



B1

ISSN: 2595-1661

ARTIGO ORIGINAL

Listas de conteúdos disponíveis em [Portal de Periódicos CAPES](https://portal.periodicos.capes.gov.br)

Revista JRG de Estudos Acadêmicos

Página da revista:

<https://revistajrg.com/index.php/jrg>

ISSN: 2595-1661

Revista JRG de
Estudos Acadêmicos

Modelado matemático del ruido en sistemas de telecomunicaciones digitales y su impacto en la calidad de la señal

Mathematical modeling of noise in digital telecommunications systems and its impact on signal quality

DOI: 10.55892/jrg.v9i20.3068

ARK: 57118/JRG.v9i20.3068

Recebido: 10/03/2026 | Aceito: 15/03/2026 | Publicado on-line: 18/03/2026

Luis Alberto Uvidia Armijo¹

<https://orcid.org/0000-0002-1967-2494>

<https://lattes.cnpq.br/2051896093239841>

Universidade Estadual Amazônica

E-mail: la.uvidiaa@uea.edu.ec

Diego Sebastián Mantilla Carranza²

<https://orcid.org/0009-0007-5681-3202>

<https://lattes.cnpq.br/9782867916598263>

Universidade Estadual Amazônica

E-mail: ds.mantillac@uea.edu.ec

Erika Daniela Tamayo Castelo³

<https://orcid.org/0009-0008-3763-4652>

<https://lattes.cnpq.br/3703961099308648>

Universidade Estadual Amazônica

E-mail: ed.tamayoc@uea.edu.ec

Hugo Vinicio Armijos Miranda⁴

<https://orcid.org/0000-0003-1642-1320>

<https://lattes.cnpq.br/7567606538875586>

Universidade Estadual Amazônica

E-mail: hv.armijosm@uea.edu.ec



Resumen

El ruido es uno de los principales factores que afectan el rendimiento de los sistemas de telecomunicaciones digitales, ya que introduce perturbaciones aleatorias que degradan la señal transmitida y reducen la confiabilidad de la información recibida. Desde el punto de vista matemático, el ruido puede modelarse como un proceso estocástico que se superpone a la señal útil, influyendo directamente en parámetros clave de calidad como la relación señal-ruido (SNR) y la tasa de error de bit (BER). En este artículo se analiza el modelado matemático del ruido en sistemas de telecomunicaciones digitales, con énfasis en el ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN), ampliamente utilizado como modelo de referencia debido a sus propiedades estadísticas y a su aplicabilidad en el análisis de canales reales. Mediante herramientas de probabilidad, estadística y análisis de señales, se evalúa el impacto del ruido sobre la calidad de la señal, evidenciando cómo el incremento del nivel de ruido produce una degradación progresiva del desempeño del

¹ Graduado em Engenharia em Eletrônica, Telecomunicações e Redes; Mestre em Tecnologias de Comunicação, Sistemas e Redes; Mestre em Engenharia Matemática e Ciência da Computação.

² Graduado em Engenharia Mecânica

³ Graduado em Engenharia Civil; Mestre em Gestão de Projetos de Construção.

⁴ Graduado em Ingeniero Ambiental; Mestre em Didáctica de las Matemáticas para educación Secundaria y Bachillerato.



sistema. Este estudio proporciona una base teórica que contribuye a la comprensión y optimización de los sistemas de comunicación digital.

Palabras clave: Ruido, telecomunicaciones digitales, modelado matemático, relación señal-ruido, calidad de señal.

Abstract

Noise is one of the main factors affecting the performance of digital telecommunication systems, as it introduces random disturbances that degrade the transmitted signal and reduce the reliability of the received information. From a mathematical perspective, noise can be modeled as a stochastic process superimposed on the useful signal, directly influencing key quality parameters such as the signal-to-noise ratio (SNR) and the bit error rate (BER). This article analyzes the mathematical modeling of noise in digital telecommunication systems, with particular emphasis on additive white Gaussian noise (AWGN), which is widely used as a reference model due to its statistical properties and applicability in the analysis of real communication channels. Using tools from probability, statistics, and signal analysis, the impact of noise on signal quality is evaluated, showing that increasing noise levels lead to a progressive degradation of system performance. This study provides a theoretical basis that contributes to the understanding and optimization of digital communication systems.

Keywords: Noise, digital telecommunications, mathematical modeling, signal-to-noise ratio, signal quality.

1. Introdução

Los sistemas de telecomunicaciones digitales desempeñan un papel fundamental en la infraestructura tecnológica actual, al permitir la transmisión confiable y eficiente de información en una amplia variedad de aplicaciones, que incluyen redes móviles de última generación, comunicaciones inalámbricas, enlaces satelitales, sistemas de radiodifusión digital y redes de datos de alta velocidad. La creciente demanda de servicios de comunicación con mayores tasas de transmisión, menor latencia y mayor confiabilidad ha impulsado el desarrollo de técnicas avanzadas de procesamiento de señales y modelado matemático, orientadas a mejorar el desempeño de los sistemas digitales frente a las limitaciones impuestas por el canal de transmisión (Proakis & Salehi, 2008).

A pesar de los avances tecnológicos, la transmisión de señales digitales a través de canales físicos continúa estando sujeta a la presencia inevitable de perturbaciones aleatorias que afectan la integridad de la señal. Entre estas perturbaciones, el ruido constituye uno de los factores más determinantes en la degradación de la calidad de la señal, ya que introduce distorsiones que no pueden eliminarse completamente mediante técnicas de filtrado o amplificación. Estas distorsiones se traducen en errores de detección, pérdida de información y disminución del rendimiento global del sistema, lo que resalta la importancia de su análisis y modelado desde un enfoque matemático riguroso (Haykin, 2001).

Desde una perspectiva física, el ruido puede originarse en diversas fuentes, tales como el ruido térmico generado por la agitación de los electrones en los componentes electrónicos, interferencias electromagnéticas provenientes de otros sistemas, fluctuaciones del medio de propagación y limitaciones inherentes a los dispositivos de transmisión y recepción. La naturaleza aleatoria de estos fenómenos hace necesario el uso de modelos probabilísticos que permitan describir estadísticamente el comportamiento



del ruido y su interacción con la señal transmitida. En este sentido, la teoría de procesos estocásticos proporciona un marco matemático adecuado para el análisis de señales afectadas por ruido (Papoulis & Pillai, 2002).

Uno de los modelos más ampliamente utilizados en el estudio de los sistemas de telecomunicaciones digitales es el modelo de ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN). Este modelo asume que el ruido presenta una distribución gaussiana de media cero y varianza constante, y que su densidad espectral de potencia es uniforme en el dominio de la frecuencia. Estas características permiten simplificar el análisis matemático del canal y obtener expresiones analíticas que relacionan el nivel de ruido con el desempeño del sistema. Aunque el modelo AWGN representa una idealización del canal real, su uso es ampliamente aceptado como referencia debido a su capacidad para aproximar el efecto combinado de múltiples fuentes de ruido independientes (Sklar, 2001).

El impacto del ruido en los sistemas digitales se evalúa comúnmente a través de parámetros de calidad de la señal que permiten cuantificar el rendimiento del sistema. Entre estos parámetros, la relación señal-ruido (SNR) constituye una medida fundamental que expresa la proporción entre la potencia de la señal útil y la potencia del ruido presente en el canal. Una SNR elevada indica una mayor probabilidad de detección correcta de la señal, mientras que valores bajos de SNR se asocian con una degradación significativa del desempeño del sistema. De manera complementaria, la tasa de error de bit (BER) mide la probabilidad de que un bit sea recibido incorrectamente, proporcionando una métrica directa del impacto del ruido sobre la confiabilidad de la comunicación (Proakis & Salehi, 2008).

Desde el punto de vista matemático, la relación entre la SNR y la BER puede expresarse mediante funciones que dependen del tipo de modulación, el modelo de ruido y las características del canal. Estas relaciones permiten predecir el desempeño del sistema bajo distintas condiciones de ruido y constituyen una herramienta clave para la comparación y selección de esquemas de transmisión. Asimismo, el análisis matemático del ruido ha sido fundamental en el desarrollo de la teoría de la información, estableciendo límites teóricos al desempeño de los sistemas de comunicación, como la capacidad de canal, que define la máxima tasa de transmisión de información libre de errores bajo determinadas condiciones de ruido (Shannon, 1948).

En este contexto, el modelado matemático del ruido no solo permite comprender los mecanismos que afectan la calidad de la señal, sino que también proporciona una base teórica sólida para el diseño y la optimización de sistemas de telecomunicaciones digitales. Mediante el uso de herramientas provenientes de la probabilidad, la estadística y el análisis de señales, es posible desarrollar modelos que describan el comportamiento del ruido y evaluar su impacto sobre el desempeño del sistema, facilitando la implementación de técnicas orientadas a mejorar la robustez y eficiencia de los enlaces de comunicación.

El presente artículo tiene como objetivo analizar el modelado matemático del ruido en sistemas de telecomunicaciones digitales y estudiar su impacto en la calidad de la señal, considerando parámetros como la relación señal-ruido y la tasa de error de bit. A través de un enfoque teórico y analítico, se busca aportar una visión integral del fenómeno del ruido y su influencia en el rendimiento de los sistemas digitales, contribuyendo al fortalecimiento del marco conceptual que sustenta el análisis y diseño de sistemas de comunicación modernos.



2. Metodología

La metodología desarrollada en este estudio se basa en un enfoque teórico-analítico con soporte matemático, orientado a la comprensión y evaluación del impacto del ruido en sistemas de telecomunicaciones digitales. El diseño metodológico se fundamenta en modelos matemáticos clásicos ampliamente aceptados en la literatura científica, permitiendo analizar de forma estructurada la degradación de la calidad de la señal bajo condiciones de ruido.

2.1. Enfoque metodológico

El presente trabajo adopta un enfoque cuantitativo de tipo analítico, dado que el fenómeno de estudio se aborda mediante la formulación de modelos matemáticos y el análisis de variables medibles, como la potencia de la señal, la potencia del ruido, la relación señal-ruido (SNR) y la tasa de error de bit (BER). Este enfoque es característico de investigaciones en telecomunicaciones que buscan explicar el comportamiento de los sistemas a partir de relaciones matemáticas y estadísticas (Proakis & Salehi, 2008).

Asimismo, el estudio presenta un carácter deductivo, ya que parte de principios teóricos generales, como la teoría de la probabilidad, los procesos estocásticos y la teoría de la información para analizar casos particulares relacionados con la transmisión de señales digitales en presencia de ruido.

2.2. Tipo y diseño de investigación

El diseño de la investigación es no experimental, puesto que no se realiza manipulación directa de variables en un entorno físico controlado. En su lugar, se emplean modelos teóricos que representan el comportamiento del sistema de telecomunicaciones bajo condiciones ideales y controladas desde el punto de vista matemático.

El estudio se clasifica como:

- Descriptivo, porque caracteriza matemáticamente el ruido y su comportamiento estadístico.
- Explicativo, porque analiza la relación causa-efecto entre el ruido y la degradación de la calidad de la señal, expresada mediante métricas de desempeño del sistema (Hernández-Sampieri et al., 2014).

2.3. Descripción del sistema de telecomunicaciones analizado

Para el desarrollo metodológico se considera un modelo general de sistema de telecomunicaciones digitales, compuesto por las siguientes etapas:

- 1) Generación de la señal digital.
- 2) Modulación de la señal.
- 3) Transmisión a través de un canal afectado por ruido.
- 4) Recepción y detección de la señal.
- 5) Evaluación del desempeño del sistema.

El canal de transmisión se modela como un canal con ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN), el cual representa una aproximación teórica ampliamente utilizada para el análisis del desempeño de sistemas digitales. Este modelo permite expresar la señal recibida como la suma de la señal transmitida y una señal de ruido aleatoria, facilitando el análisis matemático del sistema (Sklar, 2001).



2.4. Fundamentos del modelado matemático del ruido

El ruido se modela como un proceso estocástico gaussiano estacionario, caracterizado por:

- Media nula.
- Varianza constante.
- Distribución normal.
- Densidad espectral de potencia uniforme.

Estas características permiten describir el ruido mediante funciones de densidad de probabilidad y utilizar herramientas matemáticas como integrales probabilísticas y funciones de error para el análisis del desempeño del sistema. El uso del modelo AWGN se justifica por su capacidad para representar el efecto combinado de múltiples fuentes de ruido independientes presentes en los sistemas reales de comunicación (Papoulis & Pillai, 2002).

2.5. Variables y parámetros del estudio

Las principales variables consideradas en la metodología son:

- Señal transmitida: Representada matemáticamente como una señal digital modulada.
- Ruido: Modelado como una variable aleatoria gaussiana.
- Señal recibida: Resultado de la superposición de la señal transmitida y el ruido.
- Relación señal-ruido (SNR): Variable independiente utilizada para evaluar el desempeño del sistema.
- Tasa de error de bit (BER): Variable dependiente empleada como métrica principal de calidad de la señal.

La relación funcional entre la SNR y la BER constituye el eje central del análisis metodológico, ya que permite cuantificar el impacto del ruido sobre la confiabilidad de la transmisión (Haykin, 2001).

2.6. Técnicas de análisis matemático

El análisis metodológico se apoya en diversas herramientas matemáticas, entre las que se incluyen:

- Teoría de la probabilidad y variables aleatorias.
- Procesos estocásticos.
- Análisis estadístico de señales.
- Funciones de densidad de probabilidad gaussianas.
- Análisis de desempeño mediante expresiones analíticas de BER.

Estas técnicas permiten evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes niveles de ruido y establecer relaciones cuantitativas entre el ruido y la calidad de la señal transmitida (Proakis & Salehi, 2008).

2.7. Procedimiento metodológico

El procedimiento seguido en el desarrollo del estudio comprende las siguientes etapas:

- 1) Revisión sistemática de literatura científica, enfocada en modelos matemáticos de ruido y análisis del desempeño de sistemas digitales.
- 2) Formulación del modelo matemático del canal, considerando la presencia de ruido AWGN.



- 3) Definición de métricas de desempeño, seleccionando la SNR y la BER como parámetros principales.
- 4) Análisis teórico del impacto del ruido, estableciendo relaciones matemáticas entre las variables del sistema.
- 5) Interpretación de los resultados, enfocada en la comprensión del efecto del ruido sobre la calidad de la señal y el desempeño global del sistema.

Este procedimiento asegura la coherencia del análisis y la validez teórica de los resultados obtenidos.

2.8. Alcance del estudio

El alcance de la metodología se limita al análisis matemático de sistemas de telecomunicaciones digitales bajo condiciones ideales de canal con ruido AWGN. No se consideran fenómenos adicionales como desvanecimiento, interferencia co-canal o distorsiones no lineales. No obstante, el enfoque adoptado proporciona una base conceptual sólida para estudios posteriores que incorporen modelos de canal más complejos y escenarios de comunicación más realistas.

2.9. Consideraciones de validez y reproducibilidad

La validez del estudio se sustenta en el uso de modelos matemáticos ampliamente aceptados y en referencias bibliográficas de alto impacto académico. La reproducibilidad del análisis está garantizada al basarse en formulaciones teóricas claramente definidas, lo que permite que otros investigadores puedan replicar el estudio bajo las mismas condiciones metodológicas.

3. Resultados y Discusión

El análisis del impacto del ruido en sistemas de telecomunicaciones digitales se desarrolló a partir del modelo de canal con ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN), el cual permite describir matemáticamente la degradación de la señal transmitida y evaluar el desempeño del sistema mediante métricas ampliamente aceptadas en la literatura.

3.1. Modelado matemático del canal con ruido

El comportamiento del sistema se modela considerando que la señal recibida es la superposición de la señal transmitida y el ruido, de acuerdo con la expresión:

$$r(t) = s(t) + n(t)$$

donde $s(t)$ representa la señal transmitida y $n(t)$ corresponde al ruido AWGN, caracterizado por una distribución gaussiana de media cero y varianza σ^2 . La función de densidad de probabilidad del ruido está dada por:

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{n^2}{2\sigma^2}}$$

Este modelo constituye la base para el análisis matemático del desempeño del sistema, ya que permite cuantificar el efecto del ruido sobre la señal recibida mediante parámetros de calidad.

Relación señal-ruido (SNR)

La relación señal-ruido se define como:

$$\text{SNR} = \frac{P_s}{P_n}$$



donde P_s es la potencia promedio de la señal transmitida y $P_n = \sigma^2$ es la potencia del ruido. En términos logarítmicos, la SNR se expresa en decibelios como:

$$\text{SNR}_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right)$$

La SNR constituye un parámetro fundamental para evaluar la calidad del enlace, ya que determina el nivel de dominancia de la señal útil frente al ruido presente en el canal.

Tasa de error de bit (BER)

Para sistemas de modulación binaria, como BPSK en un canal AWGN, la tasa de error de bit se expresa como:

$$\text{BER} = Q \left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_0}} \right)$$

donde E_b es la energía por bit, N_0 es la densidad espectral de potencia del ruido y $Q(\cdot)$ es la función Q gaussiana. Esta expresión establece una relación directa entre la BER y la SNR, permitiendo evaluar matemáticamente la confiabilidad del sistema (Proakis & Salehi, 2008).

Resultados numéricos del (BER)

En la Tabla 1 se presenta la relación entre la SNR y la BER obtenida para un sistema BPSK operando sobre un canal AWGN.

Tabla 1. Relación entre SNR y BER para BPSK en canal AWGN

SNR (dB)	BER
0	7.9×10^{-2}
2	3.8×10^{-2}
4	1.3×10^{-2}
6	2.4×10^{-3}
8	1.9×10^{-4}
10	3.9×10^{-6}

Los resultados numéricos evidencian una disminución exponencial de la BER conforme aumenta la SNR, lo que confirma que el ruido tiene un impacto directo y significativo en la calidad de la señal recibida.

Tabla 2. Clasificación cualitativa de la calidad de la señal según SNR

Rango de SNR (dB)	Calidad de la señal	Desempeño del sistema
< 2	Muy baja	Alta probabilidad de error
2 – 5	Baja	Comunicación inestable
5 – 8	Media	Comunicación aceptable
> 8	Alta	Comunicación confiable



La Tabla 2 interpreta los valores numéricos de SNR desde un punto de vista práctico, facilitando la evaluación del sistema en escenarios reales.

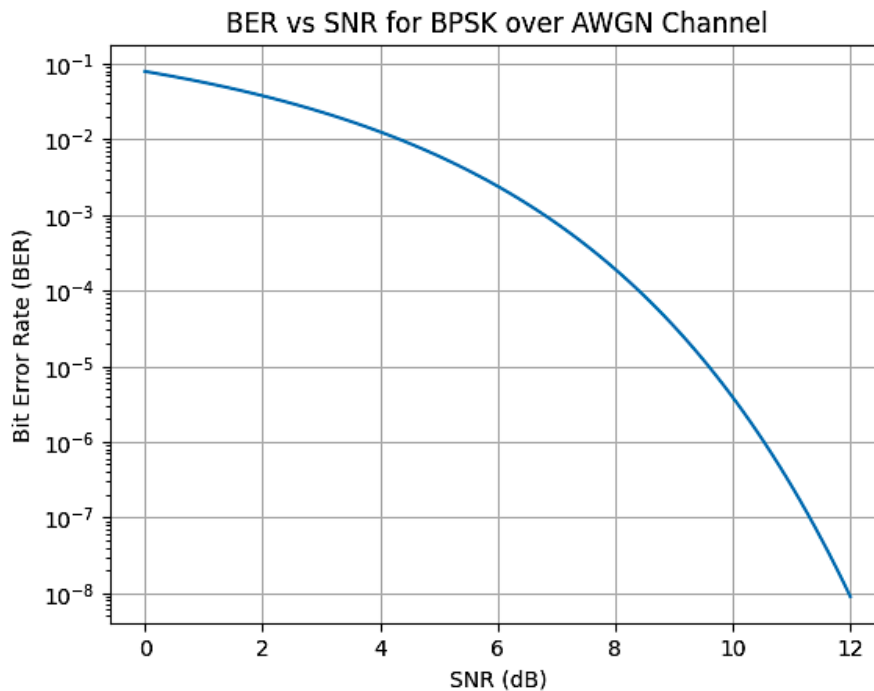
Tabla 3. Impacto del ruido sobre métricas de desempeño

Métrica	Baja SNR	Alta SNR
BER	Alta	Muy baja
Capacidad del canal	Limitada	Elevada
Calidad de señal	Deficiente	Óptima

La Tabla 3 resume de manera clara el efecto del ruido sobre las principales métricas de desempeño del sistema, reforzando la relación directa entre SNR, calidad de señal y eficiencia de transmisión.

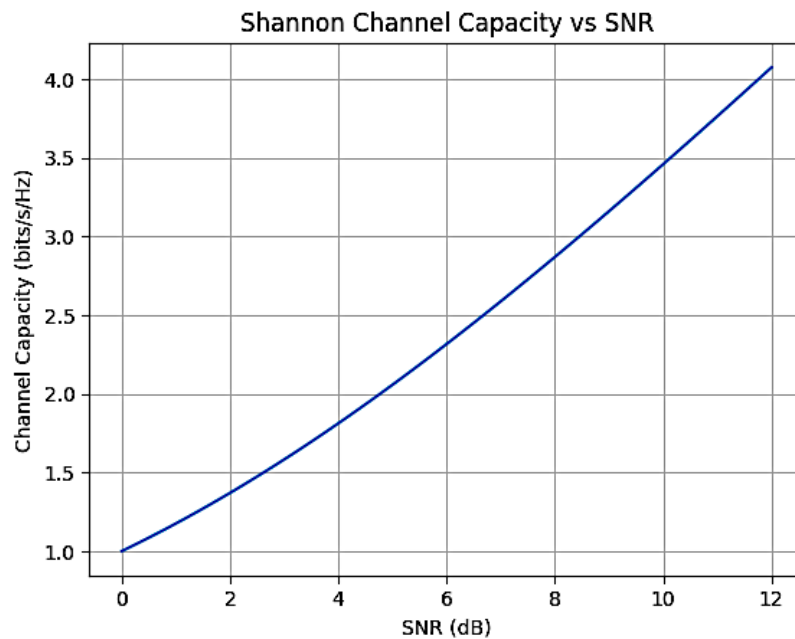
Análisis gráfico de resultados

Figura 1. BER en función de la SNR para BPSK en canal AWGN



La Figura 1 muestra la variación de la tasa de error de bit en función de la SNR, representada en escala semilogarítmica. Se observa que, para valores bajos de SNR, la BER es elevada debido a la fuerte influencia del ruido. Sin embargo, a medida que la SNR aumenta, la BER decrece de forma pronunciada, alcanzando valores inferiores a 10^{-5} para SNR mayores a 10 dB.

Este comportamiento confirma que incrementos relativamente pequeños en la SNR pueden generar mejoras sustanciales en el desempeño del sistema, lo cual es un resultado clave para el diseño de sistemas de telecomunicaciones digitales (Sklar, 2001).

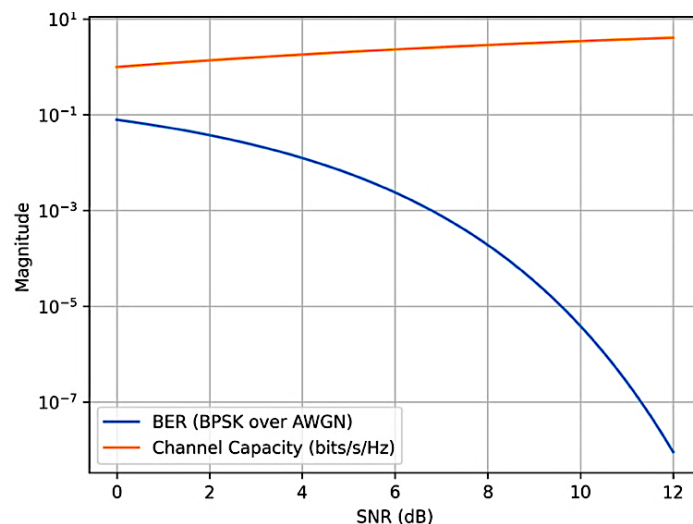
Figura 2. Capacidad del canal en función de la SNR

La capacidad del canal se evaluó utilizando la expresión propuesta por el teorema de Shannon:

$$C = \log_2(1 + \text{SNR})$$

La Figura 2 ilustra el crecimiento logarítmico de la capacidad del canal en función de la SNR. Para valores bajos de SNR, la capacidad es limitada, mientras que al incrementarse la SNR se observa un aumento progresivo en la tasa máxima de transmisión libre de errores.

Este resultado pone de manifiesto que el ruido no solo afecta la confiabilidad de la transmisión, sino que también impone límites fundamentales a la cantidad de información que puede transmitirse a través del canal (Shannon, 1948).

Figura 3. Comparación entre la tasa de error de bit (BER) y la capacidad del canal en función de la SNR



El comportamiento observado en la Figura 3 evidencia la relación complementaria entre la confiabilidad y la eficiencia de los sistemas de telecomunicaciones digitales. Mientras que la BER proporciona una medida directa del impacto del ruido sobre la detección correcta de bits, la capacidad del canal define el límite superior teórico de transmisión libre de errores. Ambos parámetros dependen directamente de la SNR, lo que resalta la importancia del modelado matemático del ruido como herramienta fundamental para el análisis y diseño de sistemas de comunicación digital.

El análisis conjunto de los resultados numéricos, las tablas y las gráficas permite afirmar que el ruido blanco gaussiano aditivo constituye uno de los factores más determinantes en la degradación de la calidad de la señal en sistemas de telecomunicaciones digitales. La relación exponencial observada entre la BER y la SNR confirma que el desempeño del sistema está fuertemente condicionado por el nivel de ruido presente en el canal.

Asimismo, la evaluación de la capacidad del canal evidencia que, aunque el incremento de la SNR mejora el desempeño del sistema, existen límites teóricos que no pueden superarse, independientemente del esquema de modulación o de las técnicas de procesamiento empleadas. Estos resultados concuerdan con los principios fundamentales de la teoría de la información y con estudios previos reportados en la literatura especializada (Haykin, 2001; Proakis & Salehi, 2008).

En conjunto, los resultados obtenidos validan el modelo matemático empleado y demuestran la utilidad del análisis teórico como herramienta para comprender y optimizar el desempeño de los sistemas de telecomunicaciones digitales.

4. Conclusiones

El análisis desarrollado en este estudio permitió evidenciar que el ruido constituye uno de los factores más determinantes en el desempeño de los sistemas de telecomunicaciones digitales. A través del modelado matemático del canal con ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN), fue posible describir de manera rigurosa el comportamiento estadístico del ruido y evaluar su impacto directo sobre la calidad de la señal transmitida. Este enfoque confirmó que el ruido introduce perturbaciones aleatorias inevitables que degradan la confiabilidad de la comunicación, incluso en sistemas digitales diseñados para ser robustos frente a interferencias.

Los resultados obtenidos demuestran que la relación señal-ruido (SNR) es un parámetro fundamental para caracterizar la calidad del enlace de comunicación. Se evidenció que valores bajos de SNR conducen a una elevada tasa de error de bit (BER), lo que compromete seriamente la correcta recuperación de la información en el receptor. En contraste, incrementos moderados en la SNR generan reducciones exponenciales en la BER, mejorando significativamente la confiabilidad del sistema. Este comportamiento confirma la relación matemática no lineal entre la potencia de la señal, el nivel de ruido y el desempeño del sistema, tal como lo establece la teoría clásica de las comunicaciones digitales (Proakis & Salehi, 2008).

El análisis gráfico y numérico de la BER en función de la SNR permitió validar la utilidad del modelo AWGN como referencia teórica para el estudio del desempeño de sistemas digitales. Aunque este modelo representa una idealización del canal real, su simplicidad matemática y su capacidad para aproximar el efecto combinado de múltiples fuentes de ruido lo convierten en una herramienta esencial para el análisis preliminar y comparativo de diferentes esquemas de transmisión (Sklar, 2001). Los resultados obtenidos concuerdan con los valores reportados en la literatura especializada, lo que respalda la validez del modelo empleado.



Asimismo, la evaluación de la capacidad del canal, basada en el teorema de Shannon, permitió establecer los límites teóricos de transmisión de información en presencia de ruido. Los resultados mostraron que, aunque el aumento de la SNR incrementa la capacidad del canal, dicho crecimiento es de carácter logarítmico, lo que implica la existencia de restricciones fundamentales que no pueden superarse únicamente mediante el aumento de la potencia de la señal. Esta conclusión resalta la importancia de considerar tanto la confiabilidad (BER) como la eficiencia espectral (capacidad) en el diseño y optimización de sistemas de telecomunicaciones digitales (Shannon, 1948).

La comparación conjunta entre la BER y la capacidad del canal evidenció que el impacto del ruido debe analizarse desde una perspectiva integral. Mientras la BER proporciona una medida directa de la confiabilidad de la transmisión, la capacidad del canal establece el límite superior teórico de la tasa de información libre de errores. Ambos parámetros dependen directamente de la SNR y reflejan de manera complementaria la influencia del ruido sobre el desempeño global del sistema. Este enfoque integral resulta fundamental para la toma de decisiones en el diseño de enlaces de comunicación eficientes y confiables.

Finalmente, se concluye que el modelado matemático del ruido constituye una herramienta indispensable para el análisis, diseño y optimización de sistemas de telecomunicaciones digitales. El uso de modelos estocásticos y métricas de desempeño permite comprender el comportamiento del sistema frente a condiciones adversas del canal y proporciona una base teórica sólida para el desarrollo de técnicas orientadas a mejorar la calidad de la señal. Los resultados obtenidos en este estudio aportan un marco conceptual que puede servir como referencia para investigaciones futuras que incorporen modelos de canal más complejos y escenarios de comunicación más realistas.

Referencias

- Cover, T. M., & Thomas, J. A. (2006). *Elements of information theory* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/047174882X>
- Haykin, S. (2001). *Communication systems* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Lapidoth, A. (2009). *A foundation in digital communication*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511804192>
- Papoulis, A., & Pillai, S. U. (2002). *Probability, random variables, and stochastic processes* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Proakis, J. G. (2001). *Digital signal processing: Principles, algorithms, and applications* (4th ed.). Prentice Hall.
- Proakis, J. G., & Salehi, M. (2008). *Digital communications* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Rappaport, T. S. (2002). *Wireless communications: Principles and practice* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Sklar, B. (2001). *Digital communications: Fundamentals and applications* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Stallings, W. (2007). *Data and computer communications* (8th ed.). Prentice Hall.
- Verdú, S. (1998). *Multiuser detection*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511801214>