverted = char(not(truncated_binary == '1') + 0);
        decimal_value = -(bin2dec(inverted) + 1);
    else
        decimal_value = bin2dec(truncated_binary);
    end
end
```

Figura 21. Función de conversión a complemento a dos

```
function hex_concat = concatenate_hex(hex1, hex2)
    real_part = uint32(hex2dec(hex1));
    imag_part = uint32(hex2dec(hex2));

    combined = bitshift(real_part, 16) + imag_part;

    hex_concat = upper(dec2hex(combined, 8));
end
```

Figura 22. Función de concatenación hexadecimal.

```

function hex_str = decimal_to_hex_twos_complement (decimal_num, num_bits)

    if decimal_num >= 0
        binary_representation = dec2bin(bitand(int16(decimal_num), hex2dec('3FFF')),14);
        binary_representation = [binary_representation '00'];

    else
        bin_num = dec2bin(bitand(abs(int16(decimal_num)), hex2dec('3FFF')), 14);
        new_bin = ['0' bin_num];

        inverted_bin = char (not(new_bin == '1') + '0');

        twos_comp = bitand(bin2dec(inverted_bin) + 1, hex2dec('3FFF'));

        binary_representation = dec2bin(twos_comp, 14);
        binary_representation = [binary_representation '00'];

    end
    hex_str = upper(dec2hex(bin2dec(binary_representation), 4));
end

```

Figura 23. Función de representación hexadecimal en complemento a dos

```

% I and Q to hexadecimal
function [new_sig_1] = combine(real_signal_1, imag_signal_1)
    new_sig_1 = strings(1, length(real_signal_1));

    for i = 1:length(real_signal_1)
        real_hex = decimal_to_hex_twos_complement(real_signal_1(i), 16);
        imag_hex = decimal_to_hex_twos_complement(imag_signal_1(i), 16);
        con_hex = concatenate_hex(real_hex, imag_hex);
        new_sig_1(i) = con_hex;
    end
end

```

Figura 24. Función de combinación

```

[new_signal_1] = combine(real_signal_1, imag_signal_1);

% save signals

hex_data1 = uint32(hex2dec(new_signal_1));

fid1 = fopen('wlan_signal_80_16qam.bin', 'w'); % cambiar nombre según el caso
fwrite(fid1, hex_data1, 'uint32');
fclose(fid1);

```

Figura 25. Aplicación de las funciones y archivo de la señal

7. RESULTADOS

Al realizar las pruebas de transmisión de las tramas Wi-Fi 6 utilizando el sistema de transmisión de la CT machine, se evidenciaron dificultades en la recepción de las señales. A pesar de que la señal que se generó en con el WLAN Toolbox se lograba transmitir correctamente, las muestras recibidas por medio de las antenas de la sección de recepción solían llegar incompletas o desordenadas, lo cual imposibilitaba su procesamiento directo. Debido a esto, fue necesario realizar un proceso de detección del inicio de la trama, identificando el primer preámbulo y de esta forma se permitía reordenar la señal recibida y, así, extraer de forma eficiente los campos antes continuar con la ecualización y la obtención de los símbolos.

Este proceso se implementó utilizando dos vías diferentes. Por medio de código en MATLAB, utilizando funciones de correlación y estimación de canal con el campo HE-LTF, donde era necesario especificar todos los parámetros de la señal original y realizar un downsampling a la frecuencia de muestreo original y, por otro lado, con la aplicación *Wireless Waveform Analyzer* de MATLAB donde se puede especificar la frecuencia de muestreo de la señal recibida y su ancho de banda.

Con el objetivo de reducir la complejidad y las afectaciones adversas del canal en la señal transmitida, se implementó en la señal generada el modelo de modulación más robusto (BPSK) con un ancho de banda de 20MHz, de esta manera se buscaba minimizar los errores por ruido e interferencia.

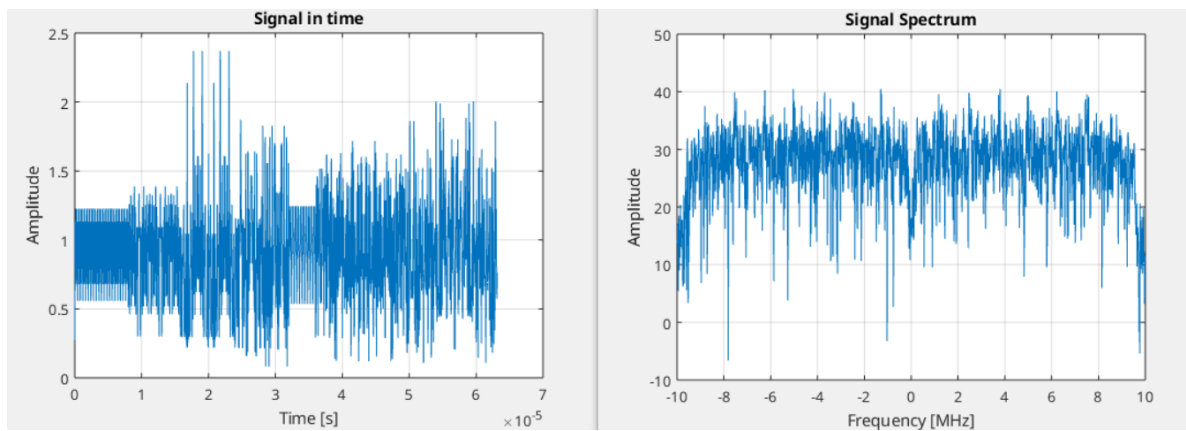


Figura 26. Trama Wi-Fi 6 original generada. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

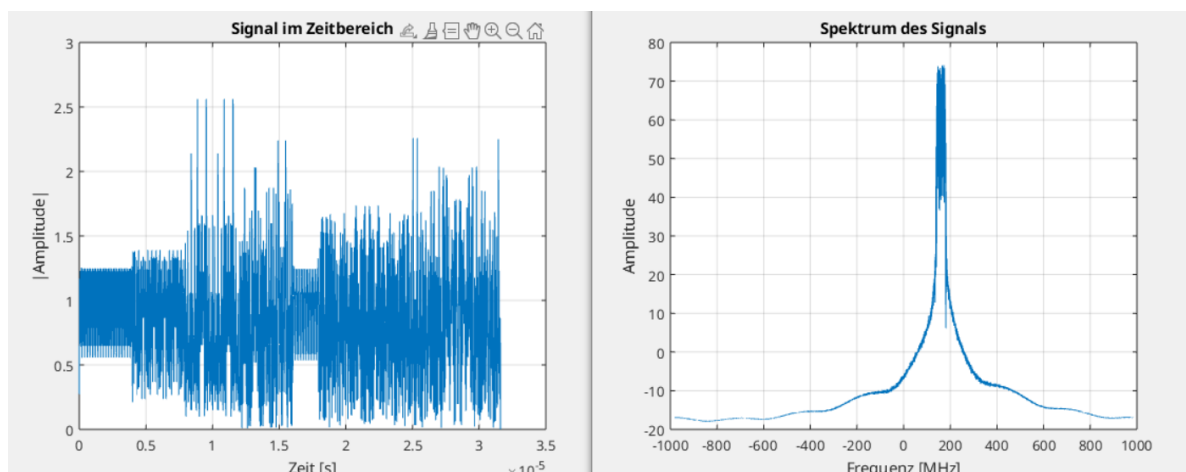


Figura 27. Trama Wi-Fi 6 upsampled. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

Como se evidencia en la *Figura 27*, aunque la frecuencia de muestreo de la señal fue aumentada, su ancho de banda no cambió.

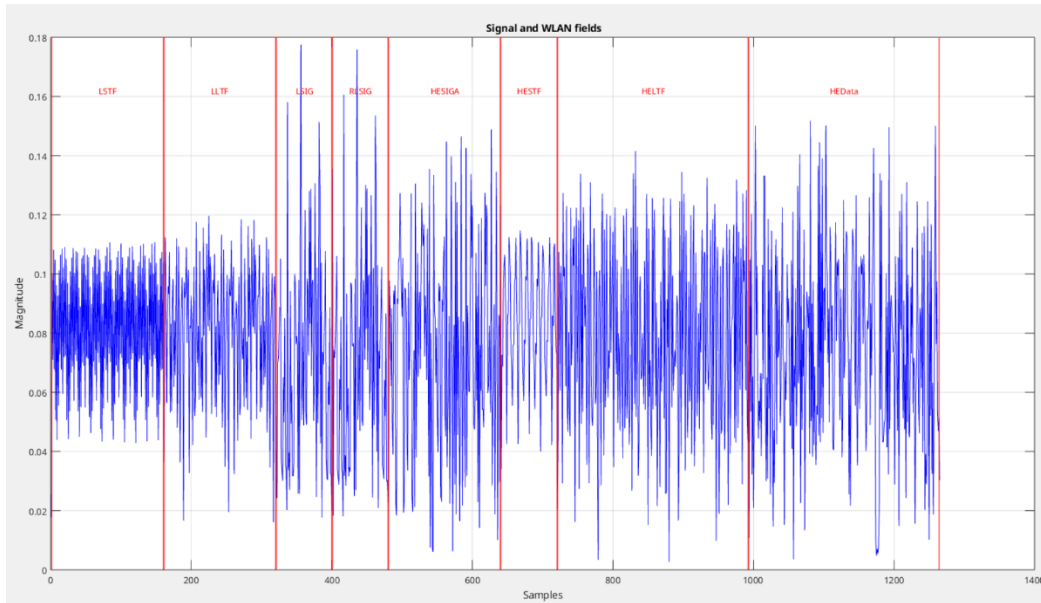


Figura 28. Trama Wi-Fi 6 recibida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

La *Figura 28*, es un ejemplo de una señal recibida que fue reordenada de tal manera que la organización de sus campos coincidiese con los campos establecidos en Wi-Fi 6. Sin embargo, luego de realizar el proceso de recepción para obtener los símbolos, se evidenciaron diagramas de constelación que no eran lo suficientemente claros, como el de la *Figura 31* y la *Figura 32*.

Inicialmente se pensó que la potencia de la señal que estaba siendo transmitida no era suficiente, por lo cual se realizaron gráficas de relación señal a ruido (SNR) y relación señal a interferencia más ruido (SINR), obteniendo que la relación señal a ruido (SNR) medida era en teoría adecuada; como se puede ver en la *Figura 29*, donde se evidencian niveles de SNR entre 20 y 40 dB, tanto para la configuración *RX1_TX1* como para la *RX2_TX2*. Por otro lado, los resultados mostrados en la *Figura 30* indican que la relación señal a interferencia más ruido (SINR) presenta un comportamiento variable con fluctuaciones significativas de más de 20 dB entre diferentes posiciones, lo cual sugiere una falta uniformidad en el entorno. De esta manera se podría concluir que, posiblemente la degradación

observada en las constelaciones, tanto en la *Figura 31* como en la *Figura 32*, no se debe a falta de potencia o exceso de ruido, sino a efectos de desvanecimiento y/o multipath debido a reflexiones probablemente causadas por las estructuras y componentes metálicos del sistema rotatorio.

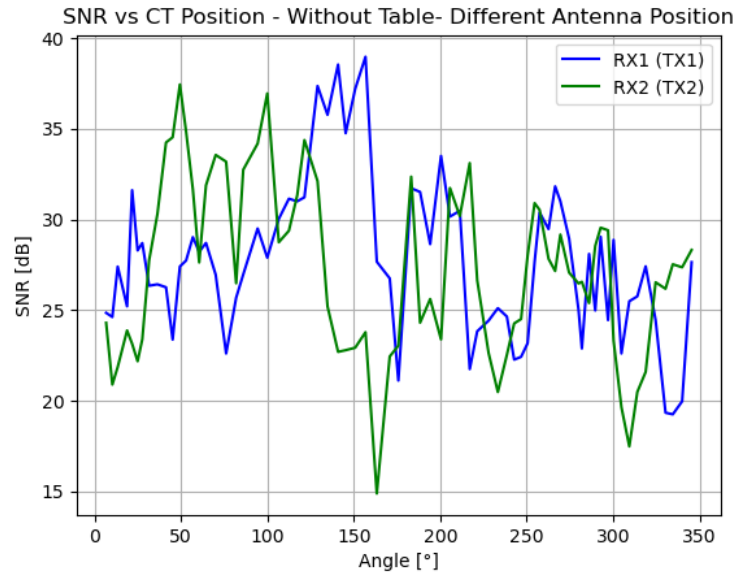


Figura 29. Relación señal a ruido vs ángulo de posición

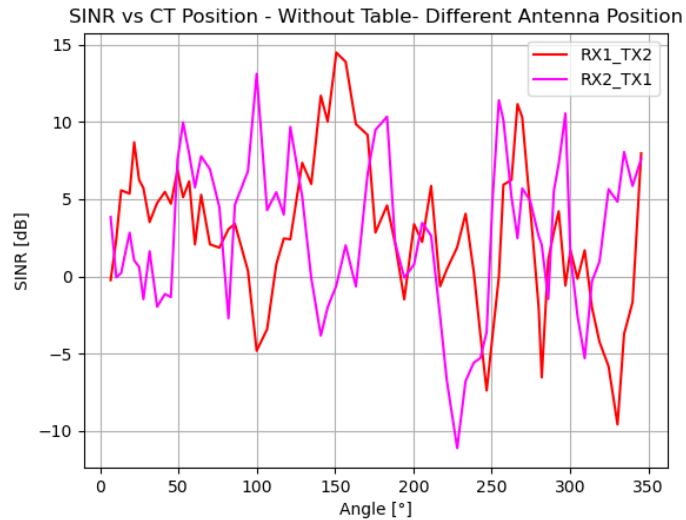


Figura 30. Relación señal a interferencia más ruido vs ángulo de posición

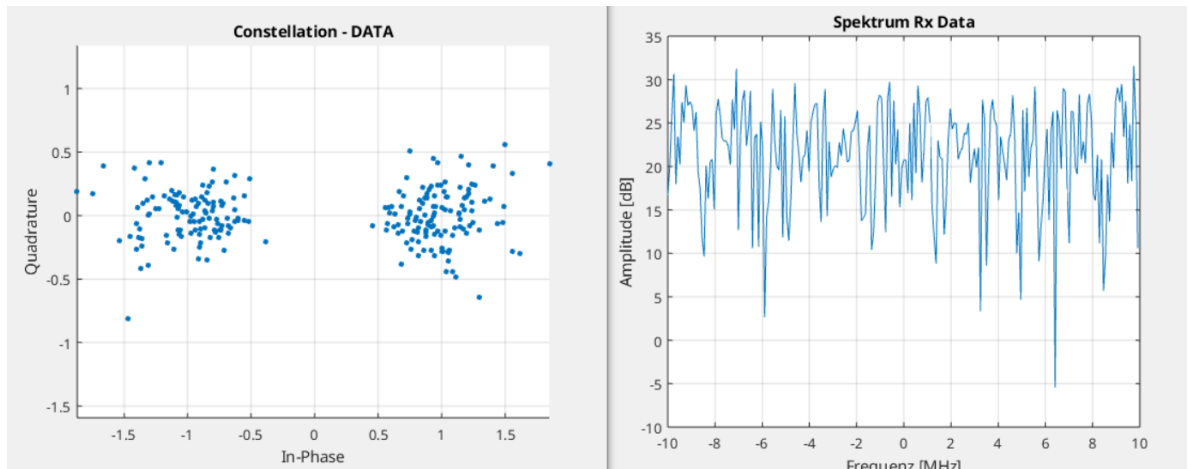


Figura 31. Constelación y espectro de la señal recibida implementando código en MATLAB. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

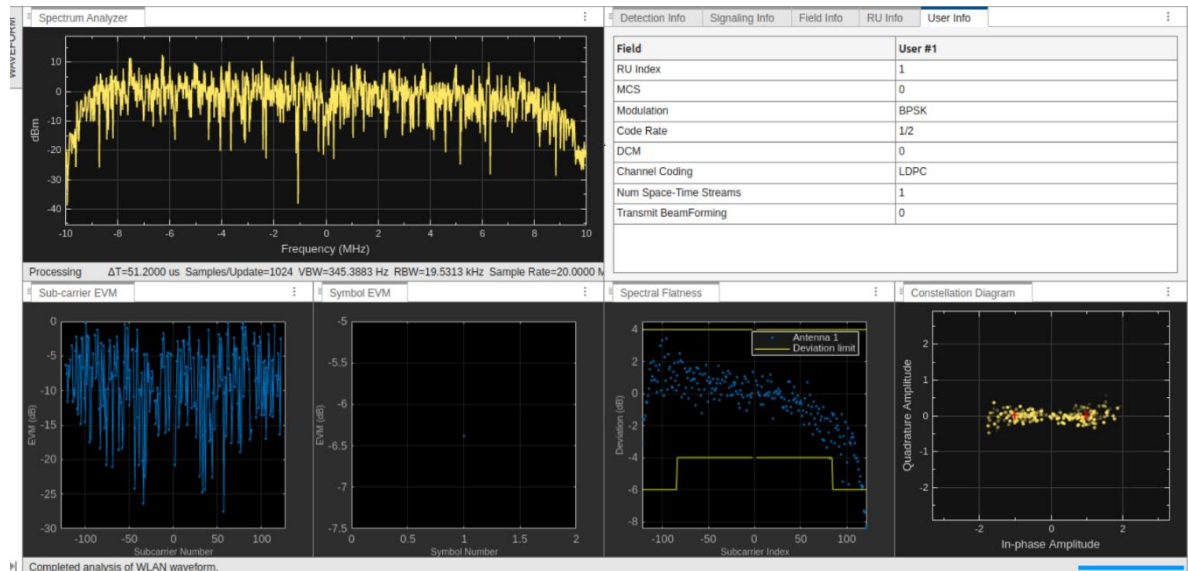


Figura 32. Análisis en Wireless Waveform Analyzer de la señal recibida

7.1 Validación del cumplimiento del objetivo general

De manera transversal, se ha abordado en este trabajo el cumplimiento del objetivo general, implementando una ruta metodológica que permitió usar el WLAN Toolbox de MATLAB como una herramienta práctica para generar, transmitir, recibir y analizar señales Wi-Fi, conforme a los estándares IEEE 801.11; aplicándolo de manera directa al proceso de desarrollo del sistema de comunicaciones inalámbricas de la CT Machine en Siemens Healthineers.

En primera instancia, el *Marco Teórico* brinda las bases necesarias para sustentar las decisiones técnicas dentro de la simulación; la evolución de los estándares IEEE 802.11, modulación, OFDM, modelos de canal y métricas de desempeño. Tomando como base estos conceptos, la *Metodología* se encarga de organizar el trabajo de forma secuencial; se inicia con la configuración y generación de tramas Wi-Fi con algunos parámetros representativos como el ancho de banda, MCS y modulación. Se continúa con la transmisión a través de canales simulados incorporando condiciones realistas y se concluye con la implementación de un esquema de recepción básico que permite verificar la transmisión.

Posteriormente, en la etapa de *Desarrollo*, se hace una documentación de cómo se obtienen los resultados al realizar la transmisión de las señales Wi-Fi por medio del prototipo físico de la CT Machine. Allí se implementa también el esquema de recepción que realiza los ajustes de sincronización necesarios y procede con la estimación del canal a partir de los campos de entrenamiento presentes en las tramas según corresponda. Luego, se continúa con la ecualización y recuperación de los símbolos, de tal manera que se realiza la visualización del diagrama de constelación y se determina el desempeño de la transmisión. Finalmente, en los *Resultados* se presentan las mediciones y evidencias obtenidas en el proceso y se analizan las posibles causas de estos resultados. Se discute cómo la simulación

reduce la dependencia exclusiva de los componentes físicos de un prototipo, esto permite su validación y análisis de mejora.

7.2 Ventajas del uso de herramientas de simulación en los ámbitos académico, de investigación y desarrollo

Herramientas de simulación de sistemas de comunicaciones inalámbricas, como MATLAB y su WLAN Toolbox, tienen un potencial significativo de aplicación dentro del ámbito académico, especialmente en el campo de la ingeniería de telecomunicaciones. Pues en el contenido de las asignaturas relacionadas con sistemas de telecomunicaciones, se suelen estudiar los tipos de modulación y transmisión de señales básicos, como PSK o QAM, sin embargo, no se profundiza en la implementación práctica de estos conceptos, ni en el conocimiento de las tecnologías y estándares actualmente utilizados en comunicaciones inalámbricas como lo es Wi-Fi (802.11ac/ax). Así se pasa por alto la oportunidad de uso de entornos de simulación eficientes como MATLAB y sus Toolbox especializados en comunicaciones.

La simulación de la generación, transmisión y procesamiento de señales Wi-Fi, permite conectar los conceptos básicos con aplicaciones reales, pues da lugar al análisis de la composición de las tramas logrando comprender conceptos fundamentales, como OFDM y la función de cada uno de los campos de las señales, establecidos por los estándares de la IEEE. Además, brinda conocimiento acerca de los tipos de propagación o modelos de canal típicos en entornos inalámbricos y, sobre los pasos esenciales en el procesamiento de las señales recibidas como la estimación de canal, sincronización y ecualización. Por otro lado, este tipo de simulaciones brindan base para el diseño y la evaluación de sistemas inalámbricos dentro de entornos reales de desarrollo o de investigación, de manera que permite a los estudiantes estar más preparados para enfrentar retos dentro del campo industrial.

Integrando este tipo de prácticas dentro de un currículo académico se impulsaría un modelo de aprendizaje más aplicado y experimental, donde los estudiantes universitarios se acercan más a las tecnologías de comunicaciones modernas que se utilizan actualmente en sectores como el de internet de las cosas (IoT).

El uso de las herramientas de simulación en contextos de investigación y desarrollo es fundamental. Por ejemplo, en el desarrollo del sistema de comunicación inalámbrica de la CT Machine en Siemens Healthineers fue necesario implementar una de estas herramientas, ya que facilitaba la comprensión de las señales a transmitir. Además, brindaba la posibilidad de realizar pruebas de transmisión independientes del hardware y del software propio del prototipo y, así, anticipar el posible comportamiento de la transmisión.

Asimismo, MATLAB, la herramienta utilizada en este caso, permitió no solo generar y adaptar las señales que realmente se transmitirían a través del prototipo, sino también simular un sistema de recepción básico para comprender qué efectos producía el canal real y determinar si la transmisión estaba siendo exitosa.

Sin el uso de herramientas de simulación, la realización de pruebas y análisis de resultados en procesos de desarrollo e investigación serían mucho más complejos, pues se dependería completamente de los prototipos físicos, lo que incrementa los riesgos y reduce la eficiencia.

8. CONCLUSIONES

En conclusión, en el marco del desarrollo de esta práctica se cumplió el objetivo de analizar, generar y transmitir señales Wi-Fi de acuerdo con los estándares IEEE 802.11 al utilizar las herramientas de simulación brindadas por MATLAB y al realizar la transmisión mediante el sistema físico de la CT Machine de Siemens Healthineers. El proceso de pruebas permitió comprender los conceptos de modelado de canales y su estimación, así como la importancia de la ecualización logrando evaluar el desempeño en este entorno de experimentación real y complejo.

Gracias a las simulaciones iniciales, se facilitó la comprensión de la estructura de las distintas tramas Wi-Fi, comprendiendo la utilidad de sus campos de preámbulos y de entrenamiento. Por otro lado, en la evaluación del prototipo de transmisión real se lograron identificar las limitaciones propias de los dispositivos implementados, donde fue necesario implementar un proceso de interpolación y ajuste de la frecuencia de muestreo de tal manera que se adecuara al sistema compuesto por el DAC y la memoria FIFO, al implementar este tipo de técnicas se logra aplicar su comprensión teórica dentro de un marco práctico, brindando una solución temporal, pero útil en un proceso de desarrollo e investigación. Por otro lado, se evidenciaron los efectos del medio y del entorno físico logrando determinar que, aunque la señal poseía un nivel de SNR suficiente; es decir, se contaba con potencia suficiente, el entorno no era favorable para la correcta recepción de la señal, pues se identificaron posibles efectos de Multipath ya que las tramas Wi-Fi obtenidas en la recepción llegaban comúnmente desorganizadas o incompletas. Sin embargo, por medio del uso de las herramientas brindadas por el WLAN Toolbox de MATLAB se logró la

organización de dichas tramas y su procesamiento en una primera fase, donde se obtuvo diagramas de constelación aproximados a los deseados.

Finalmente, se concluye que las herramientas de simulación en sistemas de comunicación inalámbrica brindan un apoyo grandemente significativo en el proceso de desarrollo de prototipos, permitiendo la toma de decisiones a partir de los resultados.

9. REFERENCIAS

[1] Cisco, "What Is a Wireless LAN?," [Online]. Available: <https://www.cisco.com/site/us/en/learn/topics/networking/what-is-a-wireless-lan.html>. Accessed: Sep. 29, 2025.

[2] Huawei, "WLAN," [Online]. Available: <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/WLAN.html>. Accessed: Sep. 29, 2025.

[3] M. Ahmed, "Survey of IEEE 802.11 Standards," [Online]. Available: <https://scispace.com/pdf/survey-of-ieee-802-11-standards-3qe5zzuom6.pdf>. Accessed: Sep. 29, 2025.

[4] Cisco, "White Paper: Cisco Wireless Solutions," [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/white-paper-c11-740788.html>. Accessed: Sep. 29, 2025.

[5] IEEE, "OFDM," [Online]. Available: <https://www.ieee.li/pdf/essay/ofdm.pdf>. Accessed: Sep. 29, 2025.

[6] F. Yilmaz, "Performance Evaluation of Wireless Systems," [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A677189/FULLTEXT01.pdf>. Accessed: Sep. 29, 2025.

[7] R. Jain, "Channel Model Tutorial," [Online]. Available: https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/channel_model_tutorial.pdf. Accessed: Sep. 29, 2025.

[8] D. Tse, *Fundamentals of Wireless Communication*, ch. 2, [Online]. Available: https://web.stanford.edu/~dntse/Chapters_PDF/Fundamentals_Wireless_Communication_chapter2.pdf. Accessed: Sep. 29, 2025.

[9] Gaussian Waves, “Channel Modeling – An Introduction,” [Online]. Available: <https://www.gaussianwaves.com/2013/07/channel-modeling-an-introduction>. Accessed: Sep. 29, 2025.

[10] University of Michigan, “EECS 555 – Lecture 10 Notes,” [Online]. Available: <https://www.eecs.umich.edu/courses/eecs555/lect10.pdf>. Accessed: Sep. 29, 2025.

[11] IEEE 802.11 Working Group, “TGN Channel Models,” [Online]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/03/11-03-0940-04-000n-tgn-channel-models.doc>. Accessed: Sep. 29, 2025.

[12] MathWorks, “wlanTGacChannel System Object,” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/wlan/ref/wlantgacchannel-system-object.html>. Accessed: Sep. 29, 2025.

[13] MathWorks, “wlanTGaxChannel System Object,” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/wlan/ref/wlantgaxchannel-system-object.html>. Accessed: Sep. 29, 2025.

[14] L. Deneire, “OFDM Tutorial,” [Online]. Available: https://webusers.i3s.unice.fr/~deneire/mobile/ofdm_tutorial.pdf. Accessed: Sep. 29, 2025.

[15] DSP Illustrations, “OFDM Channel Estimation,” [Online]. Available: https://dspillustrations.com/pages/pages/courses/course_OFDM/html/05%20-%20OFDM%20Channel%20Estimation%20%281%29.html. Accessed: Sep. 29, 2025.

[16] arXiv, “A Survey on OFDM Techniques,” [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1212.5182>. Accessed: Sep. 29, 2025.

[17] GNU Radio, "Basic OFDM Tutorial," [Online]. Available: https://wiki.gnuradio.org/index.php/Basic_OFDM_Tutorial. Accessed: Sep. 29, 2025.

[18] NTIA, "Report TR-02-394: Channel Models," [Online]. Available: <https://its.ntia.gov/publications/download/TR-02-394.pdf>. Accessed: Sep. 29, 2025.

[19] University of Southampton, "Paper 101: MIMO Performance," [Online]. Available: https://eprints.soton.ac.uk/263112/1/paper_101.pdf. Accessed: Sep. 29, 2025.

[20] NTIA, "Report TR-02-394: Channel Models," [Online]. Available: <https://its.ntia.gov/publications/download/TR-02-394.pdf>. Accessed: Sep. 29, 2025.

Anexos

Se desarrollan ejemplos de sistemas de transmisión y recepción de señales Wi-Fi, utilizando el WLAN Toolbox de MATLAB, para las tres principales configuraciones de estándar IEEE 802.11 presentes en MATLAB.

1. Simulación cfgVHT (802.11 ac)

1.1 Generación de trama

PASO 1

En la *Figura 33* se muestra cómo se realiza la configuración inicial en la generación de la trama. Primero se crea un objeto de configuración VHT, (Muy Alto Rendimiento), que corresponde al estándar IEEE 802.11ac especificando el canal típico de 80 MHz con *CBW80*, también se pueden seleccionar otros anchos de banda de canal, desde *CBW20* hasta *CBW160*. El siguiente parámetro por configurar es el MCS que especifica el tipo de modulación, tasa de código y los bits por símbolo OFDM, en este caso se utiliza *MCS* de 3, el cual corresponde a 16-QAM con tasa de código de 1/2. Siguiendo con el ejemplo, se debe configurar el tamaño del Intervalo de Guarda con la función *GuardInterval* estableciéndolo en tipo “*Short*” o “*Long*”, y, se asigna el valor de carga útil en bytes, utilizando la función *APEPLength* indica que ya no habrá solo un MPDU (MAC Protocol Data Unit) sino varios concatenados en el campo PSDU o de Datos.

```
cfgVHT = wlanVHTConfig;  
cfgVHT.ChannelBandwidth = 'CBW80';    % 80 MHz  
cfgVHT.MCS = 3;                        % 16QAM 1/2  
cfgVHT.APEPLength = 800;               % bytes  
cfgVHT.GuardInterval = "Short" ;      %short 400ns long 800ns
```

Figura 33. Configuración inicial VHT

PASO 2

El siguiente paso se evidencia en la *Figura 34*, donde se define la frecuencia de muestreo, que por defecto es igual al valor del ancho de banda, 80MHz en este caso, en simulación este valor de frecuencia de muestreo funciona pues las subportadoras OFDM ocupan mucho menos de 80 MHz, sin embargo, en escenarios de transmisión empleando hardware es necesario utilizar sobre muestreo. Luego, se genera aleatoriamente la carga útil en bits que depende de su tamaño establecido previamente en bytes. Por último, utilizando la función *wlanWaveGenerator* se construye la PPDU (Unidad de Datos del Protocolo Físico) completa donde se incluyen los preámbulos, el encabezado y los datos útiles. Finalmente, se puede graficar la magnitud de señal a transmitir en el tiempo.

```
payload = randi([0 1], cfgVHT.PSDULength*8, 1);
fs = wlanSampleRate(cfgVHT);
waveform = wlanWaveformGenerator(payload, cfgVHT);

% Envolvente

env = abs (waveform); %magnitud de la señal
t = (1:length(waveform))/fs;

%graficar
figure;
plot(t,env);
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Magnitud')
title("Señal a Transmitir 802.11ac")
```

Figura 34. Definición del Payload en VHT

En la *Figura 35* se muestra cómo están divididos los campos en una trama Wi-Fi VHT.

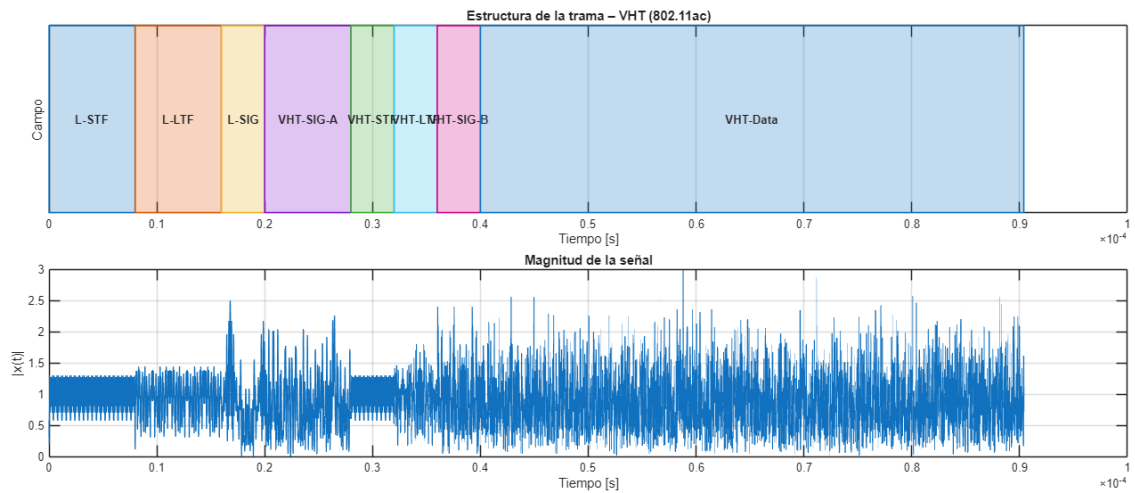


Figura 35. Estructura de la trama VHT 802.11ac. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

Una trama Wi-Fi como esta, está dividida en ocho campos, los tres primeros campos están presente siempre en todos los estándares 802.11, mientras que los demás campos son específicos del 802.11ac.

- El primer campo es el L-STF (Legacy Short Training Field) este campo es utilizado para detectar la señal localizando el inicio de la transmisión pues es una secuencia repetitiva, además, permite la corrección de frecuencia y su duración es de 8 μ s.
- El segundo es el L-LTF (Legacy Long Training Field) este campo se usa para la estimación de canal en cada subportadora, consta de dos símbolos OFDM iguales y su duración total es de 8 μ s.
- El tercero es el L-SIG (Legacy Signal Field) este campo transporta información indispensable para la decodificación de los datos, como la tasa de transmisión, el tipo de codificación y de modulación, el tamaño de la carga útil y un bit de paridad.
- Como cuarto campo se tiene el VHT-SIG-A que consta de dos símbolos OFDM, está codificado en BPSK y contiene información acerca del ancho de banda, del intervalo de guarda y del

tipo de transmisión. Es indispensable para que el receptor sepa como demodular lo que resta de la señal.

- El campo VHT-STF (VHT Short Training Field) consta de un símbolo OFDM y es el bloque de entrenamiento propio de VHT y permite la sincronización en tipos de sincronización MIMO.
- El sexto campo es el VHT-LTF (VHT Long Training Field) este campo de entrenamiento propio de VTH permite estimar el canal cuando se usa Wi-Fi 5.
- El campo VTH-SIG-B es el séptimo campo, está compuesto por uno o dos símbolos y se encarga de la señalización del usuario incluyendo el MCS y la longitud de los datos, esto para lograr la decodificación del campo de datos.
- Por último, en el campo VHT-Data es la parte principal de la trama, allí se encuentran los bits útiles o payload donde los símbolos OFDM se encuentran modulados según lo especificado por el MCS.

1.2 Simulación del canal

La *Figura 36* muestra el segmento de código que simula el canal en este caso. El objeto *wlanGacChannel* del WLAN Toolbox emula los modelos de canal propios de 802.11ac. Luego, se define la frecuencia de muestreo que debe coincidir con la señal que se generó. El parámetro de *'DelayProfile'* define el modelo de perfil multipath en este caso se escoge el *Model-A* que es el más simple, con menos trayectorias y poco retardo, y el parámetro de frecuencia portadora se establece por defecto como 5.25 GHz. El siguiente parámetro es el de la distancia entre el transmisor y receptor en metros. Por otro lado, como en este caso se está simulando un escenario SISO, se establece una sola antena de transmisión y una de recepción; y el espaciado entre elementos de la antena se establece

también en metros. En otros efectos del canal, en este caso no se establece una pérdida por trayecto y shadowing, sin embargo, se puede establecer cambiando el 'None' por 'Pathloss and shadowing'. También se añade interferencia periódica con el parámetro 'FluorescentEffect' y tanto la normalización de la potencia de salida como el filtrado del canal se puede configurar como 1 (*true*) o 0 (*false*).

Al final se aplica el canal a la señal de entrada y además se añade ruido AWGN con un SNR de 25 dB.

```
function rx_signal = Channel(signal,sample_rate)
    channel = wlanTGacChannel( ...
        'SampleRate', sample_rate, ...
        'DelayProfile','Model-A', ... % delay profile multipath
        'CarrierFrequency', 5.25e9,...
        'TransmitReceiveDistance',3,... % distance between Tx and Rx
        'NumTransmitAntennas',1,... %
        'TransmitAntennaSpacing',0.5,... % space between transmit antennas
        'NumReceiveAntennas',1,... %
        'ReceiveAntennaSpacing',0.5,... %space between receiver antennas
        'LargeScaleFadingEffect', 'None',... % desvanecimientos a gran escala (pathloss)
        'FluorescentEffect',1,... % interference
        'NormalizeChannelOutputs',1,... % average unitary power
        'ChannelFiltering',1,... % filter
        'OutputDataType','double',...
        'RandomStream','Global stream',...
        'Seed',73);

    rx_signal = channel(signal);
    snr = 25;
    rx_signal = awgn(rx_signal, snr, 'measured');
end
```

Figura 36. Configuración del canal para VHT

1.3 Recepción y Procesamiento

Se crea una función para implementar la recepción paso a paso, aquí se realiza la estimación del canal, la ecualización y demodulación del campo de datos.

PASO 1

Como se muestra en la *Figura 37*, con la función *wlanFieldIndices*, se extraen las posiciones de cada uno de los campos de VHT y sus parámetros OFDM. Luego se obtiene el campo de VHT-LTF y su tamaño para eliminar el Cyclic Prefix y realizar la Transformada Rápida de Fourier símbolo a símbolo con *fftshift*, después se calcula el promedio de todos los símbolos del campo LTF para obtener una sola estimación y luego se aplica esta estimación únicamente a las subportadoras de datos.

```
function [rx_DataSym_eq, noiseVarEst] = fields_and_demod(cfgVHT, rx_signal)
%% Índices de campos
Ind = wlanFieldIndices(cfgVHT);

%% === VHT-LTF: estimación de canal ===
rx_vhtltf = rx_signal(Ind.VHTLTF(1):Ind.VHTLTF(2), :);

infoLTF = wlanVHTOFDMInfo('VHT-LTF', cfgVHT);
symLenLTF = infoLTF.FFTLength + infoLTF.CPLength;

% Reshape para símbolos OFDM
numSymLTF = floor(length(rx_vhtltf) / symLenLTF);
rx_vhtltf = rx_vhtltf(1:numSymLTF*symLenLTF, :);
symLTF = reshape(rx_vhtltf, symLenLTF, []);
symNoCPLTF = symLTF(infoLTF.CPLength+1:end, :);
fftLTF = fftshift(fft(symNoCPLTF, infoLTF.FFTLength, 1), 1);

% Estimación de canal promediando símbolos
chanEstFull = mean(fftLTF(:, :), 2);

% Subportadoras válidas
chanEst = chanEstFull(infoLTF.DataIndices, :);
```

Figura 37. Función de procesamiento y estimación de canal para VHT

PASO 2

El siguiente paso, en la *Figura 38*, es estimar el ruido. Para esto, se toman las subportadoras nulas, aquellas que no tienen datos ni pilotos, es decir, que deberían tener solo ruido y se calcula su potencia media asumiéndola como la estimación de varianza de ruido.

```
%% Estimación de ruido en subportadoras nulas
nullIdx = setdiff(1:infoLTF.FFTLength, infoLTF.ActiveFFTIndices);
noiseBins = fftLTF(nullIdx, :);
noiseVarEst = mean(abs(noiseBins).^2, 'all');
```

Figura 38. Estimación de ruido para VHT

PASO 3

A continuación, en la *Figura 39*, se extrae únicamente el campo de datos eliminando la parte del Cyclic Prefix y de FFT, así se seleccionan solo las subportadoras que contienen todos los símbolos de datos. Finalmente, se realiza la ecualización Zero-Forcing que se aplica directamente a todos los símbolos de datos.

```
%% DATOS demodulación
rx_data = rx_signal(Ind.VHTData(1):Ind.VHTData(2), :);

infoData = wlanVHTOFDMInfo('VHT-Data', cfgVHT);
symLenData = infoData.FFTLength + infoData.CPLength;

numSymData = floor(length(rx_data) / symLenData);
rx_data = rx_data(1:numSymData*symLenData, :);

symbols = reshape(rx_data, symLenData, []);
symbolsNoCP = symbols(infoData.CPLength+1:end, :);
fftData = fftshift(fft(symbolsNoCP, infoData.FFTLength, 1), 1);

rx_DataSym = fftData(infoData.DataIndices, :);

% Ecualización: división punto a punto
rx_DataSym_eq = rx_DataSym ./ chanEst;
```

Figura 39. Proceso de ecualización para VHT

1.4 Resultados de simulación

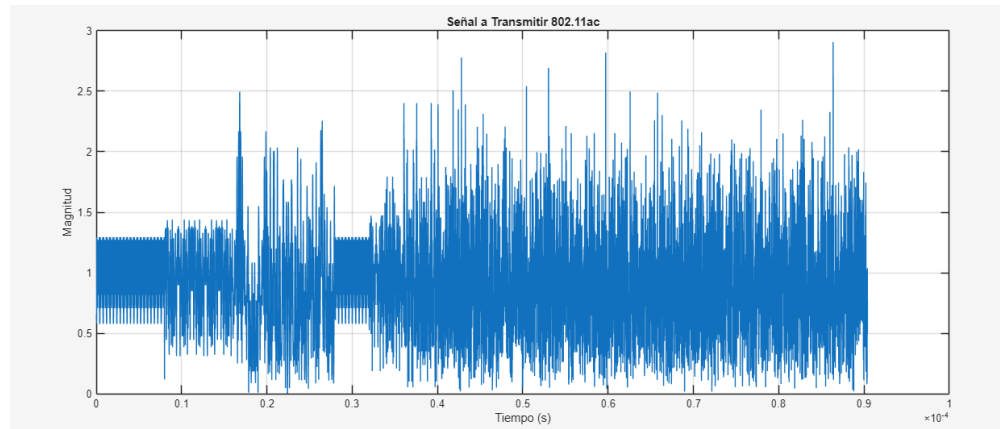


Figura 40. Trama 802.11ac transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

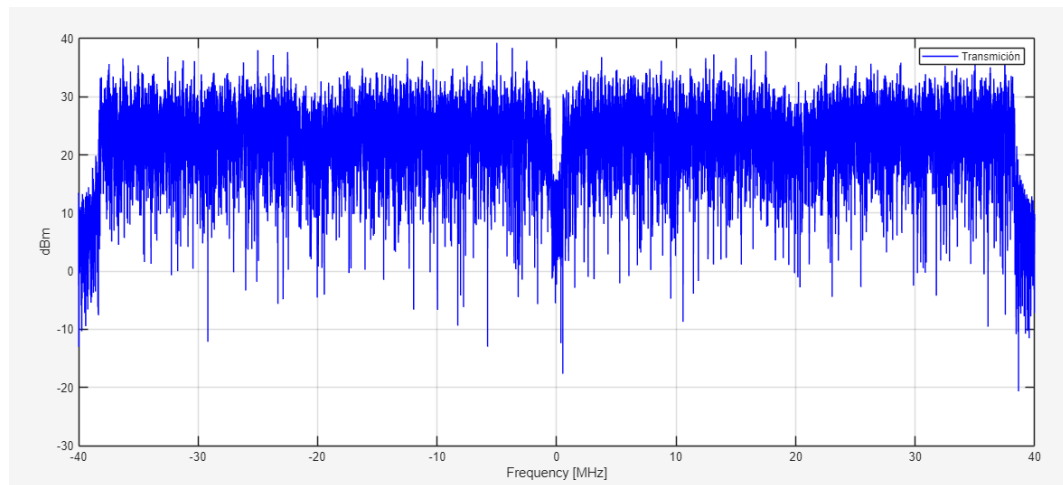


Figura 41. Espectro de trama 802.11ac transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

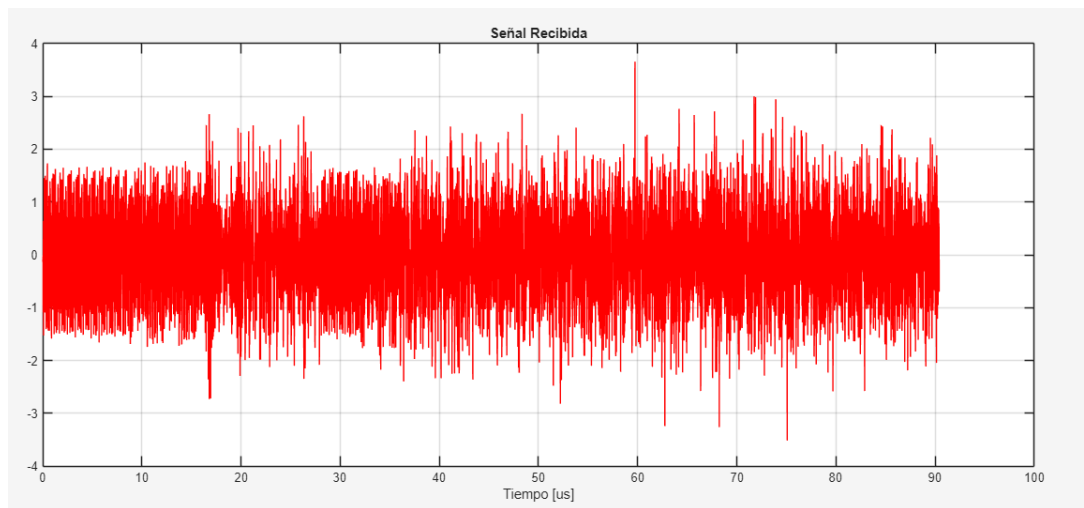


Figura 42. Trama 802.11ac recibida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

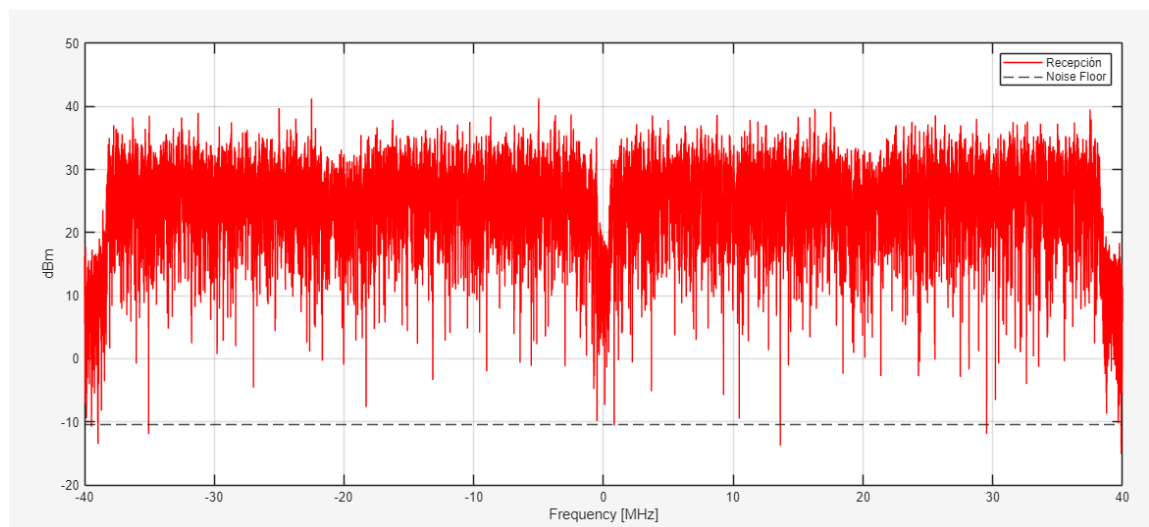


Figura 43. Espectro de trama 802.11ac recibida (Channel Model-A). Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

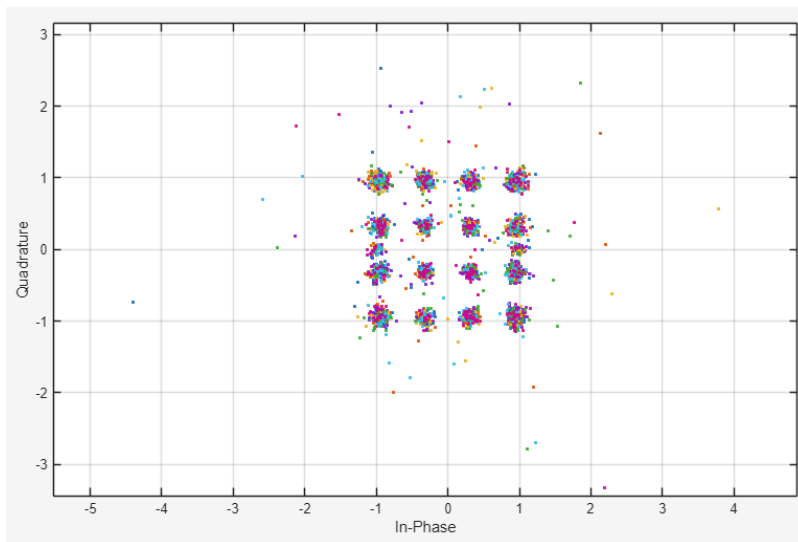


Figura 44. Constelación de símbolos recibidos 16-QAM (Channel Model-A). Fuente:Elaboración propia (MATLAB,2025)

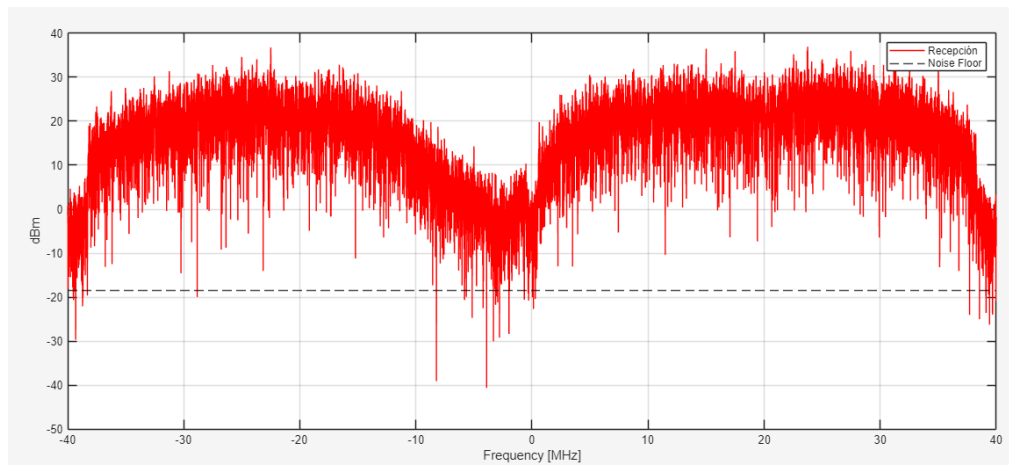


Figura 45. Espectro de trama 802.11ac recibida (Channel Model-B). Fuente:Elaboración propia (MATLAB, 2025)

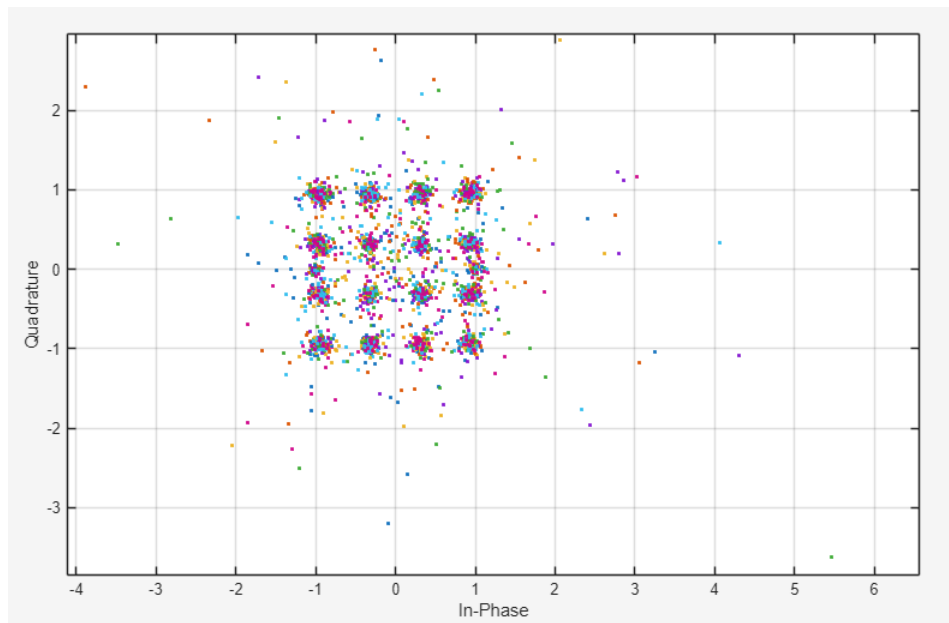


Figura 46. Constelación de símbolos recibidos 16-QAM (Channel Model-B). Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

2. Simulación cfgHESU (802.11ax)

2.1 Generación de trama

PASO 1

Inicialmente, como se indica en la *Figura 47*, se crea un objeto de configuración HE, (High Efficiency Single User), que corresponde al estándar IEEE 802.11ax especificando el canal típico de 80 MHz con *CBW80*. En este caso también se pueden seleccionar otros anchos de banda de canal, desde *CBW20* hasta *CBW160*. Al igual que en el ejemplo el MCS especifica el tipo de modulación, tasa de código y los bits por símbolo OFDM. En este ejemplo se utiliza *MCS* de 5 el cual corresponde a 64-QAM con tasa de código de 2/3. Luego, se debe configurar el valor de carga útil en bytes, utilizando también la función *APEPLength*. Finalmente, se establece el Intervalo de Guarda con la función *GuardInterval* estableciendo el valor de 0.8 microsegundos.

```
%signal configuration
cfgHE = wlanHESUConfig;
cfgHE.ChannelBandwidth = 'CBW80'; % 80MHz channel
cfgHE.NumSpaceTimeStreams = 1;
cfgHE.MCS = 5 ; % 0.BPSK 1.QPSK 1/2 2.QPSK 3/4 3. 16QAM 1/2 4.16QAM 3/4
cfgHE.APEPLength = 1600 ; % payload in bytes
cfgHE.GuardInterval = 0.8; % microsegundos
```

Figura 47. Configuración inicial para HESU

PASO 2

El siguiente paso se evidencia en la *Figura 48*, donde se define la frecuencia de muestreo, que por defecto es igual al valor del ancho de banda 80MHz. Se genera aleatoriamente la carga útil en bits, que depende de su tamaño establecido previamente en bytes. Por último, utilizando la función *wlanWaveGenerator* se construye la PPDU (Unidad de Datos del Protocolo Físico) allí se incluyen los preámbulos, el encabezado y los datos

```
payload = randi([0 1], 8*getPSDULength(cfgHE),1, 'int8');
fs = wlanSampleRate(cfgHE);
waveform = wlanWaveformGenerator(payload, cfgHE);

% Envolvente

env = abs (waveform); %magnitud de la señal
t = (1:length(waveform))/fs;

%graficar
figure;
plot(t,env);
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Magnitud')
title("Señal a Transmitir 802.11ac")
grid on
```

útiles.

Figura 48. Definición del payload para HESU

La *Figura 49* ilustra cómo están divididos los campos en una trama Wi-Fi HESU

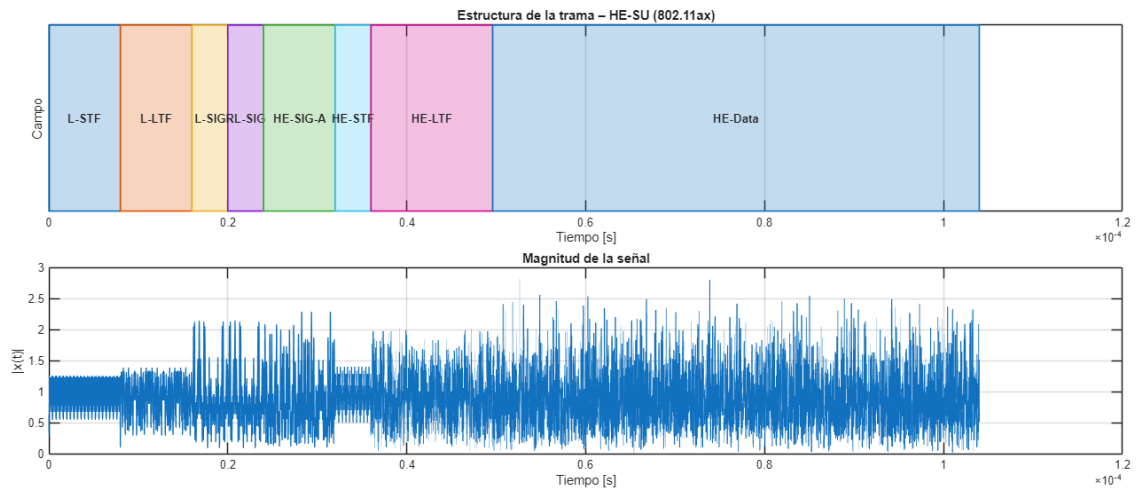


Figura 49. Estructura de la trama HESU 802.11ax.

En este caso, la trama Wi-Fi está dividida en diez campos, donde, de nuevo los tres primeros están presentes también en los demás estándares IEEE 802.11.

- L-STF (Legacy Short Training Field) es el primer campo que es utilizado por el receptor para detectar la señal y sincronizar en tiempo.
- El segundo campo, el *L-LTF (Legacy Long Training Field)*, se usa para la estimación de canal y lograr la ecualización de los campos siguientes.
- El tercero es el L-SIG (Legacy Signal Field), que transporta información básica para la decodificación de los datos, como la duración total de la trama, el tipo de codificación y de modulación
- El cuarto campo, RL-SIG, es una repetición del anterior y es útil para mejorar la robustez.

- Como quinto campo y el primero propio de Wi-Fi 6 es el HE-SIG-A. Este campo contiene información sobre el tipo de PPDU, el Ancho de Banda y el Intervalo de Guarda.
- El siguiente campo es el HE-SIG-B. En este ejemplo aparece vacío, pues es específico para simulaciones MU-MIMO (Multiusuario). Allí se alojaría la información de cada uno de los usuarios configurados.
- El séptimo campo es el HE-STF. Este es similar al L-STF, pero especializado para Wi-Fi 6. Es utilizado para ajustar la ganancia automática y lograr mejor sincronización espacialmente en sistemas MIMO.
- El campo HE-LTF, es el que permite estimar el canal en este tipo de trama Wi-Fi, permitiendo calcular la distorsión en cada subportadora.
- En el campo HE-Data se almacenan datos útiles en la trama y es modulado según el MCS seleccionado; a este campo se le aplica también la modulación OFDM y todo el procesamiento digital.
- Por último, el campo HE-PE es un campo opcional, utilizado en modos específicos como en HE-MU (Multiusuario) donde se extiende un poco la parte final de la trama para lograr una mejor separación entre las tramas sucesivas.

2.2 Simulación del canal

El objeto *wlanGaxChannel* del WLAN Toolbox es la función que emula los modelos de canal propios de 802.11ax o Wi-Fi 6, como se muestra en la *Figura 50*. Dentro de esta función se especifica primeramente la frecuencia de muestreo que debe coincidir con la de la señal, luego, se define el parámetro de '*DelayProfile*' que el modelo de

perfil multipath en este caso se escoge el *Model-D* que es el más severo; con más cambios de trayectoria y retardo. En el siguiente parámetro se establece el ancho de banda de la señal transmitida y se asigna distancia entre el transmisor y receptor en metros. La opción de normalizar las ganancias de los caminos '*NormalizePathGains*', en este caso se establece como *falsa* para conservar las atenuaciones del canal. Por otro lado, se puede utilizar el '*UserIndex*' con un entero positivo en caso de simular escenarios MIMO; en este tipo de transmisión se establece por defecto '*Downlink*' y como se está simulando un escenario SISO, se establece una sola antena de transmisión y una de recepción. El espaciado entre elementos de antena se establece también en metros. Al agregar otros efectos del canal, se establece una pérdida por trayecto y shadowing, sin embargo, también se añade el número de pisos penetrados e interferencia periódica con el parámetro '*FluorescentEffect*'. La normalización de la potencia se desactiva en este ejemplo y el filtrado del canal se activa.

Finalmente, se aplica el canal a la señal de entrada y además, se añade ruido AWGN con un SNR de 25 dB.

```

function rx_signal = Channel(signal,sample_rate)
    channel = wlanTGaxChannel( ...
        'SampleRate', sample_rate, ...
        'DelayProfile', 'Model-D', ...           % Modelo más severo de multipath
        'ChannelBandwidth', 'CBW80', ...
        'CarrierFrequency', 5.925e9, ...         % Frecuencia más alta permitida (más pérdida)
        'TransmitReceiveDistance', 100, ...      % Distancia muy grande (mayor pathloss)
        'NormalizePathGains', false, ...         % NO normalizar → conserva la atenuación real
        'UserIndex', 0, ...                     % Usuario alejado (impacta el canal en escenarios MU-MIMO)
        'TransmissionDirection', 'Downlink', ...
        'NumTransmitAntennas', 1, ...
        'TransmitAntennaSpacing', 2, ...         % Separación grande → puede inducir más fading
        'NumReceiveAntennas', 1, ...
        'ReceiveAntennaSpacing', 2, ...
        'LargeScaleFadingEffect', 'Pathloss and shadowing', ... % Desvanecimiento a gran escala activado
        'NumPenetratedFloors', 3, ...             % Simula múltiples pisos (más pérdida y delay)
        'FluorescentEffect', true, ...           % Interferencia artificial activada
        'NormalizeChannelOutputs', false, ...    % No normalizar salida (mantener pérdidas reales)
        'ChannelFiltering', true, ...
        'OutputDataType', 'double', ...
        'RandomStream', 'mt19937ar with seed', ...
        'Seed', 42);
    rx_signal = channel(signal);
    snr = 25;
    rx_signal = awgn(rx_signal, snr, 'measured');
end

```

Figura 50. Configuración del canal para HESU

2.3 Recepción y Procesamiento

Se implementa una función de recepción y procesamiento para realizar la estimación de canal y la ecualización. Así se logra una correcta demodulación de los datos.

PASO 1

Utilizando la función de *wlanFieldIndices*, como se ve en la *Figura 51*, se extraen las posiciones de cada uno de los campos de HE y sus parámetros OFDM; se obtiene el campo de HE-LTF para demodularlo y a partir de esto, se realiza la estimación del canal por subportadora.

```
function [rx_DataSym_eq, noiseVarEst] = fields_and_demod(cfgHE,rx_signal)
%% LTF Field
Ind = wlanFieldIndices(cfgHE); %obtain field indices
rx_HEltf = rx_signal(Ind.HELTF(1):Ind.HELTF(2), :); %extract the complete HE-LTF field

rx_HEltfDemod = wlanHEDemodulate(rx_HEltf,'HE-LTF', cfgHE); %demod HE-LTF fields
chanEst = wlanHELTFChannelEstimate(rx_HEltfDemod, cfgHE); % channel estimation
```

Figura 51. Función de procesamiento y estimación de canal para HESU

PASO 2

En la *Figura 52*, se realiza la estimación del ruido tomando el campo HE-LTF y aplicando sobre él la Transformada Rápida de Fourier, para posteriormente tomar únicamente las subportadoras nulas, aquellas que no están transportando información. Sobre ellas, se calcula la potencia media que corresponde a la varianza del ruido.

```
%% noise estimation
% Obtener parámetros OFDM para HE-LTF
info = wlanHEOFDMInfo('HE-LTF', cfgHE);

% Realizar la FFT manual (simulando la demodulación OFDM completa)
ltfSymbols = reshape(rx_HEltf, info.FFTLength + info.CPLength, []);
ltfSymbolsNoCP = ltfSymbols(info.CPLength+1:end, :);

% FFT
ltfFFT = fftshift(fft(ltfSymbolsNoCP, info.FFTLength, 1), 1); % [FFTLength x NumSymbols]

% Extraer las subportadoras nulas
nullIdx = setdiff(1:info.FFTLength, info.ActiveFFTIndices);
noiseSubcarriers = ltfFFT(nullIdx, :);

% Estimación de varianza de ruido
noiseVarEst = mean(abs(noiseSubcarriers).^2, 'all')
```

Figura 52. Estimación del ruido para HESU

PASO 3

En el último paso, como se muestra en la *Figura 53*, se toma únicamente el campo de datos útiles y se utiliza la función *wlanHEDemodulate* para realizar la

demodulación de este campo. Luego, se extraen únicamente las subportadoras de datos para extraer el efecto del canal y lograr realizar la ecualización. En este caso, se implementa Zero-Forcing como ecualización, realizando una división elemento por elemento.

```
%% Demodulation
sym = wlanHEDemodulate(rx_Data, 'HE-Data', cfgHE); % demodulate the data fields

info_Data = wlanHEOFDMInfo('HE-Data',cfgHE);
rx_DataSym = sym(info_Data.DataIndices,:,:); % subcarriers x OFDM Symbols x streams
h = chanEst(info_Data.DataIndices,:,:); %channel response
rx_DataSym_eq = rx_DataSym ./ h; %equalization

end
```

Figura 53. Ecualización para HESU

Una vez demodulados y ecualizados los símbolos, se puede graficar el diagrama de constelación.

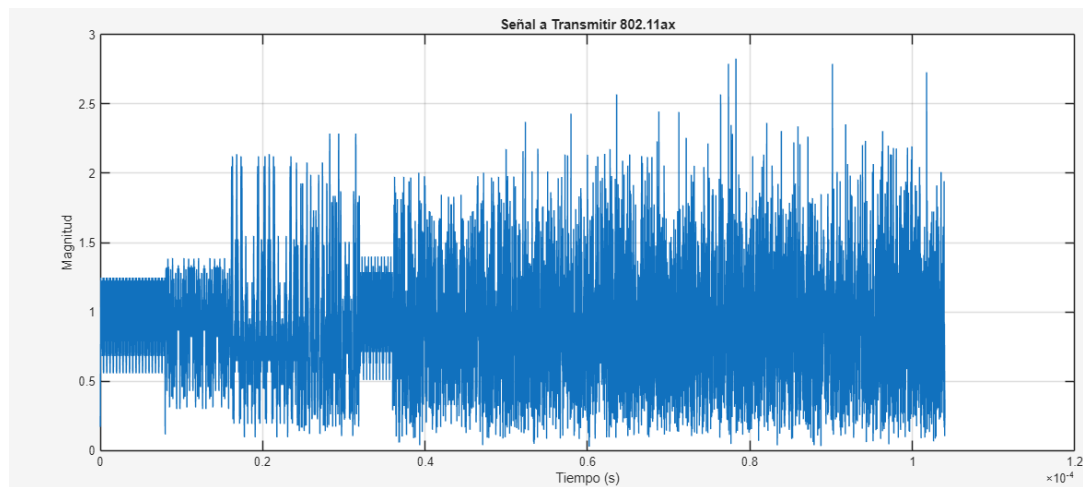


Figura 54. Trama 802.11ax transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

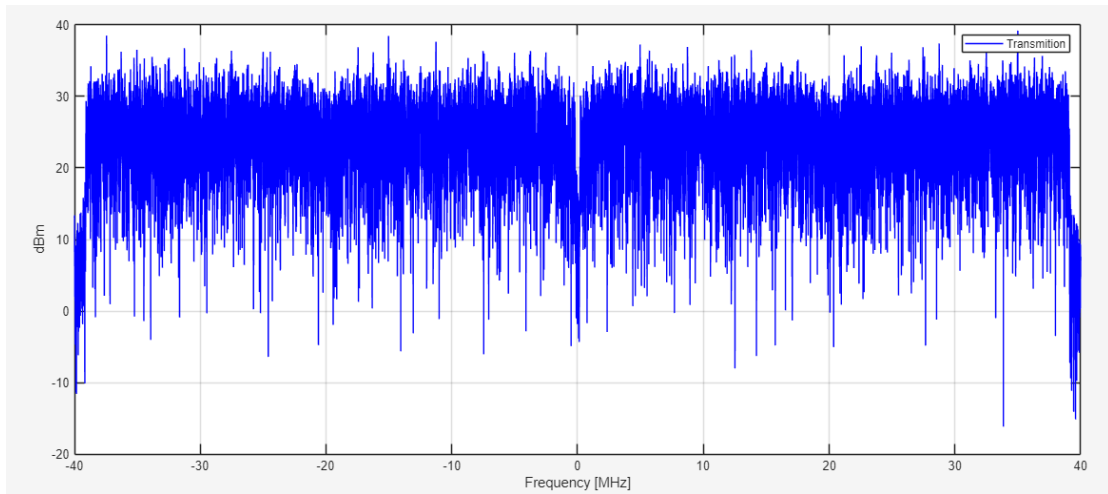


Figura 55. Espectro de la trama 802.11ax transmitida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

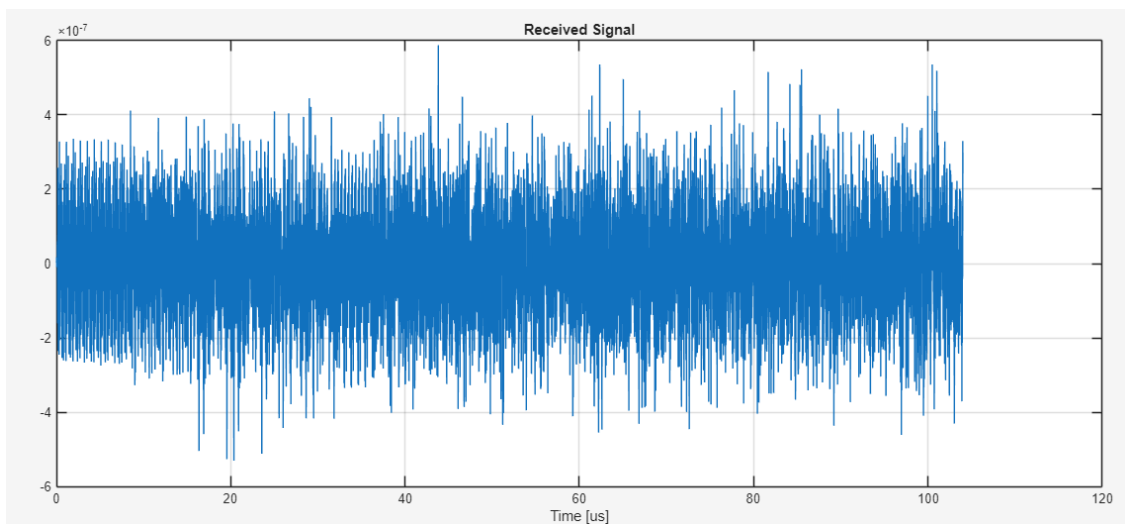


Figura 56. Trama 802.11ax recibida. Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

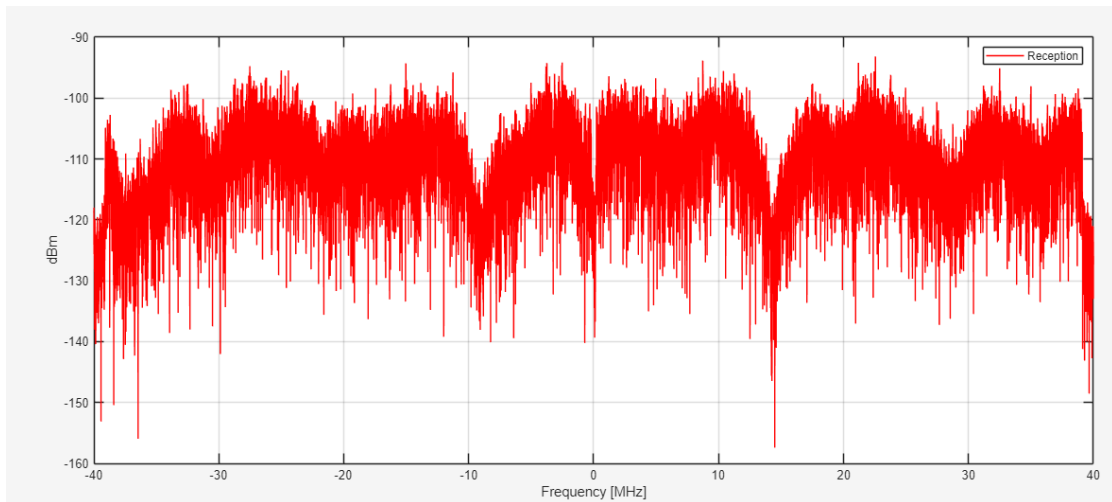


Figura 57. Espectro Trama 802.11ax recibida (Channel Model-D). Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

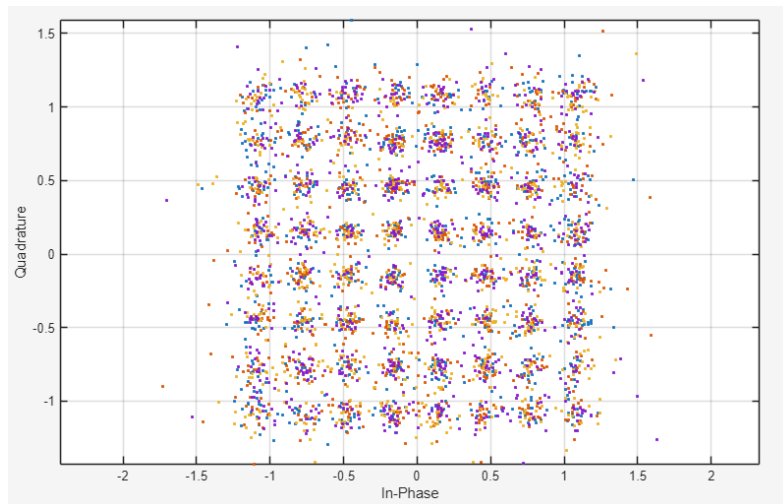


Figura 58. Constelación de símbolos recibidos 64-QAM (Channel Model-D). Fuente: Elaboración propia (MATLAB,2025)

