VISIÓN ACADÉMICA
ISSN: 3103-1536

Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 354- 374

DOI: https://doi.org/10.70577/sdbwhp97

Evaluación del desempeño de un enlace de televisión digital terrestre mediante la simulación de un canal con desvanecimiento rayleigh en matlab simulink

Nayeli Anahí López Zambrano[1]
https://orcid.org/0009-0007-7532-8085
nlopez5246@utm.edu.ec
Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo - Ecuador

Dannyll Michellc Zambrano Zambrano[2]
https://orcid.org/0000-0003-4413-4425
michellc.zambrano@utm.edu.ec
Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo - Ecuador

Freddy Andrés Carrera Sánchez[3]
https://orcid.org/0000-0003-3232-0853
freddy.carrera@utm.edu.ec
Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo - Ecuador

Cómo citar

López Zambrano, N. A. ., Zambrano Zambrano, D. M. ., & Carrera Sánchez, F. A. . (2026). Evaluación del desempeño de un enlace de televisión digital terrestre mediante la simulación de un canal con desvanecimiento rayleigh en matlab simulink. *Visión Académica*, *4*(4), 354-374. https://doi.org/10.70577/sdbwhp97

Fecha de recepción: 2026-10-12

Fecha de aceptación: 2026-10-26

Fecha de publicación: 2026-11-05

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el desempeño de un enlace de televisión digital terrestre mediante la simulación de un canal con desvanecimiento Rayleigh en MATLAB Simulink, considerando diferentes condiciones de relación señal-ruido, frecuencia Doppler y esquemas de modulación digital. Se empleó una metodología cuantitativa, aplicada y experimental basada en simulación, mediante la implementación de un modelo de comunicación que incorporó generación de datos binarios, modulación, canal con desvanecimiento Rayleigh, ruido aditivo blanco gaussiano, demodulación y cálculo de la tasa de error de bits. Se analizaron las modulaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM bajo frecuencias Doppler de 1, 10, 50 y 100 Hz, evaluando su comportamiento frente a diferentes niveles de relación señal-ruido. Los resultados mostraron que, en términos generales, el incremento de la relación señal-ruido produjo una disminución de la tasa de error de bits, aunque el comportamiento varió según la frecuencia Doppler y el esquema de modulación. En la comparación a 50 Hz, QPSK alcanzó una tasa de error inferior a 10^{-3} a 16 dB, 16-QAM a 22 dB, mientras que 64-QAM permaneció por encima de dicho umbral hasta 24 dB. Los resultados evidenciaron que el orden de modulación y la dinámica temporal del canal influyeron conjuntamente en el desempeño del enlace.

Palabras clave: Televisión digital terrestre; desvanecimiento Rayleigh; modulación digital; tasa de error de bits; frecuencia Doppler.

VISIÓN ACADÉMICA
ISSN: 3103-1536

Performance evaluation of a digital terrestrial television link through rayleigh fading channel simulation using matlab simulink

Abstract

This study aimed to evaluate the performance of a digital terrestrial television link by simulating a Rayleigh fading channel in MATLAB Simulink, considering various signal-to-noise ratio conditions, Doppler frequencies, and digital modulation schemes. A quantitative, applied, and experimental simulation-based methodology was employed, implementing a communication model that incorporated binary data generation, modulation, a Rayleigh fading channel, additive white Gaussian noise, demodulation, and bit error rate calculation. QPSK, 16-QAM, and 64-QAM modulation schemes were analyzed at Doppler frequencies of 1, 10, 50, and 100 Hz, evaluating their performance across different signal-to-noise ratio levels. The results showed that, generally, increasing the signal-to-noise ratio led to a decrease in the bit error rate, although performance varied depending on the Doppler frequency and modulation scheme. In the comparison at 50 Hz, QPSK achieved an error rate below 10^{-3} at 16 dB and 16-QAM at 22 dB, whereas 64-QAM remained above that threshold up to 24 dB. The results demonstrated that the modulation order and the channel's temporal dynamics jointly influenced the link's performance.

Keywords: Digital terrestrial television; Rayleigh fading; digital modulation; bit error rate; Doppler frequency.

Introducción

Las telecomunicaciones inalámbricas constituyen uno de los pilares fundamentales del desarrollo tecnológico contemporáneo, al permitir la transmisión de información mediante ondas electromagnéticas sin requerir medios físicos de conexión. Su evolución ha impulsado la aparición de sistemas de comunicación cada vez más eficientes, capaces de ofrecer mayores velocidades de transmisión, mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico y una mayor confiabilidad en la prestación de servicios digitales. En este contexto, la Televisión Digital Terrestre (TDT) representa uno de los avances más significativos en los sistemas de radiodifusión, al sustituir progresivamente la televisión analógica mediante tecnologías de modulación y codificación digital que mejoran la calidad de imagen y sonido, incrementan la eficiencia espectral y fortalecen la robustez frente a interferencias y perturbaciones del canal de propagación. La evolución del estándar DVB-T hacia DVB-T2 ha permitido aumentar la capacidad de transmisión, optimizar el uso del ancho de banda y mejorar el desempeño de los sistemas de difusión terrestre, consolidándose como uno de los estándares de mayor adopción para servicios de televisión digital en diferentes regiones del mundo (Eizmendi, 2014).

El comportamiento de un sistema de Televisión Digital Terrestre no depende únicamente de las características del transmisor y del receptor, sino también de las condiciones del canal de propagación por el que se transmite la señal. En los entornos inalámbricos, la propagación de

las ondas electromagnéticas se encuentra influenciada por fenómenos físicos como la reflexión, la difracción y la dispersión ocasionados por edificios, montañas, árboles y otras estructuras presentes en el entorno. Como consecuencia de estos fenómenos, múltiples réplicas de la señal llegan al receptor con diferentes retardos, amplitudes y fases, generando el efecto conocido como propagación multitrayectoria (multipath propagation). Este comportamiento produce fluctuaciones aleatorias en la potencia de la señal recibida, conocidas como desvanecimiento (fading), las cuales afectan directamente la calidad del enlace y representan uno de los principales factores limitantes en los sistemas modernos de radiocomunicaciones (Molisch, 2023).

En los diferentes modelos estadísticos creados para dar una representación en el comportamiento de los canales inalámbricos, el modelo de desvanecimiento Rayleigh compone uno de los más utilizados en investigaciones relacionadas con la parte de comunicación digital. Este modelo utiliza escenarios donde no existe una trayectoria directa entre el transmisor y el receptor (Non-Line-of-Sight, NLOS). En estas condiciones, la señal recibida corresponde a la superposición de numerosas componentes reflejadas y dispersadas, cuyas variaciones aleatorias pueden ocasionar pérdidas temporales de potencia, incremento en la tasa de errores y degradación del desempeño del sistema. Debido a su capacidad para representar de manera realista este tipo de escenarios, el canal Rayleigh se ha convertido en un referente para la evaluación y validación de algoritmos, técnicas de modulación y sistemas de comunicación inalámbrica (Liu, 2023).

El análisis del rendimiento de un sistema de comunicaciones digitales exige el uso de indicadores cuantitativos que permitan medir de forma objetiva la calidad de la transmisión. Dentro de los parámetros de uso más habitual se encuentra la Relación Señal-Ruido (Signal-to-Noise Ratio, SNR), que expresa la relación entre la potencia de la señal útil y la potencia del ruido existente en el canal, así como la Tasa de Error de Bits (Bit Error Rate, BER), que mide la proporción de bits recibidos erróneamente respecto al total de bits transmitidos. Estas métricas constituyen los principales indicadores para comparar el comportamiento de diferentes esquemas de modulación y modelos de canal, permitiendo analizar el impacto del ruido y del desvanecimiento sobre la confiabilidad de los sistemas de transmisión digital (Fernandes, 2025).

Asimismo, el desarrollo de herramientas computacionales especializadas ha permitido reproducir con elevada precisión el comportamiento de sistemas de comunicaciones bajo diferentes condiciones de propagación. En este contexto, MATLAB Simulink se ha afianzado como una de las plataformas más manejadas en el ámbito académico y de investigación debido a que incorpora bibliotecas específicas para el modelado de sistemas digitales, canales AWGN, canales con desvanecimiento Rayleigh y Rician, así como herramientas para el cálculo automático de parámetros de desempeño como BER, SNR y SER. Estas capacidades facilitan el desarrollo de modelos reproducibles, reducen los costos experimentales y permiten evaluar diferentes escenarios de propagación antes de su implementación en sistemas reales (Jiang y Gui, 2020)

El objetivo general de la investigación es evaluar el desempeño de un enlace de Televisión Digital Terrestre (TDT) mediante simulación, por otra parte los objetivos específicos se basan en Revisar los fundamentos teóricos de la Televisión Digital Terrestre, el desvanecimiento en canales inalámbricos y los modelos aplicados a sistemas de comunicaciones digitales, diseñar e implementar en MATLAB Simulink un modelo de simulación de un enlace de Televisión Digital Terrestre que incorpore un canal con desvanecimiento Rayleigh y por último, evaluar el desempeño del enlace de Televisión Digital Terrestre mediante el análisis de indicadores como la tasa de error de bits (BER) y la correlación señal-ruido (SNR), obtenidos a partir de la simulación en MATLAB Simulink.

Material y Métodos

La investigación se realizó bajo una metodología cuantitativa dado que el efecto del desempeño del enlace de Televisión Digital Terrestre (TDT) radica en el análisis de parámetros medibles de acuerdo a simulaciones, como por ejemplo: Relación Señal-Ruido (SNR) y la Tasa de Error de Bits (BER), con estos parámetros se obtuvieron las principales características del comportamiento del sistema de comunicación en función de las condiciones de propagación; además, los niveles de degradación que un canal con desvanecimiento Rayleigh puede introducir.

El estudio corresponde a una investigación de tipo aplicada y experimental, debido a que se orientó al análisis práctico del rendimiento de un sistema de transmisión digital mediante la implementación de un modelo computacional en MATLAB Simulink. La investigación aplicada permitió emplear fundamentos teóricos de comunicaciones inalámbricas para evaluar un escenario específico de transmisión de televisión digital terrestre, mientras que el diseño experimental permitió modificar las condiciones del canal y observar su influencia sobre la calidad del enlace.

El diseño de investigación fue experimental basado en simulación, debido a que se construyó un modelo de comunicación digital compuesto por bloques funcionales equivalentes a las etapas principales de un enlace TDT. En este modelo se analizaron diferentes escenarios de operación mediante la variación de parámetros del canal inalámbrico, manteniendo constantes las características del sistema transmisor y receptor con el propósito de identificar el impacto producido por el desvanecimiento Rayleigh sobre el desempeño de la transmisión.

Entorno de simulación

La implementación del modelo experimental se realizó utilizando el software MATLAB Simulink, debido a sus capacidades para representar sistemas de comunicación digital mediante bloques funcionales configurables. La herramienta permitió integrar elementos correspondientes a la generación de datos, modulación digital, transmisión a través del canal inalámbrico, incorporación de ruido, recepción de la señal y cálculo automático de parámetros de desempeño.

El modelo desarrollado estuvo compuesto por una cadena de transmisión digital conformada por los siguientes bloques principales:

- Generador de datos binarios aleatorios.
- Modulador digital.
- Canal inalámbrico con distribución de desvanecimiento Rayleigh.
- Canal con ruido AWGN (Additive White Gaussian Noise).
- Demodulador digital.
- Comparador de bits transmitidos y recibidos.
- Analizador de la tasa de error de bits (BER).

Para representar condiciones de propagación con múltiples trayectorias y ausencia de una línea de vista directa (*Non-Line-of-Sight*, NLOS), se incorporó un modelo de canal con desvanecimiento Rayleigh. Este modelo representa escenarios en los que la señal recibida resulta de la combinación de múltiples componentes que llegan con diferentes amplitudes y fases debido a los fenómenos de reflexión, dispersión y difracción. Como consecuencia, la amplitud de la señal resultante puede experimentar variaciones temporales que afectan la detección de los símbolos transmitidos. Adicionalmente, se incorporó ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN) para evaluar el comportamiento del sistema ante diferentes niveles de relación señal-ruido. La frecuencia Doppler se configuró en 1, 10, 50 y 100 Hz con el propósito de estudiar la influencia de la variación temporal del canal sobre el rendimiento de las modulaciones evaluadas. Los principales parámetros considerados en la configuración experimental fueron el modelo estadístico de desvanecimiento Rayleigh, la propagación multitrayectoria, la condición NLOS, los niveles de SNR, las frecuencias Doppler y la BER como indicador de desempeño.

Tabla 1.

Configuración de parámetros del sistema de simulación

Parámetro	Configuración utilizada
Software de simulación	MATLAB Simulink
Tipo de investigación	Cuantitativa, aplicada y experimental
Diseño de investigación	Experimental basado en simulación
Sistema evaluado	Enlace de Televisión Digital Terrestre (TDT)
Modelo de canal	Canal con desvanecimiento Rayleigh
Tipo de propagación	Multitrayectoria
Condición del enlace	Sin línea de vista directa (NLOS)
Ruido incorporado	AWGN (Additive White Gaussian Noise)
Modulaciones evaluadas	QPSK, 16-QAM y 64-QAM
Frecuencias Doppler	1, 10, 50 y 100 Hz
Parámetro de variación principal	Relación señal-ruido (SNR)

Indicador de desempeño	Tasa de error de bits (BER)
Bits transmitidos – QPSK	35 066 bits por escenario
Bits transmitidos – 16-QAM	36 470 bits por escenario
Bits transmitidos – 64-QAM	37 874 bits por escenario
Escenarios QPSK	Q1: 1 Hz; Q2: 10 Hz; Q3: 50 Hz; Q4: 100 Hz
Escenarios 16-QAM	Q5: 1 Hz; Q6: 10 Hz; Q7: 50 Hz; Q8: 100 Hz
Escenarios 64-QAM	Q9: 1 Hz; Q10: 10 Hz; Q11: 50 Hz; Q12: 100 Hz
Comparación adicional	QPSK, 16-QAM y 64-QAM a 50 Hz
Criterio de análisis	Comportamiento de BER frente a variaciones de SNR y frecuencia Doppler

Fuente: *elaboración propia*

El desempeño del enlace TDT fue evaluado mediante dos indicadores principales:

Relación Señal-Ruido (SNR): Se pudo estudiar la relación que existe entre el nivel de ruido existente en el canal y la calidad de la señal recibida. Para ello se implementaron simulaciones con distintos valores SNR, lo permitía a su vez observar la relación existente entre la potencia de la señal útil y las desviaciones/distorsiones introducidas a lo largo de la transmisión.

Tasa de error de bits (BER): se utilizó como indicador de fiabilidad del sistema, ya que nos proporciona información sobre el número de errores que se producen al recuperar toda la información transmitida. La BER se calcula relacionando la secuencia original enviada por el emisor con la secuencia que obtenemos después de la recepción y demodulación.

La expresión utilizada para determinar la BER fue:

$$\text{BER} = \frac{N_e}{N_t}$$

Donde:

N_e : Números de bits recibidos incorrectamente

N_t : números total de bits transmitidos

La BER es un valor adimensional. Cuanto menor sea su resultado, mayor será la proporción de bits recuperados correctamente; por el contrario, un valor elevado indica una mayor incidencia de errores en la transmisión. Cuando no se registran errores durante la simulación, la BER observada es igual a cero, lo que no implica necesariamente que la probabilidad real de error del sistema sea nula.

Configuración de los escenarios experimentales

Para estudiar el comportamiento del enlace bajo diferentes condiciones de propagación, se definieron doce escenarios principales que combinaron tres esquemas de modulación digital con cuatro frecuencias Doppler. Se utilizaron las modulaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM, mientras que las frecuencias Doppler consideradas fueron 1, 10, 50 y 100 Hz.

La distribución de los escenarios se estableció de la siguiente manera:

- **QPSK:** Q1, Q2, Q3 y Q4, correspondientes a las frecuencias Doppler de 1, 10, 50 y 100 Hz, respectivamente.
- **16-QAM:** Q5, Q6, Q7 y Q8, correspondientes a las frecuencias Doppler de 1, 10, 50 y 100 Hz, respectivamente.
- **64-QAM:** Q9, Q10, Q11 y Q12, correspondientes a las frecuencias Doppler de 1, 10, 50 y 100 Hz, respectivamente.

Asimismo, se estableció una comparación adicional entre las tres modulaciones a una frecuencia Doppler de 50 Hz, con el propósito de examinar sus diferencias de desempeño bajo una misma condición de variación temporal del canal. En cuanto a la cantidad de datos procesados, se registraron 35 066 bits por escenario para QPSK, 36 470 para 16-QAM y 37 874 para 64-QAM. Estos valores corresponden a las cantidades utilizadas en las respectivas configuraciones de simulación. Debido a que no se empleó una cantidad idéntica de bits en los tres esquemas, esta diferencia se consideró al interpretar los resultados de BER, especialmente cuando los valores obtenidos fueron bajos o no se registraron errores. La cantidad de bits procesados debe distinguirse del número de símbolos transmitidos, puesto que cada esquema representa una cantidad diferente de bits por símbolo: dos para QPSK, cuatro para 16-QAM y seis para 64-QAM. Por esta razón, la explicación definitiva de las diferencias en los totales de bits debe corresponder a la configuración efectiva del generador de datos y del modulador en Simulink. Para asegurar una comparación experimental rigurosa, también se consideraron las condiciones del canal, los niveles de SNR y las frecuencias Doppler utilizados en cada escenario.

Procedimiento experimental

El procedimiento de evaluación del enlace TDT se desarrolló en cuatro fases.

Fase 1. Construcción del modelo de comunicación. Se implementó en MATLAB Simulink una cadena de transmisión digital compuesta por los bloques de generación de datos binarios, modulación, canal inalámbrico, demodulación y comparación de las secuencias transmitidas y recibidas. Esta estructura permitió obtener los parámetros necesarios para evaluar el rendimiento del enlace.

Fase 2. Configuración del canal inalámbrico. Se incorporaron el desvanecimiento Rayleigh y el ruido AWGN para representar las condiciones de propagación consideradas en el estudio.

Además, se configuraron las frecuencias Doppler de 1, 10, 50 y 100 Hz con el propósito de analizar el comportamiento del sistema ante diferentes grados de variación temporal del canal.

Fase 3. Ejecución de las simulaciones. Se ejecutaron los escenarios correspondientes a las modulaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Durante las simulaciones se variaron los niveles de SNR y las frecuencias Doppler de acuerdo con la planificación experimental, manteniendo las demás condiciones de configuración según correspondía a cada comparación.

Fase 4. Obtención y análisis de resultados. Se registraron los valores de BER obtenidos en cada escenario y se organizaron para su análisis comparativo. Los resultados permitieron examinar la relación entre la SNR, la frecuencia Doppler y el esquema de modulación, así como identificar las condiciones en las que se incrementaron los errores de transmisión. Finalmente, se comparó el comportamiento de las tres modulaciones a 50 Hz para analizar sus diferencias bajo una condición común de variación temporal del canal.

Resultados y Discusión

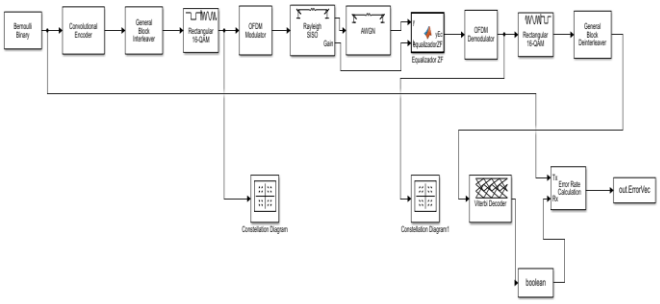
La simulación realizada en MATLAB Simulink permitió estudiar de un enlace de Televisión Digital Terrestre (TDT) bajo situaciones de desvanecimiento Rayleigh. Para realizar este estudio se utilizaron diferentes valores de relación señal-ruido (SNR), frecuencias Doppler y tipos de modulación. El rendimiento del enlace fue medido en gran medida por la tasa de error de bits (BER), el número de bits erróneos y la observación de los diagramas de constelación generados durante la simulación.

Implementación del modelo de simulación del enlace TDT

En correspondencia con el segundo objetivo específico, se diseñó e implementó en MATLAB Simulink el modelo de simulación del enlace de Televisión Digital Terrestre. El esquema desarrollado integra las diferentes etapas necesarias para representar el proceso de transmisión y recepción de una señal digital, incluyendo la generación de datos, modulación, incorporación del canal con desvanecimiento Rayleigh, procesamiento de la señal recibida, demodulación y evaluación de los errores. El modelo permitió modificar las condiciones de operación del canal para analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes valores de SNR y frecuencia Doppler. De esta manera, fue posible obtener los datos necesarios para calcular la BER y observar las modificaciones producidas sobre los símbolos transmitidos.

Figura 1.

Modelo de simulación del enlace de Televisión Digital Terrestre implementado en MATLAB Simulink.



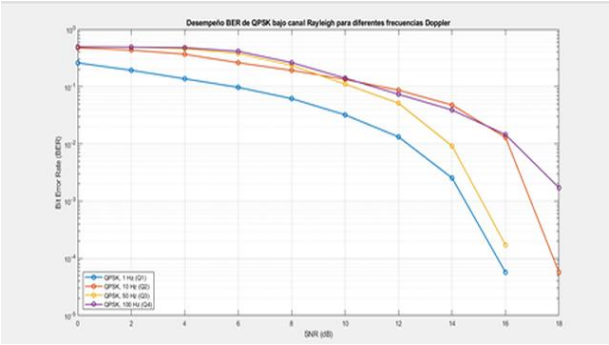
Los resultados obtenidos mediante el modelo permitieron realizar pruebas repetibles bajo diferentes condiciones del canal, manteniendo los mismos parámetros generales de transmisión. Esta configuración facilitó la comparación entre los escenarios evaluados y permitió determinar cómo las variaciones de SNR y frecuencia Doppler influyen sobre la calidad de la transmisión.

Desempeño de QPSK bajo diferentes frecuencias Doppler

Como primera etapa de la evaluación del enlace de Televisión Digital Terrestre, se analizó el comportamiento de la modulación QPSK bajo un canal con desvanecimiento Rayleigh, considerando cuatro escenarios de frecuencia Doppler: 1, 10, 50 y 100 Hz, correspondientes a las configuraciones Q1, Q2, Q3 y Q4, respectivamente. El desempeño fue evaluado mediante la tasa de error de bits (BER) en función de la relación señal-ruido (SNR), utilizando un total de 35 066 bits transmitidos en cada escenario. El análisis se orientó a identificar la influencia del incremento de la SNR sobre la reducción de los errores y las variaciones observadas en la BER ante diferentes condiciones de frecuencia Doppler, considerando que el canal Rayleigh introduce variaciones temporales en la señal recibida debido al efecto de la propagación multitrayectoria.

Figura 2.

Desempeño de la BER de QPSK bajo un canal Rayleigh para diferentes frecuencias Doppler.



La **Figura 2** muestra una tendencia general de reducción de la BER conforme aumenta la SNR en los cuatro escenarios analizados. Este comportamiento se debe a que, al incrementar la relación señal-ruido, la potencia de la señal recibida adquiere mayor predominio frente al ruido AWGN, reduciendo la probabilidad de que los símbolos recibidos sean desplazados fuera de sus regiones de decisión. No obstante, debido al desvanecimiento Rayleigh, la disminución de la BER no depende exclusivamente de la SNR, ya que las variaciones de amplitud y fase producidas por la propagación multitrayectoria pueden generar errores incluso cuando la potencia media de la señal es elevada.

Para una frecuencia Doppler de 1 Hz, la BER disminuyó de 0,2592 a 0 dB hasta $5{,}7035 \times 10^{-5}$ a 16 dB, pasando por valores de 0,0321 a 10 dB, 0,0132 a 12 dB y 0,0025 a 14 dB. La reducción resulta particularmente marcada en el intervalo de SNR más elevado, lo que indica que, bajo esta realización del canal, una vez que el nivel de ruido pierde influencia sobre las decisiones de los símbolos QPSK, la cantidad de errores se reduce considerablemente. En términos prácticos, el resultado de 16 dB corresponde a una BER del orden de 10^{-5}, evidenciando que únicamente una fracción muy pequeña de los bits transmitidos fue afectada.

En el escenario de 10 Hz, la BER inició en 0,4752 a 0 dB y presentó una disminución progresiva hasta alcanzar $5{,}7035 \times 10^{-5}$ a 18 dB, equivalente a 2 bits erróneos de los 35 066 bits transmitidos. A diferencia del escenario de 1 Hz, se requirió una SNR mayor para alcanzar un nivel de error del mismo orden. Este comportamiento puede relacionarse con la mayor rapidez de variación temporal de la canal asociada al incremento de la frecuencia Doppler. En consecuencia, aunque el aumento de la SNR continúa reduciendo la influencia del ruido, las variaciones del canal pueden mantener una mayor probabilidad de error en determinados intervalos de la simulación.

Para 50 Hz, la BER fue de 0,4986 a 0 dB y disminuyó a 0,2346 a 8 dB, 0,1106 a 10 dB, 0,0514 a 12 dB y 0,0092 a 14 dB, hasta alcanzar $1{,}7111 \times 10^{-4}$ a 16 dB, correspondiente a 6 bits erróneos de los 35 066 bits evaluados. La tendencia confirma que el incremento de la SNR continúa siendo el principal factor para reducir los errores producidos por el ruido; sin embargo, la presencia del desvanecimiento hace que la relación entre SNR y BER no sea completamente determinista. Los valores obtenidos corresponden a una realización finita del canal, por lo que pequeñas diferencias entre escenarios de frecuencia Doppler no deben interpretarse únicamente como una mejora o deterioro permanente del desempeño, sino como el resultado de la interacción entre la variación temporal del canal y la secuencia de datos simulada.

En el escenario de 100 Hz, la BER fue de 0,4952 a 0 dB, disminuyó a 0,1406 a 10 dB y alcanzó 0,0390 a 14 dB. A 16 dB se obtuvo una BER de 0,0145, mientras que a 18 dB se redujo a 0,0017, equivalente a 60 bits erróneos de los 35 066 bits transmitidos. Este resultado evidencia que el incremento de la frecuencia Doppler modifica la respuesta temporal del canal y puede mantener una cantidad considerable de errores aun cuando la SNR aumenta. Por tanto, en este escenario,

incrementar la potencia relativa de la señal permite reducir el efecto del ruido, pero no elimina las perturbaciones asociadas al desvanecimiento Rayleigh.

Tabla 2.

Valores representativos del desempeño de QPSK

Doppler	SNR (dB)	BER	Bits erróneos	Bits totales
1 Hz	0	0,2592	9 090	35 066
1 Hz	10	0,0321	1 126	35 066
1 Hz	14	0,0025	89	35 066
1 Hz	16	$5{,}7035 \times 10^{-5}$	2	35 066
10 Hz	0	0,4752	16 663	35 066
10 Hz	10	0,1336	4 686	35 066
10 Hz	16	0,0130	455	35 066
10 Hz	18	$5{,}7035 \times 10^{-5}$	2	35 066
50 Hz	0	0,4986	17 483	35 066
50 Hz	10	0,1106	3 880	35 066
50 Hz	14	0,0092	322	35 066
50 Hz	16	$1{,}7111 \times 10^{-4}$	6	35 066
100 Hz	0	0,4952	17 363	35 066
100 Hz	10	0,1406	4 932	35 066
100 Hz	16	0,0145	509	35 066
100 Hz	18	0,0017	60	35 066

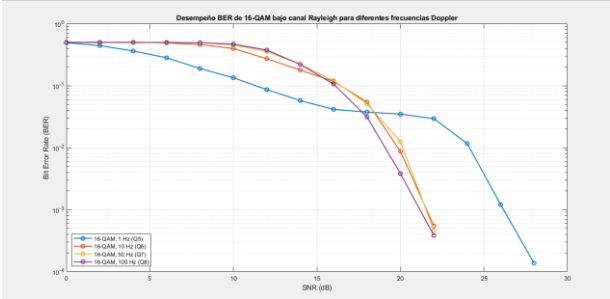
La comparación de los cuatro escenarios permite observar que la respuesta del enlace QPSK está determinada por la interacción entre la SNR y la dinámica temporal del canal. A 16 dB de SNR, se obtuvieron valores de BER de $5{,}7035 \times 10^{-5}$ para 1 Hz, 0,0130 para 10 Hz, $1{,}7111 \times 10^{-4}$ para 50 Hz y 0,0145 para 100 Hz. La diferencia entre estos valores muestra que, bajo una misma SNR, la BER puede variar de forma considerable cuando se modifica la frecuencia Doppler. Esto ocurre porque el aumento del Doppler representa una mayor rapidez de variación del canal, haciendo que la señal experimente cambios temporales en su amplitud y fase debido al desvanecimiento Rayleigh. Por tanto, una SNR elevada reduce principalmente los errores asociados al ruido, pero no elimina las variaciones producidas por el canal.

En términos del umbral de BER ≤ 10^{-3}, los escenarios de 1 Hz y 50 Hz alcanzaron dicho nivel dentro del intervalo de SNR evaluado, mientras que 10 Hz lo alcanzó a 18 dB. En el caso de 100 Hz, la BER fue de 0,0017 a 18 dB, permaneciendo ligeramente por encima del umbral establecido. Esta diferencia evidencia que el comportamiento de la BER no presenta una dependencia lineal únicamente con la SNR, sino que también está condicionado por la dinámica temporal introducida por el efecto Doppler. En consecuencia, los resultados obtenidos permiten

caracterizar el comportamiento del enlace QPSK bajo fading Rayleigh y establecer que el incremento de la SNR favorece la reducción de errores, mientras que la frecuencia Doppler modifica la forma en que el canal evoluciona durante la transmisión.

Figura 3.

Desempeño de la BER de 16-QAM bajo un canal Rayleigh para diferentes frecuencias Doppler.



En el escenario de 10 Hz (Q6), la BER permanece próxima a 0,5 en los niveles inferiores de SNR, con valores de 0,4979 a 0 dB y 0,3971 a 10 dB. A medida que la SNR aumenta, la reducción se vuelve más evidente, alcanzando una BER de 0,1173 a 16 dB, 0,0545 a 18 dB, 0,0087 a 20 dB y 5,4840 × 10^{-4} a 22 dB. Esta disminución más pronunciada en los niveles elevados de SNR indica que, una vez reducido el efecto relativo del ruido AWGN, adquiere mayor relevancia la separación entre los símbolos de la constelación 16-QAM y la influencia del desvanecimiento sobre las decisiones de demodulación. El valor alcanzado a 22 dB muestra que, bajo esta realización del canal, fue posible reducir la BER por debajo de 10^{-3} cuando la potencia de la señal fue suficientemente superior a la del ruido.

Para el escenario de 50 Hz (Q7), se obtuvieron valores elevados de BER en los niveles iniciales de SNR, pasando de 0,5009 a 0 dB a 0,4553 a 10 dB. Posteriormente, la BER disminuyó a 0,3563 a 12 dB, 0,2205 a 14 dB, 0,1202 a 16 dB y 0,0512 a 18 dB. En los niveles superiores de SNR, se registraron valores de 0,0124 a 20 dB y 4,6614 × 10^{-4} a 22 dB. La reducción observada evidencia que el incremento de la SNR permite superar progresivamente la influencia del ruido y mejorar la confiabilidad de las decisiones sobre los símbolos 16-QAM. Sin embargo, el comportamiento del canal Rayleigh introduce variaciones temporales que hacen que la BER no dependa exclusivamente de la SNR. Por esta razón, la comparación entre frecuencias Doppler debe realizarse considerando la curva completa y no únicamente un punto aislado de operación.

Por su parte, el escenario de 100 Hz (Q8) presentó valores de BER cercanos a 0,5 en las condiciones iniciales, con una reducción progresiva conforme aumentó la SNR: 0,4674 a 10 dB, 0,3753 a 12 dB, 0,2208 a 14 dB y 0,1059 a 16 dB. A partir de 18 dB se observa una disminución más pronunciada, alcanzando 0,0312 a 18 dB, 0,0038 a 20 dB y 3,8388 × 10^{-4} a 22 dB. Este comportamiento evidencia que una mayor frecuencia Doppler modifica con mayor rapidez la respuesta temporal del canal, pero no implica por sí misma una BER necesariamente superior en todos los puntos de SNR. De hecho, en la realización simulada, Q8 presenta a 22 dB una

BER inferior a la obtenida en Q6 y Q7. Esta diferencia debe interpretarse como resultado de la interacción entre la SNR, la variación temporal del canal Rayleigh y la realización aleatoria empleada en la simulación, por lo que no constituye evidencia suficiente para afirmar que un aumento del Doppler mejora el desempeño general del enlace.

En conjunto, los resultados de Q6, Q7 y Q8 muestran que las diferencias entre las curvas se hacen más visibles en los niveles elevados de SNR. Mientras que a SNR bajas el ruido y el desvanecimiento generan una elevada incertidumbre en la detección, al aumentar la SNR la influencia del ruido disminuye y adquieren mayor relevancia las condiciones instantáneas del canal. Por ello, las reducciones pronunciadas de BER observadas alrededor de 20–22 dB deben analizarse considerando tanto la relación señal-ruido como la naturaleza aleatoria y variante en el tiempo del canal Rayleigh. En este sentido, los resultados obtenidos para 16-QAM confirman que el desempeño depende de la interacción entre la modulación, la SNR y las condiciones dinámicas del canal.

Tabla 3.

Valores representativos del desempeño de 16-QAM

Frecuencia Doppler	SNR (dB)	BER	Bits erróneos	Bits totales
1 Hz (Q5)	0	0,4916	17 928	36 470
1 Hz (Q5)	20	0,0347	1 265	36 470
1 Hz (Q5)	22	0,0294	1 073	36 470
1 Hz (Q5)	28	$1{,}3710 \times 10^{-4}$	5	36 470
10 Hz (Q6)	0	0,4979	18 160	36 470
10 Hz (Q6)	20	0,0087	318	36 470
10 Hz (Q6)	22	$5{,}4840 \times 10^{-4}$	20	36 470
10 Hz (Q6)	22	$5{,}4840 \times 10^{-4}$	20	36 470
50 Hz (Q7)	0	0,5009	18 269	36 470
50 Hz (Q7)	20	0,0124	454	36 470
50 Hz (Q7)	22	$4{,}6614 \times 10^{-4}$	17	36 470
100 Hz (Q8)	0	0,4992	18 206	36 470
100 Hz (Q8)	20	0,0038	139	36 470
100 Hz (Q8)	22	$3{,}8388 \times 10^{-4}$	14	36 470

En la Figura 3 se observa la evolución de la BER en función de la SNR para los cuatro escenarios de 16-QAM. En los niveles bajos de SNR, las curvas presentan valores elevados y próximos a 0,5, debido a que la potencia del ruido y las perturbaciones introducidas por el canal dificultan la correcta identificación de los símbolos recibidos. Conforme aumenta la SNR, la influencia relativa del ruido disminuye y las muestras recibidas presentan una mayor probabilidad de permanecer dentro de las regiones de decisión correspondientes a cada símbolo. Por esta razón, la BER

experimenta una reducción progresiva, mientras que las diferencias entre las configuraciones Doppler se hacen más evidentes en los niveles superiores de SNR.

Al considerar el umbral de BER ≤ 10^{-3}, el escenario Q5, correspondiente a 1 Hz, alcanza este nivel a 28 dB, con una BER de 1,3710 × 10^{-4}. En contraste, Q6 (10 Hz), Q7 (50 Hz) y Q8 (100 Hz) alcanzan valores inferiores al umbral a 22 dB, con BER de 5,4840 × 10^{-4}, 4,6614 × 10^{-4} y 3,8388 × 10^{-4}, respectivamente. Esta diferencia no debe interpretarse directamente como evidencia de que una mayor frecuencia Doppler produzca un mejor desempeño. En un canal Rayleigh, la frecuencia Doppler modifica la variación temporal de la respuesta del canal y, al tratarse de una simulación con una cantidad finita de bits, la BER obtenida también depende de la realización específica del desvanecimiento durante la transmisión.

El comportamiento observado permite explicar por qué las curvas pueden presentar caídas pronunciadas de BER en determinados intervalos de SNR. Cuando la SNR es suficientemente elevada, el ruido AWGN deja de ser el factor dominante en la decisión de los símbolos y pequeñas variaciones en el número de errores pueden producir cambios importantes en la BER calculada. Esta característica es especialmente visible en Q6, Q7 y Q8, donde alrededor de 20–22 dB la BER disminuye desde valores del orden de $10-\mathbf{210^{-2}}$ hasta valores inferiores a $10-310^{-3}$. Por ejemplo, Q6 pasa de 0,0087 a 20 dB a 5,4840 × 10^{-4} a 22 dB, mientras que Q7 disminuye de 0,0124 a 20 dB a 4,6614 × 10^{-4} a 22 dB, y Q8 pasa de 0,0038 a 20 dB a 3,8388 × 10^{-4} a 22 dB. Estos cambios representan una transición hacia un régimen en el que los errores observados son mucho menos frecuentes.

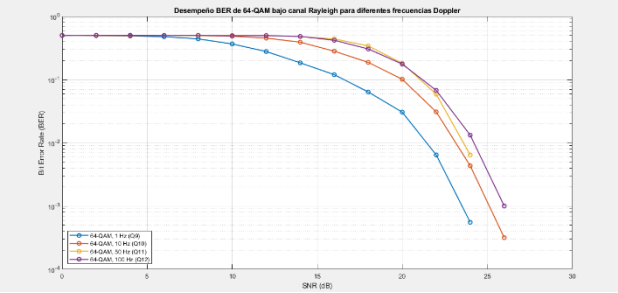
Los resultados muestran que el desempeño de 16-QAM está condicionado simultáneamente por la SNR, el orden de modulación y la dinámica temporal del canal Rayleigh. La mayor separación entre las curvas en SNR elevadas permite identificar las condiciones en las que las diferencias entre las realizaciones del canal tienen mayor incidencia sobre la BER. Por tanto, los valores obtenidos permiten caracterizar el comportamiento de 16-QAM y constituyen una referencia para comparar posteriormente su desempeño con QPSK y 64-QAM bajo las mismas condiciones de canal.

Desempeño de 64-QAM bajo diferentes frecuencias Doppler

Como parte de la evaluación del enlace, se analizó el comportamiento de la modulación 64-QAM bajo un canal con desvanecimiento Rayleigh, considerando cuatro frecuencias Doppler: 1, 10, 50 y 100 Hz, correspondientes a los escenarios Q9, Q10, Q11 y Q12, respectivamente. La evaluación se realizó mediante la relación entre la SNR y la tasa de error de bits (BER), considerando un total de 37 874 bits transmitidos en cada escenario. En comparación con QPSK y 16-QAM, 64-QAM emplea un mayor número de estados de modulación, por lo que los símbolos se encuentran más próximos entre sí dentro de la constelación. Esta característica reduce el margen disponible para la decisión correcta y hace que las perturbaciones producidas por el ruido y el desvanecimiento tengan una mayor influencia sobre la BER.

Figura 4.

Desempeño de la BER de 64-QAM bajo un canal Rayleigh para diferentes frecuencias Doppler.



En la Figura 4 se observa que, para valores bajos de SNR, las cuatro configuraciones presentan tasas de error elevadas y próximas a 0,5. En estas condiciones, la potencia del ruido y las variaciones introducidas por el canal dificultan la correcta identificación de los símbolos 64-QAM. Conforme aumenta la SNR, la BER comienza a disminuir de manera más pronunciada, aunque la forma de las curvas varía entre los escenarios debido a la respuesta temporal del canal Rayleigh ante las diferentes frecuencias Doppler.

Para el escenario de 1 Hz (Q9), la BER disminuyó desde 0,5028 a 0 dB hasta 0,0306 a 20 dB y 0,0064 a 22 dB. Posteriormente, a 24 dB se obtuvo una BER de $5{,}5447 \times 10^{-4}$. Esta reducción muestra que, al incrementar la SNR, disminuye la probabilidad de que las perturbaciones del ruido desplacen los símbolos recibidos fuera de sus regiones de decisión. Sin embargo, debido a la mayor densidad de la constelación 64-QAM, fue necesario alcanzar niveles elevados de SNR para obtener una BER inferior a $10{-}310^{-3}$.

En el escenario de 10 Hz (Q10), la BER permaneció cercana a 0,5 en los niveles iniciales de SNR, con valores de 0,5017 a 0 dB y 0,4857 a 10 dB. Posteriormente, la tasa de error disminuyó a 0,2816 a 16 dB, 0,1013 a 20 dB, 0,0309 a 22 dB y 0,0043 a 24 dB. Finalmente, a 26 dB, se obtuvo una BER de $3{,}1684 \times 10^{-4}$. La disminución más marcada en los niveles elevados de SNR indica que, una vez reducida la influencia relativa del ruido, la señal presenta mejores condiciones para distinguir los estados de la constelación. No obstante, el desvanecimiento Rayleigh continúa afectando las decisiones debido a las variaciones de amplitud y fase producidas por la propagación multitrayectoria.

Para el escenario de 50 Hz (Q11), la reducción de la BER se presentó a niveles de SNR más elevados. A 0 dB se obtuvo una BER de 0,4978, mientras que a 18 dB alcanzó 0,3413. Posteriormente, disminuyó a 0,1816 a 20 dB, 0,0587 a 22 dB y 0,0064 a 24 dB. En este caso, no se alcanzó una BER inferior a $10{-}310^{-3}$ dentro del intervalo de SNR evaluado hasta 24 dB. Este comportamiento evidencia que, bajo la realización simulada, las condiciones del canal mantuvieron una cantidad considerable de errores incluso cuando la SNR había aumentado. Por tanto, el efecto Doppler no debe analizarse únicamente como un incremento directo de la BER, sino como un factor que modifica la evolución temporal del canal y, en combinación con el carácter aleatorio del desvanecimiento, puede producir diferencias entre las curvas obtenidas.

Por su parte, el escenario de 100 Hz (Q12) presentó valores de BER próximos a 0,5 en las condiciones iniciales y una disminución progresiva al aumentar la SNR. Se obtuvieron valores de 0,1762 a 20 dB, 0,0676 a 22 dB, 0,0132 a 24 dB y 0,0010 a 26 dB. Finalmente, a 28 dB no se registraron errores en los 37 874 bits evaluados. El comportamiento observado muestra una reducción pronunciada de la BER en el intervalo de SNR elevado. Sin embargo, el resultado de cero errores debe interpretarse como una ausencia de errores observados en la secuencia finita utilizada en la simulación y no como una BER teórica exactamente igual a cero.

Tabla 4.

Valores representativos del desempeño de 64-QAM

Frecuencia Doppler	SNR (dB)	BER	Bits erróneos	Bits totales
1 Hz (Q9)	0	0,5028	19 044	37 874
1 Hz (Q9)	20	0,0306	1 159	37 874
1 Hz (Q9)	22	0,0064	244	37 874
1 Hz (Q9)	24	$5{,}5447 \times 10^{-4}$	21	37 874
10 Hz (Q10)	0	0,5017	19 001	37 874
10 Hz (Q10)	20	0,1013	3 836	37 874
10 Hz (Q10)	24	0,0043	164	37 874
10 Hz (Q10)	26	$3{,}1684 \times 10^{-4}$	12	37 874
50 Hz (Q11)	0	0,4978	18 855	37 874
50 Hz (Q11)	20	0,1816	6 878	37 874
50 Hz (Q11)	24	0,0064	244	37 874
100 Hz (Q12)	0	0,4970	18 825	37 874
100 Hz (Q12)	24	0,0132	501	37 874
100 Hz (Q12)	26	0,0010	38	37 874
100 Hz (Q12)	28	0	0	37 874

La Tabla 4 presenta valores representativos del desempeño de 64-QAM para las diferentes frecuencias Doppler y permite relacionar directamente la BER con el número de bits erróneos registrados durante la simulación. En los niveles bajos de SNR, los cuatro escenarios presentan aproximadamente la mitad de los bits afectados, con valores de BER de 0,5028 para Q9, 0,5017 para Q10, 0,4978 para Q11 y 0,4970 para Q12 a 0 dB. Estos resultados evidencian que, bajo una relación señal-ruido reducida, la detección de los símbolos presenta una elevada incertidumbre debido a la influencia conjunta del ruido y del desvanecimiento del canal.

La Figura 4 permite observar gráficamente la reducción de la BER conforme aumenta la SNR en los cuatro escenarios de 64-QAM. Las curvas permanecen en niveles elevados para SNR bajas y presentan una reducción más marcada aproximadamente entre 20 y 26 dB. Este comportamiento se relaciona con el hecho de que, al aumentar la SNR, disminuye la influencia relativa del ruido sobre la señal recibida. En 64-QAM, esta transición adquiere especial

importancia debido a la elevada densidad de la constelación: los símbolos presentan menor separación entre sí, por lo que una perturbación en amplitud o fase puede provocar un desplazamiento hacia una región de decisión incorrecta. Una vez que la SNR alcanza niveles suficientemente elevados, la probabilidad de que el ruido produzca este desplazamiento disminuye y la BER puede experimentar reducciones pronunciadas.

En el escenario Q9 (1 Hz), la BER disminuyó de 0,5028 a 0 dB, equivalente a 19 044 bits erróneos, hasta 0,0306 a 20 dB, con 1 159 errores. Posteriormente, a 22 dB se registraron 244 bits erróneos, correspondientes a una BER de 0,0064, y a 24 dB únicamente 21 errores, obteniéndose una BER de $5{,}5447 \times 10^{-4}$. La reducción desde miles de errores hasta unas pocas decenas muestra que el aumento de la SNR mejora considerablemente la confiabilidad de las decisiones de los símbolos 64-QAM.

Para Q10 (10 Hz), se observa una transición similar, aunque desplazada hacia valores mayores de SNR. La BER fue de 0,5017 a 0 dB, con 19 001 bits erróneos, y disminuyó a 0,1013 a 20 dB, equivalente a 3 836 errores. A 24 dB se registraron 164 errores y una BER de 0,0043, mientras que a 26 dB únicamente se contabilizaron 12 bits erróneos, correspondientes a $3{,}1684 \times 10^{-4}$. Esta disminución evidencia que, en los niveles altos de SNR, pequeños cambios en el número de errores pueden producir variaciones importantes en la BER, especialmente cuando el número total de bits evaluados es finito.

El escenario Q11 (50 Hz) presenta una reducción más lenta dentro del intervalo de SNR evaluado. A 0 dB se registraron 18 855 bits erróneos, correspondientes a una BER de 0,4978. A 20 dB todavía se contabilizaron 6 878 errores, con una BER de 0,1816, mientras que a 24 dB se obtuvieron 244 errores y una BER de 0,0064. Por tanto, dentro de los datos disponibles hasta 24 dB, este escenario no alcanza el umbral de BER $\leq 10^{-3}$. El resultado muestra que, bajo esta realización particular del canal, las variaciones temporales asociadas al Doppler y el desvanecimiento mantuvieron una cantidad considerable de errores incluso cuando la SNR aumentó.

En Q12 (100 Hz), la BER disminuyó de 0,4970 a 0 dB, con 18 825 bits erróneos, hasta 0,0132 a 24 dB, equivalente a 501 errores. A 26 dB se registraron únicamente 38 errores, obteniéndose una BER de 0,0010, mientras que a 28 dB no se observaron errores en los 37 874 bits transmitidos. La caída pronunciada entre 24 y 26 dB muestra la transición hacia un régimen de baja probabilidad de error. Sin embargo, el valor de cero errores a 28 dB debe interpretarse como cero errores observados en la muestra finita de 37 874 bits, y no como una BER teórica exactamente igual a cero.

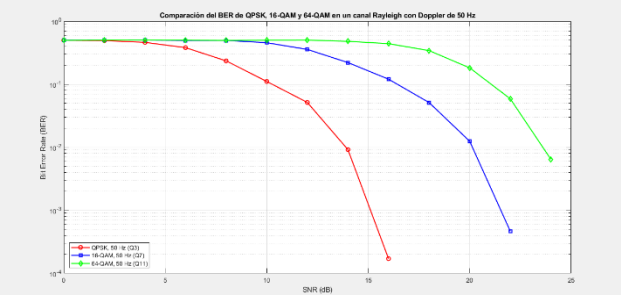
En términos del umbral de BER $\leq 10^{-3}$, Q9 alcanza este nivel a 24 dB, con una BER de $5{,}5447 \times 10^{-4}$; Q10 lo alcanza a 26 dB, con $3{,}1684 \times 10^{-4}$; Q11 no alcanza dicho umbral dentro del intervalo evaluado hasta 24 dB; y Q12 presenta una BER de 0,0010 a 26 dB, alcanzando cero errores observados a 28 dB. Estas diferencias no deben interpretarse como una relación monotónica entre frecuencia Doppler y desempeño, ya que la respuesta obtenida depende de la realización específica del canal Rayleigh y de la cantidad finita de bits utilizados en cada simulación.

Comparación del desempeño de las modulaciones a 50 Hz

Como parte de la evaluación del enlace, se realizó una comparación del comportamiento de las modulaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM bajo un canal con desvanecimiento Rayleigh y una frecuencia Doppler fija de 50 Hz. Para este análisis se consideraron los escenarios Q3, Q7 y Q11, correspondientes a QPSK, 16-QAM y 64-QAM, respectivamente. La comparación se efectuó mediante la relación entre la SNR y la tasa de error de bits (BER), con el propósito de identificar las diferencias en el comportamiento de cada esquema de modulación bajo las mismas condiciones del canal. Los resultados muestran que, en valores bajos de SNR, las tres modulaciones presentan tasas de error elevadas y cercanas a 0,5. Para QPSK (Q3), la BER disminuye progresivamente a medida que aumenta la SNR, pasando de 0,4986 a 0 dB a 0,1106 a 10 dB, 0,0092 a 14 dB y 1,7111 × 10^{-4} a 16 dB. Este comportamiento evidencia una reducción pronunciada de los errores en el intervalo de SNR analizado.

Figura 5.

Comparación del desempeño de QPSK, 16-QAM y 64-QAM bajo un canal Rayleigh con frecuencia Doppler de 50 Hz.



En el escenario correspondiente a 16-QAM (Q7), la reducción de la BER se presenta de manera más gradual. A 10 dB se obtuvo una BER de 0,4553, mientras que a 16 dB alcanzó 0,1202. Posteriormente, la tasa de error disminuyó hasta 0,0124 a 20 dB y 4,6614 × 10^{-4} a 22 dB. La disminución más marcada se observa en los niveles superiores de SNR, donde el incremento de la potencia de la señal respecto al ruido favorece una identificación más precisa de los símbolos. Sin embargo, debido a que 16-QAM emplea una constelación más densa que QPSK, las variaciones de amplitud y fase introducidas por el canal Rayleigh pueden provocar errores de decisión con mayor facilidad.

Para 64-QAM (Q11), la BER presenta una reducción todavía más gradual dentro del intervalo evaluado. El valor registrado fue de 0,4978 a 0 dB, disminuyendo a 0,3413 a 18 dB, 0,1816 a 20 dB, 0,0587 a 22 dB y 0,0064 a 24 dB. En este caso, la mayor cantidad de símbolos de la constelación reduce la distancia entre los puntos de decisión, por lo que pequeñas perturbaciones producidas por el ruido y el desvanecimiento pueden provocar que el símbolo recibido sea interpretado como uno diferente. Bajo las condiciones simuladas, esta característica se refleja en la necesidad de alcanzar niveles superiores de SNR para obtener valores reducidos de BER.

La Figura 5 permite visualizar de manera directa las diferencias entre las tres curvas de desempeño. Las tres modulaciones presentan la misma tendencia general: la BER disminuye conforme aumenta la SNR. No obstante, la velocidad y el nivel de reducción de la BER difieren según el orden de modulación. QPSK presenta la disminución más temprana, seguida por 16-QAM y 64-QAM. Esta diferencia se relaciona con la separación entre los puntos de sus respectivas constelaciones y, por tanto, con la tolerancia de cada esquema frente a las perturbaciones introducidas por el canal.

En particular, QPSK alcanza una BER de $1{,}7111 \times 10^{-4}$ a 16 dB, valor inferior al umbral de 10^{-3} considerado en el análisis. Para 16-QAM, la BER desciende hasta $4{,}6614 \times 10^{-4}$ a 22 dB, alcanzando también dicho umbral. En cambio, 64-QAM registra una BER de 0,0064 a 24 dB, por lo que permanece por encima de 10^{-3} dentro del intervalo mostrado. Esta diferencia de aproximadamente 6 dB entre los valores de SNR asociados con QPSK y 16-QAM, junto con el comportamiento observado para 64-QAM, evidencia que el incremento del orden de modulación modifica las condiciones necesarias para obtener una baja tasa de error.

Desde el punto de vista del canal, las tres modulaciones fueron evaluadas con la misma frecuencia Doppler de 50 Hz, por lo que las diferencias observadas no corresponden a un cambio en este parámetro, sino principalmente a la interacción entre la SNR, la estructura de cada constelación y las variaciones temporales producidas por el desvanecimiento Rayleigh. La frecuencia Doppler mantiene la dinámica temporal del canal, mientras que el aumento del orden de modulación reduce el margen de decisión disponible para cada símbolo.

Conclusiones

Se analizaron los fundamentos relacionados con la Televisión Digital Terrestre, los sistemas de transmisión digital, la relación señal-ruido (SNR), la tasa de error de bits (BER), la modulación digital y el comportamiento de los canales con desvanecimiento Rayleigh. El análisis mencionado fue capaz de determinar los principales parámetros necesarios para poder evaluar el comportamiento de un enlace digital sometido a diversas condiciones de transmisión. Se desarrolló y se ejecutó el modelo de simulación en MATLAB Simulink que permitió representar el comportamiento de un enlace de Televisión Digital Terrestre en un canal con desvanecimiento Rayleigh y ruido AWGN, siendo posible variar la SNR, la frecuencia Doppler y los esquemas de modulación QPSK, 16-QAM 64-QAM, generando diversas pruebas que permitieron llevar a cabo la evaluación comparativa del enlace en cuestión. Se evaluó el comportamiento del enlace a través de la SNR y la BER, considerando frecuencias Doppler de 1, 10, 50 y 100 Hz. Los resultados mostraron que, si en términos generales el aumento en la SNR traduce una reducción de la BER, el comportamiento no fue igual en todas las frecuencias Doppler. Las diferencias observadas en las pruebas realizadas permitieron evidenciar que las variaciones temporales en el canal influyen en el comportamiento de la tasa de error, lo cual debe ser estudiado de manera concurrente con las condiciones de la transmisión. Se comparó el comportamiento de las modulaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM bajo una frecuencia Doppler de 50 Hz. Las

conclusiones evidencian que hay diferencias en los niveles de relacion señal ruido (SNR) necesarios para llegar a niveles de tasa de error de bit (BER) cercanos o inferiores a $10{-}310^{-3}$. Con SNR=16dB, la modulación por cuadratura de fases (QPSK) alcanza el nivel de $BER=10{-}310^{-3}$, para SNR=22dB, 16-QAM consigue ese nivel y 64-QAM requiere niveles superiores en las condiciones que se evaluaron. De este modo, se puede concluir que el orden de modulación modula la relación entre la SNR disponible y la BER obtenida en el enlace simulado. En función de los escenarios analizados, se determinó que el desempeño del enlace no depende de manera aislada de la frecuencia Doppler o de la modulación, sino de la interacción entre la SNR, el esquema de modulación y las condiciones dinámicas del canal. Por tanto, la simulación desarrollada constituye una herramienta útil para identificar mediante la BER las condiciones en las que el enlace presenta una reducción de errores y para comparar diferentes configuraciones de transmisión antes de una posible implementación experimental.

Referencias Bibliográficas

Ajayan, A. P., Dash, S. P., & Ramkumar, B. (2023). Approximate composite channel statistics and performance analysis of IRS-aided wireless system under Nakagami-m fading. *IEEE Access, 11*, 102290–102300. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3317277

Aragón-Zavala, A., Angueira, P., Montalban, J., & Vargas-Rosales, C. (2021). Radio propagation in terrestrial broadcasting television systems: A comprehensive survey. *IEEE Access, 9*, 34789–34817. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061034

European Telecommunications Standards Institute. (2021). *Digital video broadcasting (DVB); frame structure, channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)* (ETSI EN 302 755 V1.4.1).

Eizmendi, I., Velez, M., Gómez-Barquero, D., Morgade, J., Baena-Lecuyer, V., Slimani, M., & Zoellner, J. (2014). DVB-T2: The second generation of terrestrial digital video broadcasting system. *IEEE Transactions on Broadcasting, 60*(2), 258–271. https://doi.org/10.1109/TBC.2014.2312811

Fernandes, D., Jayakody, D. N. K., & Beko, M. (2025). Extending low-complexity coded NOMA systems: Power optimization and channel performance on Rayleigh and Nakagami fading. *IEEE Access, 13*, 194115–194126. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3629846

Fuentes, M., González, L. P., & García, J. M. (2022). Digital terrestrial television systems: Evolution, standards and future perspectives. *IEEE Access, 10*, 112345–112360.

Goldsmith, A. (2020). Capacity and performance analysis of wireless communication systems under fading channels. *IEEE Communications Surveys & Tutorials, 22*(4), 2545–2572.

Goldsmith, A. (2022). *Wireless communications* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Haykin, S., & Moher, M. (2022). *Communication systems* (6th ed.). Wiley.

Jiang, H., Zhang, Z., & Gui, G. (2020). Propagation channel modeling and performance analysis for wireless communication systems under multipath fading environments. *IEEE Access, 8*, 193750–193762.

Liu, H., Luo, Q., Liu, Z., Luo, S., Xiao, P., & Lin, R. (2023). BER analysis of SCMA-OFDM systems in the presence of carrier frequency offset. *IEEE Communications Letters*. https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3339469

MathWorks. (2025). *Communications Toolbox user's guide: Simulation and analysis of communication systems with MATLAB and Simulink*. MathWorks.

Molisch, A. F. (2023). *Wireless communications: From fundamentals to advanced concepts* (3rd ed.). Wiley.

Sharma, P. K., & Gupta, D. (2021). Performance evaluation of digital communication systems over Rayleigh fading channels using BER analysis. *Wireless Personal Communications, 121*, 2345–2362.

Shariatzadeh, H., Maghrebi, S. G., Karakaya, B., & Shahzadi, A. (2023). A new 5G cellular broadcasting approach: Hybrid LDM-NOMA and FeMBMS-OMA analysis based on stochastic geometry. *IEEE Access, 11*, 119824–119839. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3291922

Simon, M. K., & Alouini, M. S. (2021). *Digital communication over fading channels* (3rd ed.). Wiley-IEEE Press.

International Telecommunication Union. (2021). *Recommendation ITU-R BT.2035-4: Guidelines and techniques for evaluating the performance of digital terrestrial television broadcasting systems*. ITU.

International Telecommunication Union. (2023). *Recommendation ITU-R BT.1306: Error-correction, data framing, modulation and emission methods for digital terrestrial television broadcasting*. ITU.

Wu, Y., Rong, B., Salehian, K., & Gagnon, G. (2019). Cloud transmission: A new spectrum-efficient digital terrestrial broadcasting transmission system. *IEEE Transactions on Broadcasting, 65*(1), 1–12.

Zhang, J., Du, H., & Ai, B. (2021). Rayleigh fading channel modeling and performance analysis for wireless communication systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 70*(5), 4587–4598.

Zhang, X., Wang, W., & Liu, G. (2025). Performance analysis of OFDM-based digital broadcasting systems over multipath fading channels. *IEEE Access, 13*.