

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

SISTEMAS DE COMUNICACIÓN AIRE-TIERRA ENTRE AVIONES COMERCIALES Y TORRES DE CONTROL

Autor: Álvaro Rodríguez Regueiro

Director: Javier Matanza Domingo

Madrid

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **Sistemas de comunicación aire-tierra entre aviones comerciales y torres de control** en la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2025-2026 es de mi autoría y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Uso de Inteligencia Artificial[1]

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

ϒ No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.

☑ He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la Escala de Evaluación de Perkins et al. (2024): "*La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente*". En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

Apoyo en la redacción de la memoria, revisión de contenidos técnicos y asistencia en el desarrollo e implementación de código MATLAB para la parte experimental del proyecto

Alvaro Rodriguez Regueiro
Firmado (alumno):
Fecha: 7 de junio de 2026

Autorización para la entrega del Proyecto

[1] Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos…)

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto (si aplica)
Firmado por MATANZA DOMINGO JAVIER - ***4397** el día 16/06/2026 con un certificado emitido por AC FNMT Usuarios	
Fdo:	Fdo:
Fecha:	Fecha:



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA
ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

SISTEMAS DE COMUNICACIÓN AIRE-TIERRA ENTRE AVIONES COMERCIALES Y TORRES DE CONTROL

Autor: Álvaro Rodríguez Regueiro

Director: Javier Matanza Domingo

Madrid

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a toda mi familia por el apoyo que me han dado todos estos años.

En primer lugar, a mi padre, por brindarme la maravillosa oportunidad de poder estudiar no solo fuera, sino en una universidad como ICAI. El hecho de haber podido vivir en un colegio mayor y de manera más independiente con mis amigos en un piso, ha sido una experiencia muy enriquecedora que tengo claro que me ha curtido para el futuro.

En segundo lugar, a mis hermanas, por estar siempre sacándome una sonrisa, pendientes de mis exámenes y dejándome claro que era capaz de muchas cosas.

Y por último, y por ello más importante, a mi madre, la cual ha sido una pieza fundamental en todo mi recorrido académico, apoyándome siempre ante cualquier situación y por ser siempre la primera persona en estar cuando las cosas iban mal.

Por otro lado, aprovecho para agradecer también a mi tutor Javier Matanza por su guía y apoyo a lo largo del desarrollo de este proyecto y la toda la carrera, poniendo todo su conocimiento a mi disposición.

SISTEMAS DE COMUNICACIÓN AIRE-TIERRA ENTRE AVIONES COMERCIALES Y TORRES DE CONTROL

Autor: Rodríguez Regueiro, Álvaro.
Director: Matanza Domingo, Javier.
Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto analiza y compara los sistemas de comunicación aire-tierra entre aviones comerciales y torres de control, estudiando tanto el comportamiento de modulaciones analógicas AM y digitales BPSK frente a perturbaciones reales mediante simulación en MATLAB como la validación experimental con el dispositivo SDR ADALM Pluto. La tendencia del sector aeronáutico hacia la digitalización de sus comunicaciones queda justificada con los resultados obtenidos, confirmando que los sistemas digitales ofrecen mejor robustez frente al ruido.

Palabras clave: Comunicaciones aeronáuticas, modulación AM, BPSK, SDR, ADALM Pluto

1. Introducción

Las comunicaciones entre pilotos y controladores aéreos constituyen uno de los pilares de la aviación. Las modulaciones en amplitud (AM) sobre la banda VHF se enfrentan a limitaciones como la saturación espectral y los errores humanos. Debido a ello, el sector aeronáutico ha ido desarrollando sistemas digitales como ACARS y ADS-B, que proporcionan mayor eficiencia y fiabilidad, aunque introducen nuevas vulnerabilidades. En consecuencia, iniciativas como SESAR en Europa y NextGen en Estados Unidos establecen como objetivo modernizar las estructuras de comunicación, sustituyendo los sistemas analógicos por digitales de forma progresiva. No obstante, existen ciertas dificultades debido a la coexistencia de ambos tipos de sistemas que hacen necesario un análisis de sus prestaciones y limitaciones bajo condiciones realistas.

En este contexto, el proyecto implementa simulación en MATLAB donde se estudia el comportamiento teórico de los sistemas analógicos y digitales bajo problemas como el ruido, las interferencias y el offset de frecuencia. Asimismo, mediante experimentación en SDR ADALM Pluto se validan, desde una visión práctica, los principios de transmisión y recepción en hardware real.

2. Definición del Proyecto

Se establece como objetivo principal proporcionar una visión técnica y práctica de las comunicaciones aeronáuticas, analizando los sistemas y comparando sus prestaciones para obtener conclusiones sobre sus ventajas y limitaciones en el contexto de la aviación.

Se han definido una serie de objetivos que se irán cumpliendo a medida que el proyecto se desarrolla. En primer lugar, analizar el funcionamiento de los sistemas de comunicación aire-tierra estudiando su desarrollo, evaluar el impacto del ruido, las interferencias y el offset de frecuencia sobre la calidad de la señal. En segundo lugar,

simular en MATLAB sistemas AM y BPSK obteniendo métricas como RMSE, correlación y BER. Por último, validar dichos resultados obtenidos con ADALM Pluto a través de cadenas de transmisión y recepción y comparar sus respectivas prestaciones obteniendo conclusiones relevantes.

En cuanto a la metodología, se recopila información sobre los sistemas aeronáuticos estudiados, se desarrollan los modelos a simular en MATLAB y finalmente se procede al experimento transmitiendo y recibiendo señales reales en configuración loopback mediante un cable conectado a los puertos Tx y Rx.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

La Figura 1 muestra la organización en dos bloques del proyecto. El bloque de simulación está compuesto por diez scripts que abarcan los distintos escenarios de análisis, de tal forma que los primeros cuatro scripts estudian el sistema AM básico, los cuatro posteriores analizan los sistemas digitales BPSK y QPSK y los dos últimos implementan pruebas experimentales con el ADALM Pluto.

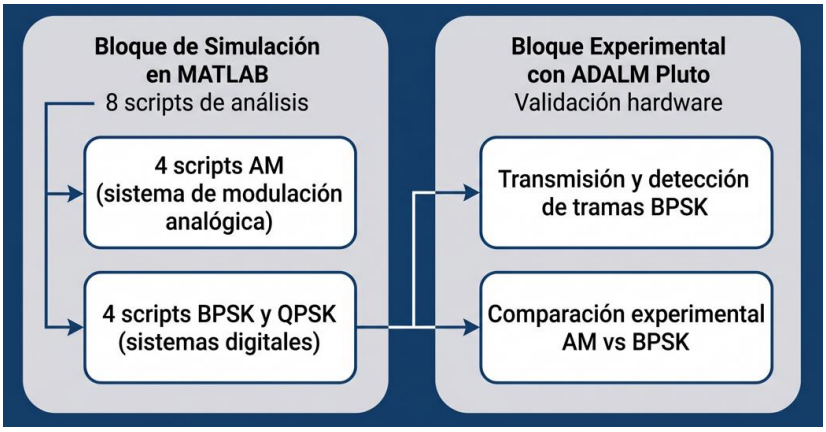

Figura 1-1 Diagrama de bloques de la arquitectura general del sistema

El sistema implementado para AM se trata de una señal de voz compuesta por diferentes componentes sinusoidales que representan el rango de voz humana. Dicha señal se modula con una portadora y un índice de modulación y se transmite por un canal AWGN. Una vez transmitido, se demodula por envolvente mediante la transformada de Hilbert y se obtienen sus respectivas métricas de evaluación, como son el RMSE y el coeficiente de correlación entre la señal transmitida y la recuperada.

Una vez realizada la primera parte del análisis, se estructura un sistema digital BPSK que mapea bits aleatorios a símbolos -1 y +1, transmitiéndolos por el mismo canal AWGN que en el sistema analógico, variando su SNR entre 0dB y 20dB y obteniendo la tasa de error de bit (BER) para evaluar su rendimiento. La comparación entre BPSK y QPSK es una extensión del análisis para estudiar la eficiencia espectral frente a la robustez contra el ruido de ambas modulaciones.

Terminada la parte de simulación, se procede a la parte experimental, configurando el ADALM Pluto a 2,4GHz con una frecuencia de muestreo de 1MHz. A su vez, se construyen las tramas BPSK con una estructura específica utilizada para la comunicación entre aviones y torres de control compuesta por un silencio inicial, un preámbulo de sincronización y una secuencia de datos aleatorios. Mediante la correlación cruzada con el preámbulo se realiza

la detección en recepción, comparando el valor máximo de correlación con un umbral basado en la media y la desviación típica de la señal recibida.

4. Resultados

Los resultados de AM confirman:

- La modulación por envolvente recupera la señal de voz con buena calidad a partir de un determinado valor de SNR, siendo la correlación entre ambas señales próxima a 1.
- Ambas interferencias resultan perjudiciales para la demodulación por envolvente, degradando completamente la señal.
- Los desplazamientos de frecuencia (offset) muestran la sensibilidad de AM al offset degradándose la calidad de la señal recuperada significativamente.

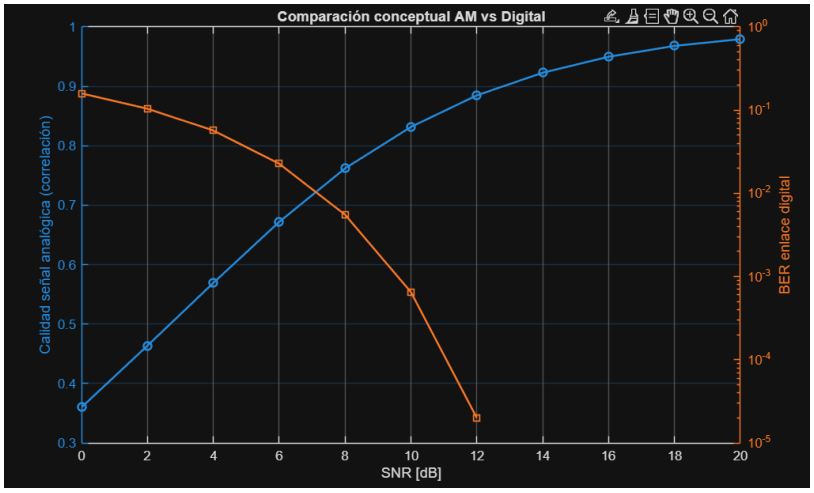

Figura 1-2 Comparación conceptual de AM y BPSK

- Se valida el modelo digital implementado obteniendo una curva BER simulada que se ajusta a la teórica.
- Pese a que BPSK y QPSK presentan la misma BER frente a SNR por bit, QPSK ofrece el doble de eficiencia espectral, pero resulta ser menos robusto contra el ruido.
- Tanto la interferencia tonal como el offset degradan el sistema, llegando a valores de BER de 0,5.
- Se muestra la diferencia fundamental entre ambos sistemas, siendo AM degradada de forma continua mientras que BPSK funciona con alta fiabilidad por encima de un valor de SNR.
- El experimento obtuvo una tasa de detección del 100% en las 20 tramas transmitidas, pudiéndose afirmar la eficacia del mecanismo de correlación con preámbulo.
- Se verifica las diferencias espectrales entre ambas modulaciones

5. Conclusiones

Interpretando los datos obtenidos, se expone el hecho de que los sistemas digitales ofrecen ventajas claras frente a los analógicos, justificando así la tendencia de las comunicaciones aeronáuticas a digitalizar las comunicaciones.

El desarrollo de sistemas como ACARS y CPDLC como alternativas queda explicado debido a la sensibilidad de AM frente a perturbaciones. Sin embargo, sistemas como ADS-B muestran las nuevas vulnerabilidades que introduce la digitalización, siendo más vulnerables frente a ataques de suplantación. Con todo ello, el proyecto consigue demostrar que ADALM Pluto es una herramienta fiable para la validación experimental de sistemas de comunicaciones RF.

6. Referencias

[2] SKYbrary Aviation Safety, "Communication Channel Spacing." [Online]. Available: https://skybrary.aero/articles/communication-channel-spacing

[3] TalkieWaves, "Why Aviation Uses AM Instead of FM: The Technical Story," sep. 2025. [Online]. Available: https://talkiewaves.com/why-aviation-uses-am-instead-fm-technical/

[4] Pilot Institute, "ACARS Explained: How It Keeps Aircraft Connected," jul. 2025. [Online]. Available: https://pilotinstitute.com/acars-explained/

[8] F. Bhatti et al., "Software-defined Radios: Architecture, State-of-the-art, and Challenges," arXiv, 2018. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1804.06564

[14] X. Ying et al., "Detecting ADS-B Spoofing Attacks using Deep Neural Networks," arXiv, 2019. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1904.09969

AIR-TO-GROUND COMMUNICATION SYSTEMS BETWEEN COMMERCIAL AIRCRAFT AND AIR TRAFFIC CONTROL TOWERS

Author: Rodríguez Regueiro, Álvaro.
Supervisor: Matanza Domingo, Javier.
Collaborating Entity: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The project analyses and compares air-to-ground communication systems between commercial aircraft and air traffic control towers, studying both the behaviour of analogue AM and digital BPSK modulations under real perturbations through MATLAB simulation and experimental validation with the ADALM Pluto SDR device. The results obtained justify the aeronautical sector's trend towards the digitalisation of its communications, confirming that digital systems offer better robustness against noise.

Keywords: Aeronautical communications, AM modulation, BPSK, SDR, ADALM Plut

1. Introduction

Communications between pilots and air traffic controllers constitute one of the pillars of aviation. Amplitude modulations (AM) over the VHF band face limitations such as spectral saturation and human errors. As a result, the aeronautical sector has been developing digital systems such as ACARS and ADS-B, which provide greater efficiency and reliability, although they introduce new vulnerabilities. Consequently, initiatives such as SESAR in Europe and NextGen in the United States aim to modernise communication infrastructures, progressively replacing analogue systems with digital ones. However, certain difficulties arise from the coexistence of both types of systems, making an analysis of their performance and limitations under realistic conditions necessary.

In this context, the project implements MATLAB simulation to study the theoretical behaviour of analogue and digital systems under problems such as noise, interference and frequency offset. Furthermore, through experimentation with the ADALM Pluto SDR device, the principles of transmission and reception on real hardware are validated from a practical perspective.

2. Project definition

The main objective is to provide a technical and practical overview of aeronautical communications, analysing the systems and comparing their performance to obtain conclusions about their advantages and limitations in the aviation context.

A series of objectives have been defined that are progressively met throughout the project. First, to analyse the operation of air-to-ground communication systems

studying their development, and to evaluate the impact of noise, interference and frequency offset on signal quality. Second, to simulate AM and BPSK systems in MATLAB obtaining metrics such as RMSE, correlation and BER. Finally, to validate these results with the ADALM Pluto through transmission and reception chains and compare their respective performance obtaining relevant conclusions.

Regarding methodology, information about the aeronautical systems studied is gathered, simulation models are developed in MATLAB, and finally the experiment is carried out transmitting and receiving real signals in loopback configuration via a cable connected to the Tx and Rx ports.

3. System/model/tool description

Figure 1 shows the organisation of the project into two blocks. The simulation block consists of ten scripts covering the different analysis scenarios, where the first four scripts study the basic AM system, the following four analyse the digital BPSK and QPSK systems, and the last two implement experimental tests with the ADALM Pluto.

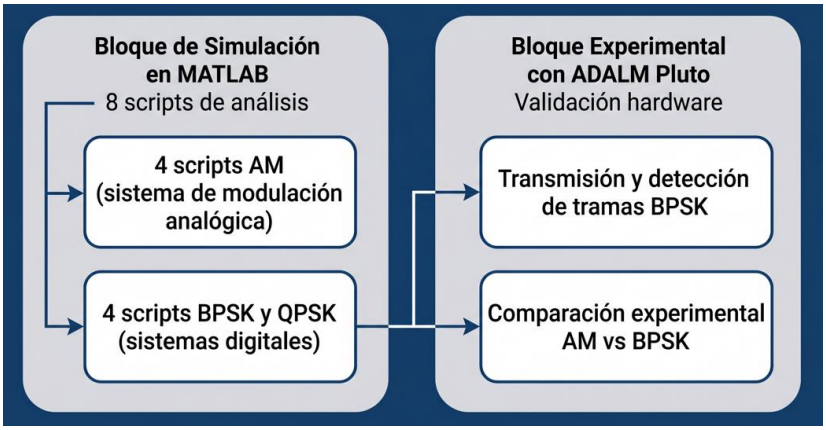

Figure 1 Block diagram of general system architecture

The AM system implemented uses a voice signal composed of different sinusoidal components representing the human voice range. This signal is modulated with a carrier and a modulation index and transmitted through an AWGN channel. Once transmitted, it is demodulated by envelope detection using the Hilbert transform and its respective evaluation metrics are obtained, namely the RMSE and the correlation coefficient between the transmitted and recovered signal.

Once the first part of the analysis is complete, a digital BPSK system is structured, mapping random bits to -1 and +1 symbols, transmitting them through the same AWGN channel as in the analogue system, varying the SNR between 0 dB and 20 dB and obtaining the bit error rate (BER) to evaluate its performance. The comparison between BPSK and QPSK is an extension of the analysis to study the spectral efficiency versus noise robustness trade-off of both modulations.

Once the simulation part is complete, the experimental part proceeds, configuring the ADALM Pluto at 2.4 GHz with a sampling frequency of 1 MHz. At the same time, BPSK frames are constructed with a specific structure used for communication between aircraft and control towers composed of an initial silence, a synchronisation preamble and a

random data sequence. Detection at the receiver is performed through cross-correlation with the preamble, comparing the maximum correlation value against a threshold based on the mean and standard deviation of the received signal.

4. Results

The AM results confirm:

- Envelope demodulation recovers the voice signal with good quality above a certain SNR value, with the correlation between both signals close to 1.
- Both types of interference prove harmful for envelope demodulation, completely degrading the signal.
- Frequency shifts (offset) demonstrate AM's sensitivity to offset, with the quality of the recovered signal degrading significantly.

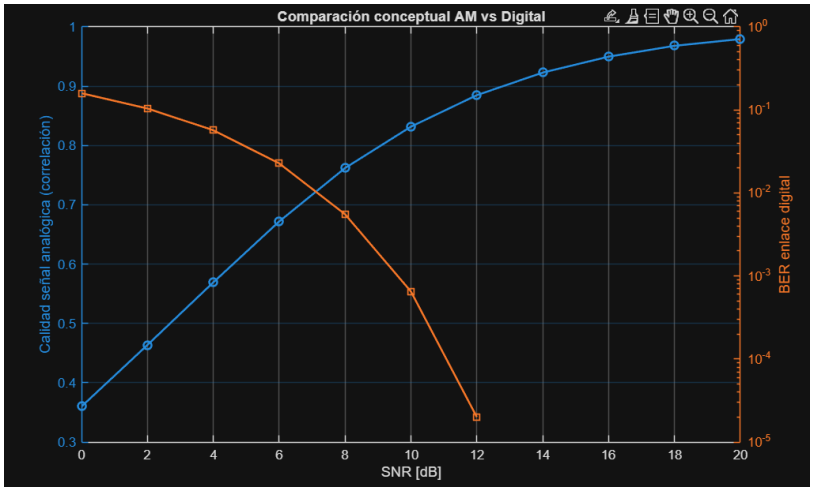

Figure 2 Conceptual comparison of AM and BPSK

- The implemented digital model is validated, obtaining a simulated BER curve that matches the theoretical one.
- Although BPSK and QPSK present the same BER against SNR per bit, QPSK offers double the spectral efficiency but proves less robust against noise.
- Both tonal interference and offset degrade the system, reaching BER values of 0.5.
- The fundamental difference between both systems is shown, with AM degrading continuously while BPSK operates with high reliability above a certain SNR value.
- The experiment achieved a 100% detection rate across the 20 transmitted frames, confirming the effectiveness of the preamble correlation mechanism.
- The spectral differences between both modulations are verified.

5. Conclusions

Interpreting the data obtained, it is shown that digital systems offer clear advantages over analogue ones, thus justifying the trend in aeronautical communications towards digitalisation.

The development of systems such as ACARS and CPDLC as alternatives is explained by AM's sensitivity to perturbations. However, systems such as ADS-B reveal the new vulnerabilities introduced by digitalisation, being more vulnerable to spoofing attacks. With all of this, the project successfully demonstrates that the ADALM Pluto is a reliable tool for the experimental validation of RF communication systems.

6. References

[2] SKYbrary Aviation Safety, "Communication Channel Spacing." [Online]. Available: https://skybrary.aero/articles/communication-channel-spacing

[3] TalkieWaves, "Why Aviation Uses AM Instead of FM: The Technical Story," sep. 2025. [Online]. Available: https://talkiewaves.com/why-aviation-uses-am-instead-fm-technical/

[4] Pilot Institute, "ACARS Explained: How It Keeps Aircraft Connected," jul. 2025. [Online]. Available: https://pilotinstitute.com/acars-explained/

[8] F. Bhatti et al., "Software-defined Radios: Architecture, State-of-the-art, and Challenges," arXiv, 2018. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1804.06564

[14] X. Ying et al., "Detecting ADS-B Spoofing Attacks using Deep Neural Networks," arXiv, 2019. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1904.09969

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción 7

Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías 8

2.1 Comunicaciones de voz analógicas 8
2.2 Sistemas digitales de comunicación y vigilancia 8
2.3 Comunicaciones por satélite 9
2.4 Radio definida por Software (SDR) y ADALM Pluto 9
2.5 Técnicas de modulación y métricas de rendimiento 10
2.6 MATLAB 11

Capítulo 3. Estado de la Cuestión 13

3.1 Evolución de las comunicaciones aeronáuticas 13
3.2 Digitalización del control aéreo 13
3.3 Problemas actuales y limitaciones 14
3.4 Seguridad y vulnerabilidades 14
3.5 Tendencias futuras 14

Capítulo 4. Definición del Trabajo 16

4.1 Justificación 16
4.2 Objetivos 16
4.3 Metodología 17
4.4 Planificación y Estimación Económica 17

Capítulo 5. Sistema/Modelo Desarrollado 19

5.1 Arquitectura general del sistema 19
5.2 Diseño 20
5.2.1 Sistema de comunicaciones analógicas mediante modulación AM 20
5.2.2 Estudio de la influencia del ruido en sistemas AM 20
5.2.3 Estudio de interferencias en sistemas AM 21
5.2.4 Estudio del offset de frecuencia en sistemas AM 22
5.2.5 Sistema digital BPSK y cálculo de VER 22
5.2.6 Comparación entre modulaciones BPSK y QPSK 23

5.2.7 Estudio de interferencia y offset en sistemas digitales BPSK *24*
5.2.8 Comparación entre sistema analógico AM y digital BPSK *25*
5.3 Implementación 25
5.3.1 Entorno de desarrollo *25*
5.3.2 Implementación de simulaciones *25*
5.4 Implementación experimental mediante ADALM Pluto 26
5.4.1 Transmisión y detección de tramas BPSK *26*
5.4.2 Comparación experimental entre AM y BPSK *28*

Capítulo 6. Análisis de Resultados 29
6.1 Sistema analógico AM 29
6.1.1 Sistema básico AM *29*
6.1.2 Efecto del ruido en sistemas AM *31*
6.1.3 Efecto de las interferencias en sistemas AM *33*
6.1.4 Efecto del offset de frecuencia en sistemas AM *35*
6.2 Sistemas digitales 36
6.2.1 Curvas BER en BPSK *36*
6.2.2 Comparación entre modulaciones BPSK y QPSK *38*
6.2.3 Efecto de interferencias y offset en sistemas digitales BPSK *40*
6.3 Comparación entre sistema analógico AM y digital BPSK 43
6.4 Transmisión y recepción de tramas BPSK 46
6.5 Comparación experimental de AM y BPSK 50

Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros 53
7.1 Conclusiones 53
7.2 Limitaciones del proyecto 54
7.3 Trabajos Futuros 55

Capítulo 8. Bibliografía 57

ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS 59

ANEXO II 60
8.2 Script 01- Implementación básica de sistema de comunicaciones AM 60
8.3 Script 02 – Estudio de la influencia del ruido sobre señales AM 60
8.4 Script 03 – Análisis de interferencias adyacentes y cocanal en AM 61

8.5 Script 04 – Estudio del efecto del offset en AM 63
8.6 Script 05 – Modulación BPSK 64
8.7 Script 06 – Comparación BPSK y QPSK 64
8.8 Script 07 – Estudio de interferencias y offset en BPSK 66
8.9 Script 08 – Comparación entre AM y BPSK 67
8.10 Script 09 – Implementación experimental de tramas BPSK mediante ADALM Pluto 68
8.11 Script 10 – Comparación experimental entre AM y BPSK con SDR 69

Índice de figuras

Figura 1-1 Diagrama de bloques de la arquitectura general del sistema 9
Figura 1-2 Comparación conceptual de AM y BPSK 10
Figura 5-1 Diagrama de bloques de la arquitectura general del sistema desarrollado 19
Figura 5-2 Diagrama de bloques del sistema AM implementado 20
Figura 5-3 Esquema de los escenarios de interferencia considerados en el sistema AM 22
Figura 5-4 Sistema BPSK implementado 23
Figura 5-5 Esquema de interferencia y offset en el sistema BPSK 24
Figura 5-6Diagrama de bloques de transmisión y detección BPSK mediante ADALM Pluto 27
Figura 6-1 Espectro de la voz en banda base 29
Figura 6-2 Señales temporales AM 30
Figura 6-3 Comparación señal original y señal demodulada 30
Figura 6-4 RMSE y correlación frente a SNR 31
Figura 6-5 Señales demoduladas para distintos valores de SNR 32
Figura 6-6 Comparación original y demodulada para distintos SNR 32
Figura 6-7 Demodulaciones en tres escenarios de interferencia 33
Figura 6-8 Comparación de cada escenario 34
Figura 6-9 Espectros de los escenarios de interferencia 34
Figura 6-10 Comparación RMSE y correlación por escenario 35
Figura 6-11 Curvas BER teórica y simulada para BPSK en canal AWGN 36
Figura 6-12 Constelaciones recibidas 37
Figura 6-13 Histogramas 37
Figura 6-14 Comparación de curvas BER frente a SNR de BPSK y QPSK 38
Figura 6-15 Constelaciones BPSK y QPSK 39
Figura 6-16 Comparación de eficiencia espectral 39
Figura 6-17 BER de BPSK frente a amplitud de interferencia 40

Figura 6-18 Constelación de BPSK para distintas amplitudes 41
Figura 6-19 Constelación BPSK para distintos valores de offset 42
Figura 6-20 Resumen BER frente a offset e interferencia 43
Figura 6-21 Comparación conceptual de AM y BPSK 44
Figura 6-22 Métricas de AM y BPSK 45
Figura 6-23 Resumen comparativo 45
Figura 6-24 Señal transmitida 46
Figura 6-25 Espectro de la señal transmitida 47
Figura 6-26 Espectros Rx acumulados y detección de tramas 47
Figura 6-27 Comparación espectral 48
Figura 6-28 Espectrograma de la señal transmitida 49
Figura 6-29 Señales transmitidas en el dominio temporal 50
Figura 6-30 Espectros de las señales transmitidas 50
Figura 6-31 Potencia acumulada y ancho de banda 51
Figura 6-32 Espectrogramas comparativos 51

Índice de tablas

Tabla 1. Planificación del proyecto 17
Tabla 2. Estimación de costes de los recursos empleados 18
Tabla 3 Organización de scripts desarrollados 26

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, las comunicaciones entre los aviones comerciales y las torres de control constituyen uno de los pilares de la aviación. Aspectos como la seguridad y eficiencia de distintas operaciones quedarían comprometidos de forma crítica sin un intercambio de información fiable y preciso entre pilotos y controladores. Cada maniobra, despegue o cambio de rumbo depende exclusivamente de que dicha comunicación se produzca correctamente tanto en cualquier punto del planeta como bajo cualquier condición[1].

A medida que la sociedad avanza, el tráfico aéreo lo hace con ella. Este crecimiento no solo ha sido en densidad operacional sino también en complejidad tecnológica, dejando en evidencia las limitaciones de los sistemas tradicionales como la saturación del canal, los errores humanos, la falta de cobertura en ciertas regiones del mundo y la escasez espectral. El sector aeronáutico afronta estos retos en su día a día y ha venido desarrollando e incluso implementando sistemas digitales, los cuales son más robustos y eficientes, por organismos como la FAA a través de programas de modernización como el NextGen.

A pesar de ello, esta transición sigue enfrentándose a los desafíos técnicos y de seguridad que requieren análisis rigurosos como la coexistencia de sistemas analógicos y digitales, las vulnerabilidades de los sistemas frente a interferencias y la interoperabilidad entre distintos países y fabricantes.

La idea de este proyecto es abordar las comunicaciones entre aviones comerciales y torres de control desde dos perspectivas. Por un lado, una sección de análisis donde se estudian mediante código MATLAB los sistemas analógicos y digitales utilizados en este sector, evaluando su comportamiento y eficiencia frente a problemas típicos como el ruido, la interferencia o la limitación de canal. Por otro lado, una sección experimental mediante la radio definida por software ADALM PLUTO que permite simular cadenas completas de transmisión y recepción en hardware real, reflejando los principios de los sistemas aeronáuticos estudiados.

El objetivo principal del proyecto es obtener y ofrecer una visión técnica y práctica de las comunicaciones aéreas. Entender el comportamiento de los sistemas ante el ruido y las interferencias, un contraste entre tecnologías analógicas y digitales y adquirir conclusiones sobre sus diversas limitaciones y posibilidades de mejora a partir de los resultados obtenidos en ambas secciones.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

2.1 COMUNICACIONES DE VOZ ANALÓGICAS

Desde el inicio las comunicaciones de voz entre pilotos y controladores aéreos se realizaban mediante señales analógicas en la banda VHF, comprendida entre 118 y 137 MHz. La modulación que se utiliza es la modulación en amplitud, siendo la estándar en aviación [3].

Una de las ventajas que proporciona la modulación en amplitud (AM) es que, cuando dos estaciones transmiten a la vez por el mismo canal, el receptor capta la señal más potente, lo que es muy determinante en situaciones de emergencia para la seguridad [3].

El espaciamiento entre canales varía según la región, siendo el más común 25kHz. Sin embargo, en Europa es de 8,33 kHz, lo que permite triplicar el número de canales disponibles en la banda para hacer frente a la creciente densidad de tráfico aéreo [2].

Aunque a lo largo de la historia de la aviación las comunicaciones VHF AM han sido las más comunes, tienen limitaciones importantes. Tienen cobertura restringida en áreas oceánicas o remotas. Además, la transmisión de voz es susceptible a errores e interferencias, lo que ha llevado al desarrollo de sistemas digitales como opciones complementarias [3].

2.2 SISTEMAS DIGITALES DE COMUNICACIÓN Y VIGILANCIA

Los sistemas digitales complementan e incluso sustituyen a las comunicaciones de voz analógicas. Los tres sistemas más relevantes en este contexto son ACARS, CPDLC y ADS-B.

ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) es el primer sistema de datos digitales incorporado en aviación comercial. ACARS permite el intercambio de mensajes cortos de texto entre aviones y torres de control a través de radio VHF o satélite. En cuanto a sus aplicaciones, incluye el envío automático de reportes de posición, datos meteorológicos y mensajes. Su mayor ventaja es la de reducir la carga de trabajo de los pilotos y la dependencia de las comunicaciones de voz [4].

CPDLC (Controller-Pilot Data Link Communications) se trata de un sistema de comunicación entre controladores y pilotos mediante mensajes de texto, permitiendo transmitir autorizaciones y solicitudes sin necesidad de comunicación de voz. Opera sobre ACARS y su adopción ha conseguido reducir la carga en los canales de voz VHF y minimizar errores humanos [4].

ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) permite a los aviones determinar su posición y transmitirla automáticamente y de forma periódica a torres de control e incluso a otros aviones. Este sistema opera principalmente a 1090 MHz. A diferencia de otros radares, ADS-B permite al avión transmitir su posición sin necesidad de ser interrogado, reduciendo la dependencia de tierra [5].

No obstante, en cuanto a algunas desventajas que estos sistemas presentan, ADS-B no utiliza cifrado ni autenticación, haciéndolo vulnerable a ataques de suplantación mediante radios definidas por software [5].

2.3 COMUNICACIONES POR SATÉLITE

SATCOM es el sistema que permite la comunicación entre aviones y torres de control en zonas donde otras comunicaciones como VHF no tienen cobertura. Este sistema es fundamental para garantizar las comunicaciones en rutas transoceánicas [6].

El SATCOM está formado por un equipo a bordo del avión que incluye datos satelitales, un amplificador de potencia, una antena y una estación a tierra que actúa como mediadora entre el satélite y la red de comunicaciones. Gracias a este sistema, es posible tanto la comunicación de voz como el intercambio de datos. [7].

A pesar de sus ventajas, SATCOM es vulnerable a la latencia introducida por satélites, al coste elevado de los equipos y a la dependencia de la estructura espacial. No obstante, debido al desarrollo de nuevas arquitecturas de red, todo apunta a que el SATCOM tendrá un mayor protagonismo en la infraestructura de comunicaciones aeronáuticas [7].

2.4 RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE (SDR) Y ADALM PLUTO

La Radio Definida por Software (SDR) es una arquitectura de sistema de comunicaciones en la que componentes como filtros, moduladores y demoduladores se realizan mediante software ejecutado en un procesador. Esto permite que un mismo dispositivo sea capaz de operar con diferentes frecuencias y modulaciones cambiando el software, sin necesidad de modificar el hardware y reduciendo costes [8].

SDR puede analizar, generar y recibir señales en las bandas utilizadas por los sistemas de comunicación. Estudios han demostrado que mediante SDR es posible recibir y analizar señales de distintos sistemas como ADS-B o VHF AM, promoviendo el aumento de la seguridad en comunicaciones aéreas [14].

El dispositivo empleado para el proyecto ha sido el ADALM Pluto, dispositivo orientado a la enseñanza de SDR y comunicaciones RF.

Características [9][10]:

- Rango de frecuencias: 325MHz a 3,8 GHz (ampliable)
- Ancho de banda máximo: 20 MHz
- Conversor ADC y DAC
- Un canal de transmisión y uno de recepción
- Compatible con MATLAB, Simulink y Python
- Alimentado y conectado al ordenador mediante USB

Aunque su rango de frecuencias por defecto no cubre la banda VHF aeronáutica, ADALM Pluto permite validar experimentalmente los principios de los sistemas de comunicación estudiados.

2.5 TÉCNICAS DE MODULACIÓN Y MÉTRICAS DE RENDIMIENTO

Existen diferentes técnicas de modulación y métricas de rendimiento asociadas a los sistemas de comunicación que permiten analizar el comportamiento de las señales, en especial cuando se ven afectadas por ruido o limitaciones.

La modulación digital se basa en modificar parámetros de la señal portadora para representarla en binario. En concreto, se han empleado las modulaciones BPSK y QPSK que son comúnmente usadas para realizar análisis digitales por su sencillez y facilidad de implementación.

BPSK representa cada bit en dos fases de la señal portadora, mientras que QPSK utiliza 4 fases diferentes. En BPSK, cada símbolo transporta 1 bit (0 o 1) en fases separadas, lo que la hace una modulación robusta frente al ruido, aunque con una eficiencia espectral limitada (1 bit por símbolo). QPSK transporta 2 bits por símbolo, duplicando la eficiencia espectral respecto de BPSK, pero reduciendo la separación entre símbolos, lo que empeora la robustez de la modulación y la hace más sensible a los errores.

Una de las métricas empleadas es la relación señal a ruido (SNR) que compara la potencia de la señal útil con la potencia del ruido en el canal.

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

Donde P_s representa la potencia de la señal y P_n la potencia de ruido.

Un valor elevado indica que la señal domina sobre el ruido, mientras que valores bajos de SNR implican una mayor probabilidad de error en la detección de símbolos.

Otra de las métricas empleadas es la tasa de error de bit (BER) que representa la relación entre el número de bits recibidos erróneamente y el número total de bits transmitidos, pudiendo determinar el rendimiento de los sistemas:

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

Donde N_e representa los bits erróneos y N_t los bits transmitidos,

También se ha utilizado el modelo de canal AWGN, el cual es un canal al que se le añade ruido blanco gaussiano, siendo uno de los modelos más utilizados que permiten estudiar la influencia del ruido sobre el sistema.

2.6 MATLAB

El lenguaje de programación es MATLAB. Para este caso, MATLAB ofrece toolboxes que proporcionan funciones y algoritmos para comunicaciones, desde la generación de la señal hasta su recepción y análisis.

Communications Toolbox permite simular sistemas, modelar modulación digital como BPSK y QPSK, añadir ruido AWGN, calcular métricas como la tasa de error de bit (BER) y graficar espectros [11].

Para el proyecto, MATLAB se utiliza como base principal para la simulación y análisis de los sistemas de comunicación analógicos y digitales estudiados, evaluando su rendimiento frente a adversidades.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.1 EVOLUCIÓN DE LAS COMUNICACIONES AERONÁUTICAS

La comunicación entre pilotos y controladores ha ido evolucionando desde sus inicios. Al principio las comunicaciones se realizaban principalmente mediante sistemas de alta frecuencia (HF) que permitían alcanzar grandes distancias, pero con limitaciones importantes debido a las diversas condiciones a las que se enfrentaba.

La banda VHF se consolidó como el estándar para las comunicaciones de voz, siendo la modulación en amplitud (AM) la más importante. A pesar de las limitaciones que presenta, como el ruido o la interferencia, sigue siendo el principal método de comunicación aire-tierra [2][3].

La aviación fue cogiendo mayor relevancia y uso, aumentando el número de vuelos, lo que produjo nuevos problemas como la saturación de los canales y la carga de trabajo. Para solucionar estas nuevas limitaciones surgieron sistemas digitales que consistían en el intercambio de información, como ACARS, diseñado para el envío automático de mensajes [4].

Más adelante aparecieron otros sistemas como CPDLC y ADS-B para transmitir autorizaciones e instrucciones con mensajes de texto y transmitir información sobre la posición, velocidad y altitud del avión utilizando sistemas por satélite [5].

3.2 DIGITALIZACIÓN DEL CONTROL AÉREO

Iniciativas como SESAR en Europa y NextGen en Estados Unidos han llevado a mejorar la seguridad y eficiencia de los sistemas del tráfico aéreo por el aumento del transporte aéreo.

Ambos programas tienen como objetivo sustituir de manera progresiva las comunicaciones de voz por sistemas digitales, los cuales son más rápidos y precisos. Para ello, han aparecido tecnologías como CPDLC que reducen la carga de trabajo de los pilotos y controladores eliminando comunicaciones rutinarias [12][13]. Además, se ha demostrado que los enlaces digitales reducen la ocupación de los canales VHF, mejorando la eficiencia operativa y disminuyendo la probabilidad de errores humanos como interpretaciones incorrectas [12].

La FAA ha demostrado que CPDLC reduce la ocupación del canal de voz hasta un 75%, mejorando la seguridad y eficiencia [12]. En Europa, el programa Link 2000+ facilita su implementación con requisitos obligatorios para los aviones que vuelen por encima de ciertos niveles [13].

La combinación de sistemas como ADS-B con intercambios digitales de datos proporciona una visión más precisa de la situación. Centros como EUROCONTROL combinan ADS-B con CPDLC permitiendo así a los controladores identificar el rumbo e intención de los aviones y ofrecer instrucciones más eficientes [13].

3.3 PROBLEMAS ACTUALES Y LIMITACIONES

La saturación espectral de la banda VHF debido al crecimiento del tráfico aéreo es uno de los principales desafíos que han obligado a reducir el espaciamiento entre canales, reduciendo el ancho de banda para aumentar el número de canales disponibles [2].

Otros dos desafíos son la cobertura en zonas remotas y la interoperabilidad entre sistemas de distintos fabricantes y países. Como se ha mencionado anteriormente, el alcance de las comunicaciones VHF es limitado y por ello las comunicaciones por satélite adquieren un papel relevante en las rutas transoceánicas y regiones remotas [6][7].

En cuanto al conflicto de interoperabilidad, es producida por los distintos procedimientos e implementaciones tecnológicas que utiliza cada fabricante, dificultando así la integración global [13].

3.4 SEGURIDAD Y VULNERABILIDADES

A pesar de todo, con la digitalización de los sistemas han surgido nuevas vulnerabilidades. En el caso de ADS-B, al no tener sus transmisiones ni cifrado ni autenticación, las hace muy vulnerables a ataques por suplantación. Por ejemplo, un atacante podría generar aeronaves falsas utilizando un dispositivo SDR confundiendo a los controladores [14]. Esta limitación ya ha sido documentada por diferentes fuentes que proponen mayor profundización en el aprendizaje para la detección de ataques con técnicas de detección para mejorar la seguridad de las futuras infraestructuras [5].

3.5 TENDENCIAS FUTURAS

Actualmente se siguen explorando nuevas soluciones para mejorar las condiciones de las comunicaciones. Una de las más prometedoras es la aplicación de técnicas de aprendizaje automático para clasificar e identificar las señales analizando datos y detectando patrones que por métodos convencionales serían muy difíciles de identificar.

Estos algoritmos pueden llegar a niveles de precisión cercanos al 100% en la identificación de señales ADS-B y ACARS.

El uso de SDR facilita el desarrollo y validación de estas técnicas, permitiendo implementar soluciones de bajo coste y realizar pruebas experimentales en condiciones reales [8]. Debido a la necesidad de ofrecer cobertura global en cualquier zona, las comunicaciones via satélite están adquiriendo cada vez más relevancia. En el caso de SATCOM, su integración con otros componentes digitales mejorará la disponibilidad de la comunicación y reducirá la dependencia de tierra [6][7].

Por tanto, la evolución tanto de las comunicaciones por satélite como de mecanismos avanzados de autenticación y seguridad forma las principales líneas de avance del mundo de la aviación y marcarán el futuro de las comunicaciones aeronáuticas [6][7].

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta lo explicado, queda claro que las comunicaciones aire-tierra están atravesando un momento de transición. Por un lado, aunque los sistemas analógicos de voz sigan siendo el estándar, sus limitaciones degradan la eficiencia y seguridad del tráfico. Sin embargo, los sistemas digitales ofrecen ventajas introduciendo nuevas limitaciones que aún no están resueltas.

En este contexto, es evidente que es necesario analizar ambos sistemas, comparar sus prestaciones en condiciones realistas y evaluarlos frente a limitaciones reales. Este proyecto se ocupa de esa necesidad. Por un lado, desde un punto de vista analítico mediante simulación en MATLAB, lo cual permite estudiar el comportamiento teórico de los sistemas. Por otro lado, desde la validación experimental con SDR se permite visualizar una transmisión aeronáutica. Esta comparación entre ambos sistemas aporta información sobre las diferencias de rendimiento entre ambos, contribuyendo al conocimiento de un área de alta importancia.

Además, el dispositivo ADALM Pluto para el análisis confirma que es posible realizar análisis y experimentos técnicos de sistemas reales sin la necesidad de un gran presupuesto o de equipamiento especializado y costoso, convirtiéndose en muy útil para ámbitos de investigación con recursos limitados.

4.2 OBJETIVOS

Los objetivos principales del proyecto son:

- Analizar el funcionamiento de los sistemas de comunicación aire-tierra, comprendiendo los mecanismos de transmisión de información tanto por voz analógica como digital
- Evaluar las distintas limitaciones a las que se enfrentan dichos sistemas, analizando su comportamiento ante el efecto del ruido, las interferencias y la degradación del canal.
- Simular en MATLAB sistemas de modulación AM y digital BPSK, obteniendo métricas de rendimiento como la tasa de error de bit y el espectro de la señal.

- Validar dichos resultados mediante el ADALM Pluto con cadenas de transmisión y recepción en hardware real.
- Comparar las prestaciones de los sistemas analógicos y digitales extrayendo conclusiones acerca de sus ventajas y limitaciones

4.3 METODOLOGÍA

El proyecto combina análisis teórico y simulación con experimentación.

En primer lugar, se recopila información sobre los sistemas de comunicación entre aviones y torres de control, estudiando sus características y estado actual.

A continuación, se desarrollan modelos de simulación en MATLAB. Para la parte analógica, se simula la modulación AM y se analiza su comportamiento frente a ruido e interferencias, apoyándose en métricas como la relación señal a ruido (SNR). Para la parte digital, se simulan modulaciones BPSK y QPSK, calculando curvas de BER frente a SNR y analizando los diagramas de constelación.

Más adelante, tiene lugar la parte experimental con el ADALM Pluto, incorporando cadenas de transmisión y recepción con detección de tramas mediante correlación con preámbulo. Con los resultados obtenidos, se procede a un análisis del comportamiento del sistema.

Finalmente, se integran los resultados de ambos sistemas para concluir con el comportamiento de los sistemas analógicos y digitales en el contexto de las comunicaciones aeronáuticas.

4.4 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

El proyecto se ha desarrollado de la siguiente manera:

Tabla 1. Planificación del proyecto

Fase	**Descripción**	**Período**

1	Revisión y recopilación de información	Sept-Oct 2025
2	Simulación analógica AM en MATLAB	Oct-Nov 2025
3	Simulación digital en MATLAB	Nov-Ene 2026
4	Parte experimental con ADALM Pluto	Feb-Abr 2026
5	Análisis de resultados y comparativa	Abr-Jun 2026
6	Redacción de memoria	Abr-Jun 2026

Tabla 2. Estimación de costes de los recursos empleados

Concepto	**Coste estimado**
ADALM Pluto	200€
Licencia MATLAB + Toolboxes	2000€
Ordenador personal	800€
Total recursos empleados	3000€

En cuanto a la estimación económica, tanto el ADALM Pluto como la licencia de MATLAB han sido proporcionados por la universidad, por lo que el coste ha sido nulo pero una estimación del coste equivalente sería aproximadamente 3000€.

Capítulo 5. SISTEMA/MODELO DESARROLLADO

5.1 ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA

El sistema desarrollado para el proyecto analiza y compara el comportamiento de diferentes sistemas de comunicación utilizados en el entorno aeronáutico tanto con simulación como con experimentación. Para llevar a cabo esta idea, la arquitectura del sistema está dividida en dos bloques. Por un lado, un bloque de simulación en MATLAB y un bloque experimental en SDR utilizando el dispositivo ADALM Pluto.

Con el bloque de simulación se estudia el comportamiento de ambos sistemas bajo distintas condiciones realistas. En primer lugar, se ha implementado un sistema de comunicaciones basado en modulación AM sobre el cual se han realizado diferentes pruebas para evaluar su rendimiento, el efecto del ruido, las interferencias y los errores de frecuencia (offset) sobre la calidad de la señal.

Una vez establecida la parte de análisis de sistemas analógicos, se desarrolla un análisis de sistemas de comunicación digital con modulaciones BPSK y QPSK para analizar el impacto de distintas limitaciones mediante el cálculo de métricas como la SNR y BER, además de comparar el rendimiento entre ambas modulaciones.

El bloque experimental se basa en una radio definida por software llamada ADALM Pluto, la cual permite transmitir y recibir señales y contrastar de forma práctica los resultados obtenidos en las simulaciones. Mediante el ADALM Pluto, fue posible interpretar el comportamiento típico de los sistemas de comunicaciones.

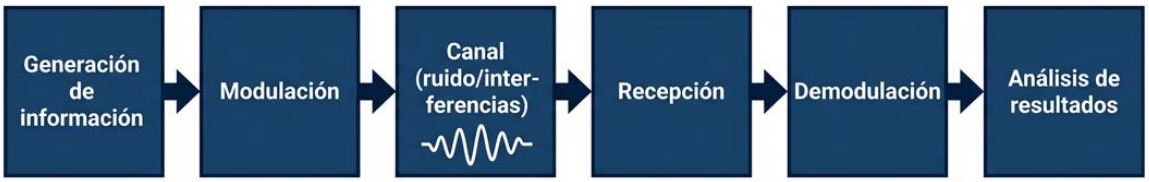

Figura 5-1 Diagrama de bloques de la arquitectura general del sistema desarrollado

La metodología seguida combina el estudio teórico con validación experimental, proporcionando así al proyecto una visión completa de los sistemas de comunicaciones analizados en el ámbito aeronáutico.

5.2 DISEÑO

5.2.1 SISTEMA DE COMUNICACIONES ANALÓGICAS MEDIANTE MODULACIÓN AM

El sistema desarrollado es una completa transmisión y recepción en modulación AM. La señal de información corresponde a una señal de voz simplificada combinando componentes sinusoidales de 300 Hz, 800 Hz y 1500 Hz, estas frecuencias se encuentran dentro del rango característico de comunicaciones de voz. Una vez construida la señal, es normalizada para garantizar niveles de amplitud adecuados durante la modulación.

La transmisión se realiza mediante una portadora de frecuencia 10 kHz y un índice de modulación de 0,8. La combinación de ambas genera una señal AM con portadora.

La señal modulada es pasada por un canal afectado por ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN) para simular condiciones reales. Este método representa las perturbaciones presentes durante la propagación de la señal y se trata de una referencia muy utilizada en el estudio de sistemas de comunicación.

Por otro lado, el receptor funciona como una demodulación por envolvente utilizando la transformada de Hilbert, lo que elimina la componente continua introducida por la modulación AM y más adelante se normaliza la señal recuperada.

Con las métricas de error cuadrático medio (RMSE) se comparan la señal original y la recuperada, y con el coeficiente de correlación se evalúa el funcionamiento del sistema.



Figura 5-2 Diagrama de bloques del sistema AM implementado

5.2.2 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL RUIDO EN SISTEMAS AM

A partir del sistema básico, se desarrolla una segunda simulación con el objetivo de estudiar el efecto del ruido sobre la calidad de la señal. La estructura general de transmisión y recepción de la señal es la misma, variando la relación señal a ruido del canal.

La señal de voz vuelve a ser una aproximación de voz formada por la combinación de componentes sinusoidales de 300 Hz, 1000 Hz y 2200 Hz, permitiendo la representación de la señal en banda base dentro del rango de interés para comunicaciones de voz. Al igual que

en el estudio anterior, la señal es normalizada para evitar problemas de amplitud durante la modulación y la portadora mantiene los mismos parámetros.

Dicha señal es transmitida por el canal AWGN variando la SNR desde 0 dB hasta 30 dB en pasos de 2 dB, pudiendo evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes niveles de degradación del canal. Para cada valor de SNR la señal es demodulada por envolvente, se elimina su componente continua y se normaliza la señal recuperada, siguiendo el mismo procedimiento empleado anteriormente.

Las métricas RMSE y el coeficiente de correlación vuelven a emplearse para comparar de manera cuantitativa ambas señales. En este caso, el RMSE permite cuantificar la diferencia entre la señal transmitida y la recibida para cada valor de SNR. Por otro lado, se almacenan ejemplos de señales demoduladas para distintos valores de SNR permitiendo comparar visualmente el comportamiento temporal del sistema en baja, media y alta relación señal-ruido. En conclusión, este análisis muestra la sensibilidad de una comunicación AM frente al ruido del canal, variando únicamente la calidad del enlace.

5.2.3 ESTUDIO DE INTERFERENCIAS EN SISTEMAS AM

Las comunicaciones también pueden verse afectadas por interferencias de otras transmisiones que comparten frecuencias próximas dentro de la banda. Por ello mismo, se desarrolló una simulación que permite evaluar el impacto de diferentes tipos de interferencia sobre una comunicación AM.

Por un lado, se utilizó una modulación AM con una portadora de 15 kHz, un índice de modulación de 0,8 y varias componentes sinusoidales para generar la señal. Por otro lado, se generó una segunda señal que representa una transmisión interferente. Con todo esto, se consideraron dos casos. En primer lugar, una interferencia adyacente en la que la señal interferente utiliza una portadora próxima a la frecuencia de la otra señal (18 kHz). En segundo lugar, un escenario que corresponde a una interferencia cocanal donde ambas señales comparten la misma frecuencia de portadora que la señal de interés.

Se definieron tres casos de estudio: uno de referencia sin interferencias, uno con interferencia adyacente y un escenario con interferencia cocanal. En los tres casos se añade ruido blanco gaussiano con una SNR fija de 25 dB, aislando así el efecto producido por cada tipo de interferencia. Más adelante se demoduló la señal siguiendo el mismo procedimiento de demodulación, eliminación y normalización.

Adicionalmente, se incorporaron representaciones temporales y espectrales de los distintos escenarios y sus respectivas métricas, con comparaciones entre las señales originales y demoduladas de los tres casos para facilitar la extracción de conclusiones del efecto producido por cada tipo de interferencia.

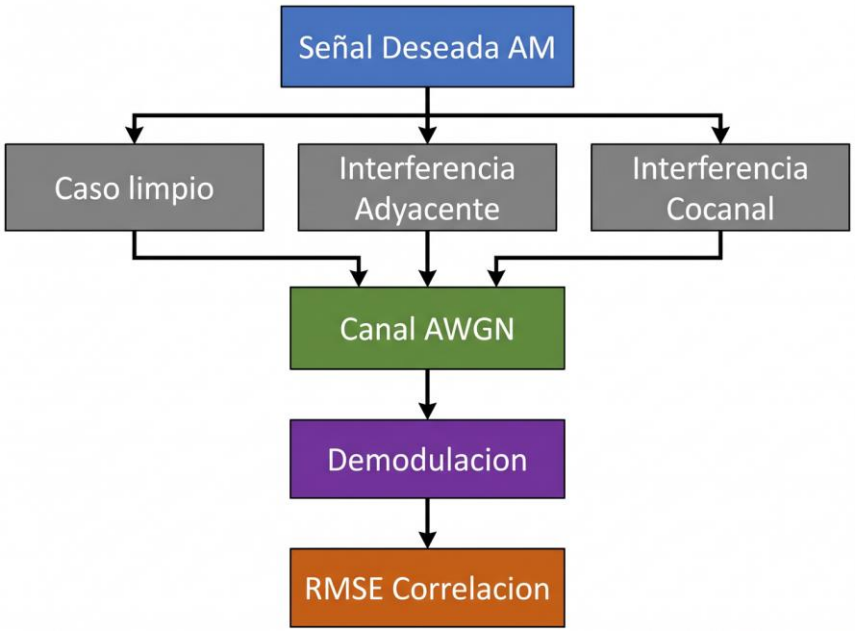

Figura 5-3 Esquema de los escenarios de interferencia considerados en el sistema AM

5.2.4 ESTUDIO DEL OFFSET DE FRECUENCIA EN SISTEMAS AM

Otro factor que afecta a una comunicación radio es el error de frecuencia entre transmisor y receptor (offset) debido a que la frecuencia de recepción no coincide con la frecuencia de la portadora transmitida, ocasionando una desintonización que degrada la recuperación de la señal.

Este efecto ha sido analizado mediante una simulación basada en el sistema AM anterior, con componentes sinusoidales de 300 Hz, 900 Hz y 1500 Hz y una portadora de 15 kHz y 0,8 de índice de modulación. Para estudiar el efecto, se introducen distintos valores de offset de frecuencia en la señal recibida, concretamente de desplazamientos entre 0 Hz y 1000 Hz respecto a la frecuencia de la portadora, pero con un mismo valor de SNR (25 dB) para todos los casos.

Todo ello se simuló para construir una situación en la que el receptor se encuentra desintonizado. El estudio realizado permite analizar la sensibilidad de un sistema AM frente a errores de sintonización, evaluando cómo diferentes desplazamientos de frecuencia afectan al proceso de recepción y recuperación.

5.2.5 SISTEMA DIGITAL BPSK Y CÁLCULO DE VER

A continuación, se procede al bloque de análisis de simulaciones digitales en modulación BPSK para analizar el comportamiento de una comunicación, en este caso digital, frente al ruido. Para ello, se generó una secuencia aleatoria de bits formada por 200.000 muestras

binarias, un número elevado de muestras para obtener una estimación realista de la tasa de error de bit para los distintos valores de SNR.

La modulación BPSK se llevó a cabo mediante un mapeo binario, asociando el bit 0 al símbolo -1 y el bit 1 al símbolo +1, de tal forma que la información es representada en dos posibles estados de fase o amplitud. Para estudiar la influencia del ruido, la SNR varía entre 0 dB y 20 dB en pasos de 2 dB y para cada valor de SNR se añade ruido a la señal transmitida. La demodulación se aplica con una decisión por umbral en cero y las muestras con valor positivo se interpretan como bit 1, mientras que las muestras con valor negativo se interpretan como bit 0, como se ha explicado anteriormente.

El rendimiento del sistema se realiza mediante el cálculo de la tasa de error de bit (BER), comparando la secuencia de bits transmitida con la secuencia de bits recibida, obteniendo así la proporción de bits detectados erróneamente. Se calcula también la BER teórica correspondiente a una BPSK en un canal AWGN, utilizando esta curva como referencia para garantizar la coherencia del modelo simulado. Por último, las representaciones de la constelación recibida y los histogramas para distintos valores de SNR permiten estudiar cómo se distribuyen las muestras recibidas alrededor de los símbolos ideales y cómo el ruido afecta a estos.



Figura 5-4 Sistema BPSK implementado

5.2.6 COMPARACIÓN ENTRE MODULACIONES BPSK Y QPSK

Con el objetivo de comparar el comportamiento estudiado, se realizó una modulación QPSK bajo las mismas condiciones de canal, permitiendo visualizar las diferencias entre ambas modulaciones y sus respectivos beneficios y limitaciones.

Para QPSK se reutilizó la secuencia aleatoria de 200.000 bits. No obstante, mientras en el caso de BPSK cada bit se asignaba a un símbolo, en QPSK los bits se agrupan de dos en dos, de forma que cada símbolo transporta dos bits de información. Esto se implementó mediante un mapeo Gray manual, asignando cuatro posibles combinaciones binarias a cuatro puntos de la constelación, siendo estos normalizados para mantener una potencia media aceptable. El mapeo Gray ayuda a reducir el número de errores de bit cuando se produce una decisión incorrecta entre símbolos.

Al igual que en el resto de simulaciones, las señales moduladas vuelven a transmitirse a través de un canal AWGN y la SNR varía entre 0 dB y 20 dB. Para cada valor de SNR se realizó la modulación correspondiente y se obtuvo la BER. Para BPSK la demodulación se realizó al igual que en el anterior análisis, mientras que para QPSK la detección consistió en

la decisión por cuadrantes utilizando el signo de las componentes en fase y cuadratura de cada símbolo recibido.

Para su visualización, se representan las constelaciones recibidas para un valor de SNR apreciando la dispersión de los símbolos en presencia de ruido y analizando la separación entre puntos en BPSK y QPSK. Complementando el análisis, también se representó una comparación teórica de eficiencia espectral considerando los bits por símbolo transmitidos por cada modulación.

5.2.7 ESTUDIO DE INTERFERENCIA Y OFFSET EN SISTEMAS DIGITALES BPSK

Teniendo en cuenta el comportamiento de las modulaciones digitales, en el siguiente estudio se realizó una simulación para evaluar el efecto de perturbaciones como la interferencia tonal y el offset de frecuencia sin compensación en el receptor sobre un sistema BPSK. Al contrario que en anteriores simulaciones, el bit 0 se asignó al símbolo +1 y el bit 1 al símbolo -1 para facilitar el estudio de perturbaciones en ambos ejes.

El efecto de la interferencia se representó como una componente de frecuencia de 1500 Hz añadida a la señal transmitida con una amplitud entre 0 y 1 en pasos de 0,2 manteniendo la SNR en 12 dB para estudiar la degradación del sistema en consecuencia de un aumento progresivo de la señal interferente. La detección de bits se basa en la decisión sobre la parte real de la señal recibida, donde las muestras con parte real negativa son interpretadas como bit 1 y las positivas como bit 0 para el cálculo de la tasa de error de bit.

El efecto del offset se modeló como una rotación de los símbolos recibidos, de manera que se consideraron offsets de 0 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz y 10 Hz con el objetivo de visualizar el efecto de la desincronización sobre la constelación. El impacto del offset se implementó sin ningún mecanismo de compensación para evaluar el impacto directo del offset sobre la decisión de los símbolos y calcular la BER para cada desplazamiento. Todas estas representaciones, junto con las curvas y resúmenes de BER, fueron fundamentales para comprender cómo se degrada el sistema digital cuando aparecen perturbaciones más allá del ruido del canal.

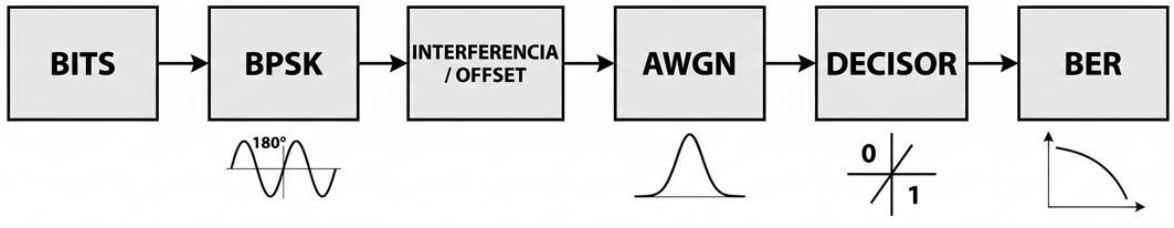

Figura 5-5 Esquema de interferencia y offset en el sistema BPSK

5.2.8 COMPARACIÓN ENTRE SISTEMA ANALÓGICO AM Y DIGITAL BPSK

Recopilando toda la información obtenida de las simulaciones, en la última simulación del bloque de análisis se implementó una simulación comparativa entre ambos sistemas de comunicación para comprender ambos enfoques bajo unas mismas condiciones de canal, analizando de forma conjunta tanto el comportamiento de una comunicación AM como el enlace digital BPSK frente a distintas SNR.

Resumiendo lo realizado anteriormente, por un lado, en el sistema analógico se utilizó una señal de voz compuesta por varios componentes sinusoidales que fue normalizada y modulada en amplitud con una portadora. Esta misma señal se transmitió a través de un canal AWGN con valores de SNR entre 0 dB y 20 dB. Por otro lado, se construyó un sistema digital BPSK de 200.000 bits mapeados a símbolos y transmitidos a través del mismo canal que en el sistema analógico con los mismos valores de SNR.

Cada sistema para cada valor de SNR obtuvo métricas específicas como el RMSE, el coeficiente de correlación y la BER. En este contexto, se realizó una comparación entre la degradación de una señal analógica y el comportamiento de un sistema digital en términos de error de bit, y aunque las métricas comparadas no son equivalentes, sí que permitieron estudiar el efecto del ruido para cada comunicación. Finalmente, diversas representaciones temporales y constelaciones se generaron para obtener conclusiones comparativas sobre la evolución de ambos sistemas.

5.3 IMPLEMENTACIÓN

5.3.1 ENTORNO DE DESARROLLO

El entorno de desarrollo utilizado para el proyecto ha sido MATLAB, tanto para simulación como para experimentación, donde se pueden introducir modelos de transmisión, recepción y procesado digital de señales. Para las simulaciones se emplearon las librerías Communications ToolBox, la cual incluye funciones para la generación y análisis de modulaciones y simulación de comunicaciones, y Signal Processing Toolbox, para evaluaciones espectrales y filtrado.

También se utilizó la plataforma SDR ADALM Pluto para el bloque experimental, pudiendo representar una comunicación con señales de radiofrecuencia mediante una radio definida por software (ADALM Pluto) lo cual facilitó la práctica de sistemas de comunicaciones sin necesidad de hardware específico. En conjunto, el uso de MATLAB y ADALM Pluto supuso una base fiable para simular un entorno completo.

5.3.2 IMPLEMENTACIÓN DE SIMULACIONES

Todas las simulaciones se ejecutaron en scripts independientes en MATLAB, siguiendo una estructura organizada para abordar cada problema de forma progresiva, comprobando que

los resultados fueran coherentes antes de añadir nuevas funciones. El proceso comenzó partiendo de un sistema básico de comunicaciones analógicas, seguido de adiciones de distintas perturbaciones que afectan a comunicaciones reales. Posteriormente se prosiguió con el desarrollo de sistemas digitales basados en modulaciones específicas e incorporando nuevas métricas. Finalmente, se concluyó con scripts comparativos, así como con pruebas experimentales para la validación de los resultados.

Tabla 3 Organización de scripts desarrollados

Script	**Tema**
Script 01	Implementación básica de un sistema de comunicaciones AM
Script 02	Estudio de la influencia del ruido sobre señales AM
Script 03	Análisis de interferencias adyacentes y cocanal en AM
Script 04	Estudio del efecto del offset en AM
Script 05	Modulación BPSK
Script 06	Comparación entre BPSK y QPSK
Script 07	Estudio de interferencias y offset en BPSK
Script 08	Comparación entre AM y BPSK
Script 09	Implementación experimental de tramas BPSK mediante ADALM Pluto
Script 10	Comparación experimental entre AM y BPSK con SDR

5.4 IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL MEDIANTE ADALM PLUTO

5.4.1 TRANSMISIÓN Y DETECCIÓN DE TRAMAS BPSK

Esta prueba permitió transmitir y recibir señales digitales reales y comprender su comportamiento en hardware físico. La comunicación se basó en una trama digital formada

por tres bloques principales: una zona inicial de silencio, un preámbulo de sincronización y una secuencia de datos modulados en BPSK.

Esta estructura representa una trama común en comunicaciones aeronáuticas. Por un lado, el silencio inicial hace referencia a que el canal no siempre está en uso. El preámbulo de sincronización es una secuencia Barker de longitud 13, secuencia utilizada en sistemas entre avión y torre de control debido a sus propiedades de autocorrelación que permiten detectar con precisión una trama incluso con presencia de ruido [15]. Esta secuencia también fue interpolada y normalizada para adaptarla a la longitud establecida.

La información útil se generó mediante una secuencia aleatoria de bits modulada con BPSK. Los tres bloques fueron conectados para construir la trama completa y ser transmitida periódicamente mediante el dispositivo SDR. El ADALM Pluto fue configurado con una frecuencia central de 2,4 GHz, una frecuencia de muestreo de 1 MHz y las ganancias Tx (transmisión) y Rx (recepción) se ajustaron manualmente para obtener una recepción estable durante las pruebas.

Para la simplificación del experimento, el sistema fue configurado con loopback (cable conectado a Tx y Rx) para obtener resultados más limpios. De esta manera se evitaron complicaciones como ruido que hubieran surgido mediante el uso de dos ADALM Pluto, uno para transmitir y otro para recibir. Se empleó un algoritmo basado en correlación con el preámbulo para la detección de las tramas recibidas en las que la señal recibida se correlacionó con la secuencia Barker utilizada en transmisión. Partiendo de ese resultado, se calculó un umbral basado en la media y la desviación típica de la señal de manera que, cuando el valor máximo de correlación superaba dicho umbral, la trama era detectada correctamente.

Al proceso de detección se le incorporaron herramientas para visualizar en tiempo real la evolución de la señal recibida, los espectros obtenidos mediante la transformada de Fourier, los valores de correlación y el resultado de las detecciones durante las múltiples tramas. A esto se le añadieron representaciones espectrales y espectrogramas para verificar el correcto funcionamiento del sistema.

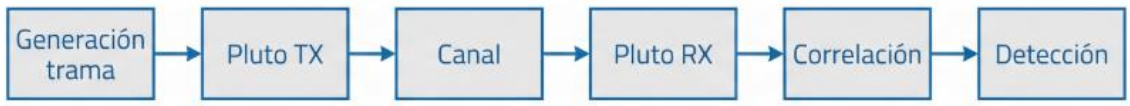

Figura 5-6 Diagrama de bloques de transmisión y detección BPSK mediante ADALM Pluto

5.4.2 COMPARACIÓN EXPERIMENTAL ENTRE AM Y BPSK

Para finalizar el proyecto, era necesario realizar una segunda prueba experimental para cumplir con los objetivos, la cual consistió en comparar directamente una señal AM y una señal BPSK utilizando la plataforma SDR.

La señal AM empleada fue la misma que se utilizó en anteriores estudios, mientras que la señal digital se compuso de una trama BPSK formada por una secuencia Barker y datos aleatorios, la trama completa fue repetida varias veces para sincronizar las duraciones temporales de ambas señales. El ADALM Pluto transmitió y recibió ambas señales con la misma configuración en la detección de tramas BPSK y sus parámetros se mantuvieron constantes para observar únicamente las diferencias en las características de cada modulación.

Con las señales recibidas se graficaron sus espectros con la transformada de Fourier, permitiendo estudiar la distribución de energía tanto en transmisión como en recepción. De manera complementaria, se generaron espectrogramas para visualizar la evolución temporal de su contenido en frecuencia, aportando información como la ocupación espectral o la distribución temporal de la energía de cada sistema.

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 SISTEMA ANALÓGICO AM

6.1.1 SISTEMA BÁSICO AM

El objetivo principal fue verificar el correcto funcionamiento de transmisión y recepción antes de introducir perturbaciones adicionales mediante un sistema de comunicaciones AM.

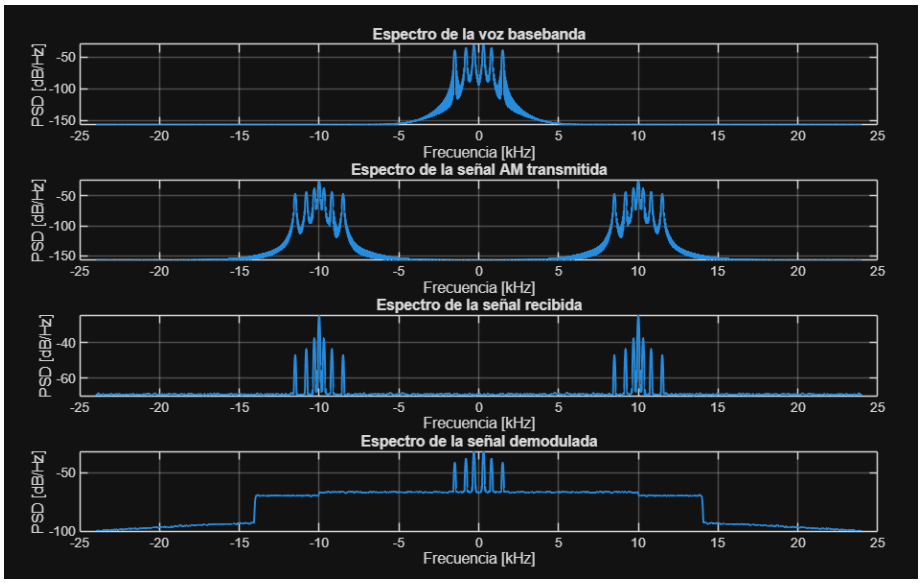

Figura 6-1 Espectro de la voz en banda base

La Figura 6-1 muestra el espectro de las etapas del sistema. En primer lugar, se observa el espectro de la señal de voz compuesto por las componentes sinusoidales. En segundo lugar, se representa la estructura típica del espectro AM transmitido, es decir, la portadora central a 10 kHz desplazada por dos bandas laterales simétricas que contienen la información de voz. En tercer lugar, se muestra el espectro recibido con un nivel de ruido apreciable al haber pasado por el canal AWGN, pero manteniendo una estructura reconocible.

Finalmente se grafica el espectro de la señal demodulada que recupera las componentes de voz en banda base, confirmando que la demodulación por envolvente elimina la portadora y devuelve la señal al dominio de banda base.

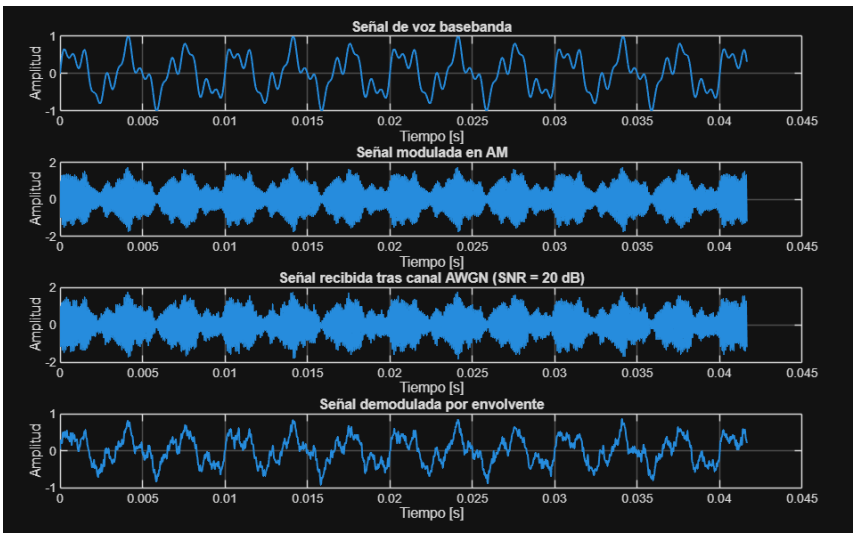

Figura 6-2 Señales temporales AM

En la Figura 6-2 se muestran las señales en el dominio del tiempo en cada etapa del sistema, siendo la primera la señal de voz original. Ésta presenta el resultado de la suma de las tres componentes sinusoidales. Por otro lado, la señal modulada en AM refleja la envolvente característica de esta modulación donde la amplitud de la portadora varía en función de la señal de voz.

También se grafica la señal recibida y la señal demodulada, que tras pasar por el canal con SNR de 20 dB presenta un nivel de ruido bastante notorio que se superpone a la envolvente. Se puede apreciar cómo la señal demodulada por envolvente consigue recuperar una forma de onda bastante similar a la original, aunque con una distorsión producida por el propio ruido del canal.

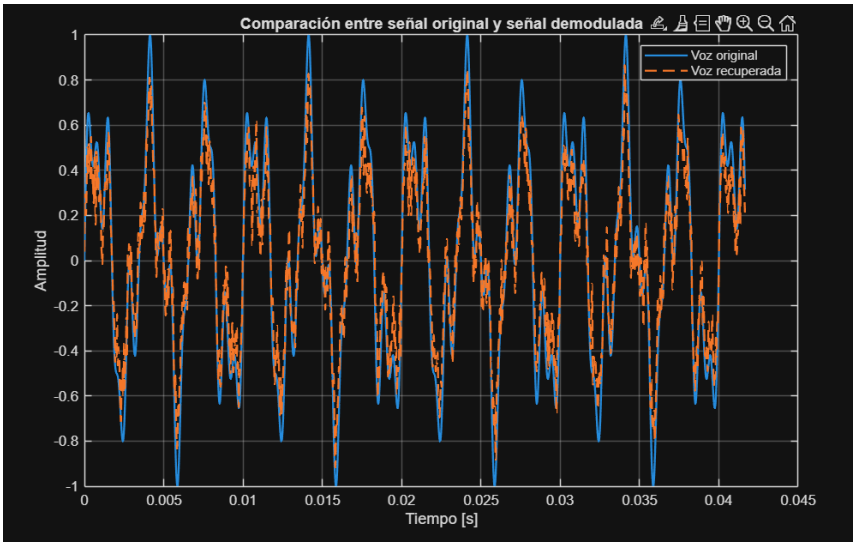

Figura 6-3 Comparación señal original y señal demodulada

Para finalizar, la comparación entre la señal de voz original (azul) y la señal recuperada tras la demodulación (naranja discontinua) se muestra en la Figura 6-3. Se observa que ambas señales mantienen la misma forma general y que sus picos coinciden en el dominio temporal. No obstante, aunque la información haya sido correctamente recuperada, la señal obtenida tiene un mayor rizado respecto a la original, especialmente en zonas donde la amplitud es pequeña.

Estos resultados confirman que tanto con una SNR de 20 dB como con la demodulación por envolvente el sistema funciona correctamente y se consigue recuperar la señal de voz con buena calidad.

6.1.2 EFECTO DEL RUIDO EN SISTEMAS AM

Se analizó cómo varía la calidad de la señal recuperada en función del nivel del ruido, variando la SNR entre 0 dB y 30 dB.

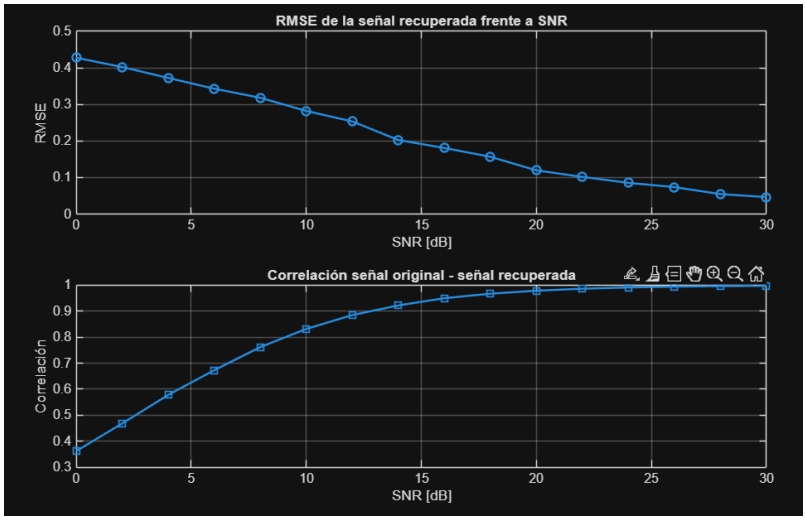

Figura 6-4 RMSE y correlación frente a SNR

En la gráfica superior de la Figura 6-4 se muestra la curva RMSE frente a SNR y en la inferior se grafica la correlación frente a SNR. Por un lado, la RMSE decrece a medida que aumenta la SNR, partiendo de un valor de 0,43 para SNR de 0 dB y decreciéndose hasta valores cercanos a 0,05 para SNR de 30 dB, lo cual confirma que a mayor calidad de canal, menor es la diferencia entre la señal transmitida y la señal recuperada. Por otro lado, la correlación aumenta desde valores de aproximadamente 0,4 para SNR de 0 dB hasta valores prácticamente 1 a partir de una SNR de 15 dB. Estos resultados son coherentes, ya que explican cómo a partir de cierto nivel de ruido en el sistema, AM recupera la señal con una calidad muy aceptable para una comunicación.

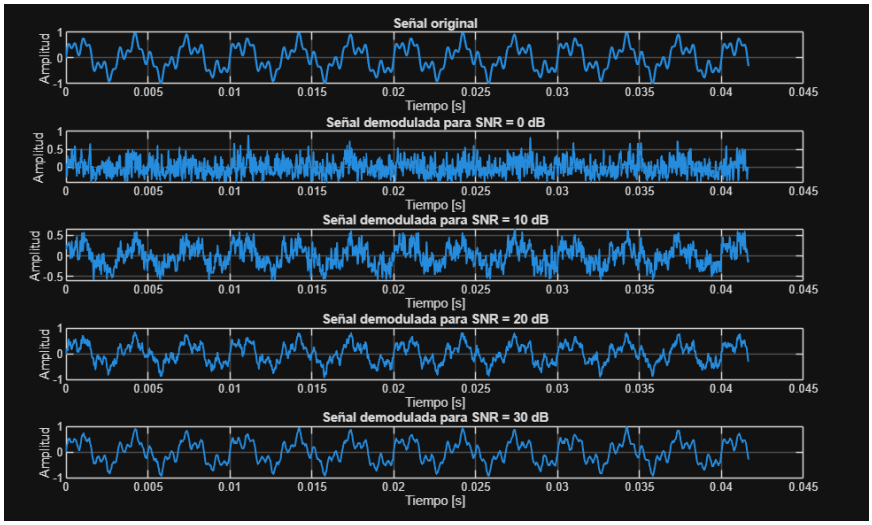

Figura 6-5 Señales demoduladas para distintos valores de SNR

Como se explicó anteriormente, el objetivo de este script fue analizar el efecto del ruido sobre las señales demoduladas para distintos valores de SNR. Por ello, en la Figura 6-5 se muestran señales demoduladas para cuatro valores de SNR: 0, 10, 20 y 30 dB. Apoyado en las conclusiones obtenidas de la Figura 6-4, se aprecia cómo a medida que la SNR aumenta, la señal recuperada es cada vez más próxima a la transmitida.

Para una SNR de 0 dB se ve cómo la señal demodulada adquiere una distorsión muy elevada, siendo prácticamente irreconocible respecto a la original. Sin embargo, para una SNR de 30 dB e incluso de 20 dB, la recuperación es muy alta y la forma de onda coincide con la original.

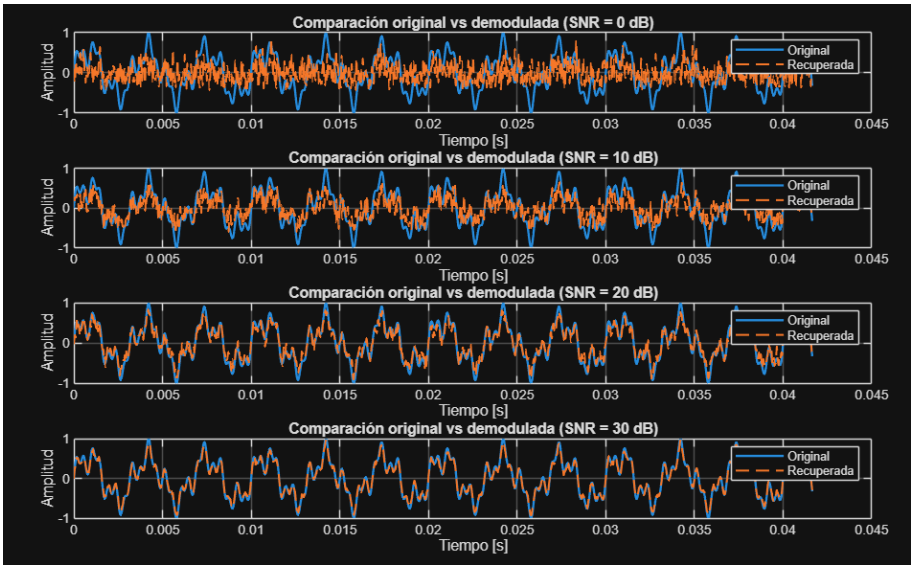

Figura 6-6 Comparación original y demodulada para distintos SNR

Finalmente, y de manera más visual, se muestra la comparación directa entre la señal original (azul) y la señal demodulada (naranja discontinuo) para los cuatro valores de SNR. Tal y como se ha argumentado, para SNR de 0 dB las señales apenas guardan relación, además, se muestra claramente la dominancia del ruido sobre la información. Para la SNR de 10 dB, las señales empiezan a seguir una tendencia similar, pero el efecto del ruido sigue predominando.

Por último, con los valores de SNR más altos, el solapamiento entre ambas señales es considerable, siendo para 30 dB casi indistinguibles, confirmando que AM funciona correctamente a niveles elevados de SNR. Por todo ello, se pudo concluir que los resultados eran coherentes con el comportamiento esperado de un sistema analógico y reflejaban la sensibilidad de la modulación AM frente al ruido.

6.1.3 EFECTO DE LAS INTERFERENCIAS EN SISTEMAS AM

Teniendo en cuenta las otras perturbaciones a las que se enfrentan las comunicaciones aeronáuticas, este script evaluó el impacto de dos tipos de interferencia, la interferencia adyacente, donde la señal interferente utiliza una portadora cercana a la señal de interés, e interferencia cocanal, donde ambas señales comparten la misma frecuencia de portadora. Para obtener unos resultados más significativos, estos casos se estudiaron también en comparación con un caso limpio sin interferencias.

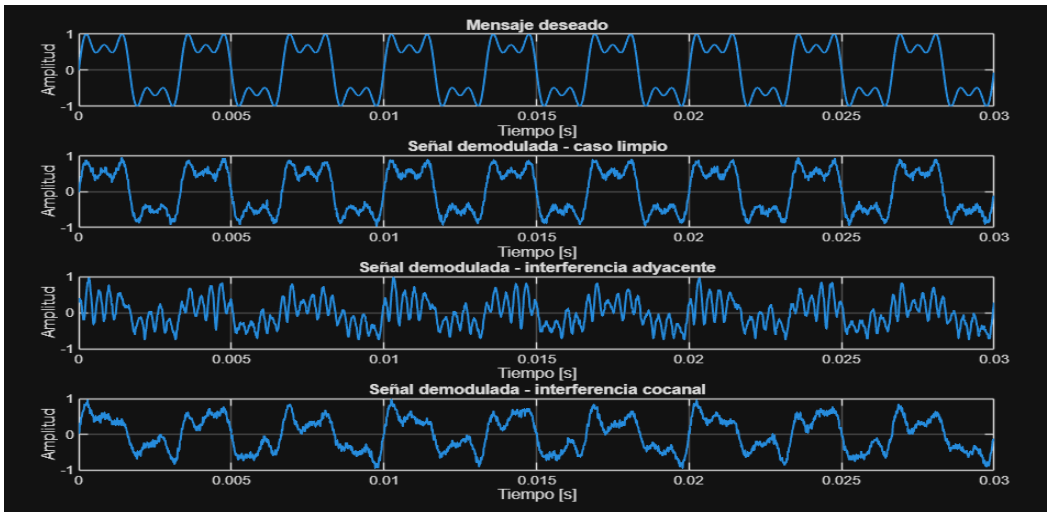

Figura 6-7 Demodulaciones en tres escenarios de interferencia

En la Figura 6-7 se representan las señales demoduladas en los tres escenarios junto con el mensaje deseado. En el caso limpio y a diferencia de los otros dos casos, la señal demodulada sigue exactamente la forma del mensaje original. En los casos de interferencia se aprecia cómo la señal demodulada es distorsionada de manera muy significativa.

En la interferencia adyacente se observan oscilaciones de alta frecuencia que están superpuestas, lo que dificulta por completo la recuperación de la señal. En la interferencia cocanal, aparentemente la distorsión es menor que en el adyacente, aunque sigue presentando desviaciones bruscas respecto a la original.

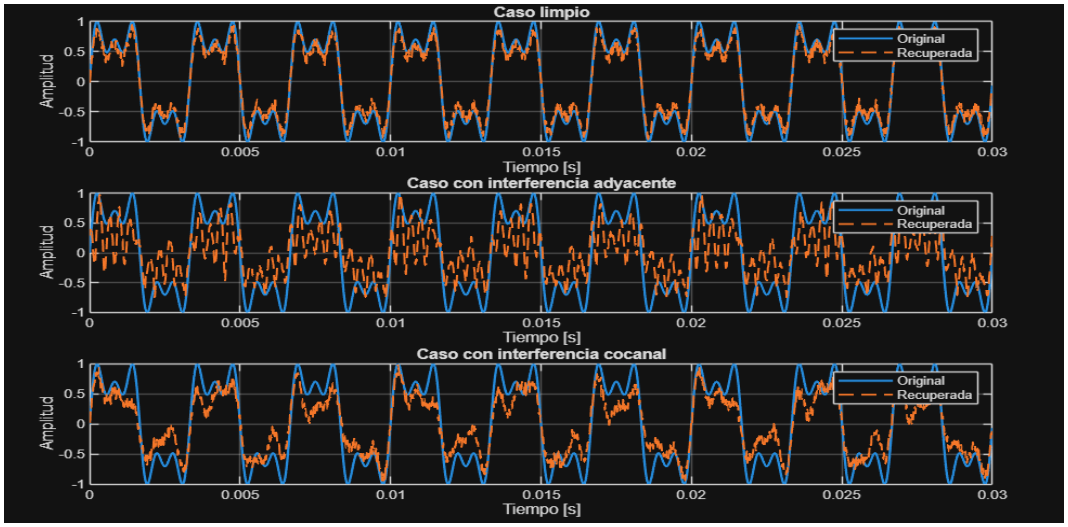

Figura 6-8 Comparación de cada escenario

Al igual que en la Figura 6-6, la Figura 6-8 refleja la comparación directa entre ambas señales, donde en el caso limpio ambas señales se solapan perfectamente, siendo prácticamente la misma señal. Analizando los casos de interferencia, la señal adyacente recuperada contiene fuertes oscilaciones que se alejan de la señal original, mientras que en el caso cocanal el solapamiento es mejor que en el adyacente, aunque bastante peor que en el caso limpio debido a su impacto sobre la demodulación por envolvente.

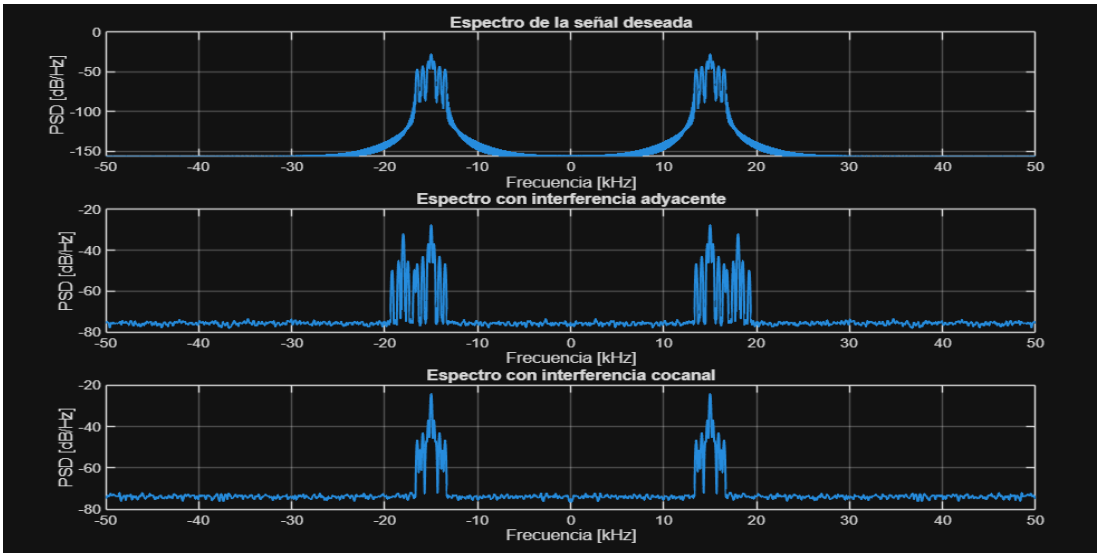

Figura 6-9 Espectros de los escenarios de interferencia

Una vez estudiada la forma de las señales en el dominio del tiempo, la Figura 6-9 muestra el efecto de las interferencias sobre la señal en el dominio de la frecuencia, es decir, sus espectros.

El espectro de la señal deseada, las bandas laterales situadas simétricamente a 15 kHz se aprecian claramente, pero en el caso del espectro con interferencia adyacente aparecen componentes espectrales adicionales en las bandas laterales, siendo esto una consecuencia de la superposición de la señal interferente a 18 kHz. Por último, el espectro con interferencia cocanal muestra una mayor concentración de energía alrededor de la frecuencia de 15 kHz, lo cual explica la distorsión observada en el dominio del tiempo.

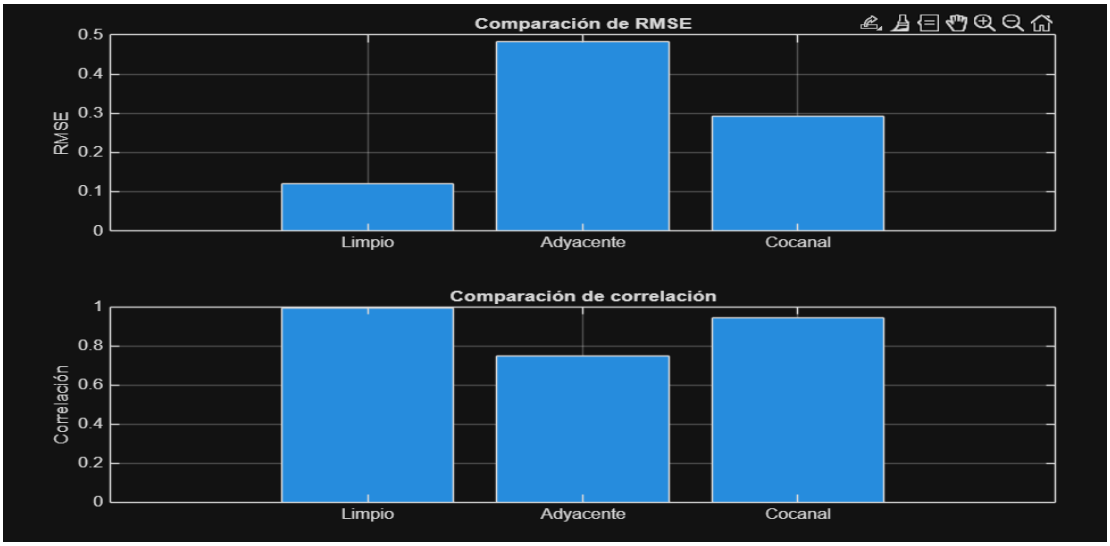

Figura 6-10 Comparación RMSE y correlación por escenario

Las barras de RMSE muestran claramente que el caso limpio obtiene el valor más bajo, seguido de la interferencia cocanal y siendo la interferencia adyacente la peor de los tres casos. La correlación confirma lo reflejado en la RMSE, siendo el caso limpio el mejor de todos con un valor prácticamente de 1 y el caso adyacente el peor de todos.

Estos resultados confirman que la interferencia adyacente resulta más perjudicial para la demodulación por envolvente que la interferencia cocanal en las condiciones estudiadas, lo cual es crucial en el contexto aeronáutico donde muchas transmisiones coexisten en canales cercanos.

6.1.4 EFECTO DEL OFFSET DE FRECUENCIA EN SISTEMAS AM

Los resultados obtenidos muestran que incluso desplazamientos en frecuencia pequeños provocan una degradación en la señal demodulada, aumentando el RMSE y reduciendo la relación con la señal original. Para desplazamientos superiores a 500 Hz, la calidad de la señal se deteriora significativamente dejando en evidencia la sensibilidad de la demodulación por envolvente. En el contexto de las comunicaciones entre aviones y torres

de control, esto resulta ser crítico, ya que la sintonización de frecuencias es crítica para la correcta recepción.

6.2 SISTEMAS DIGITALES

6.2.1 CURVAS BER EN BPSK

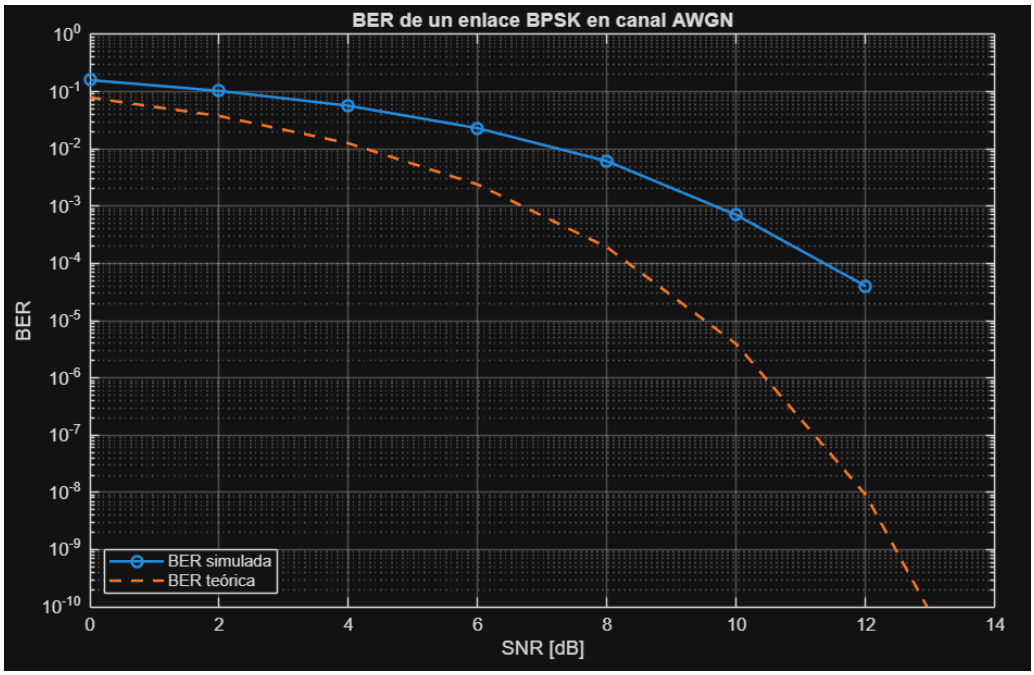

Figura 6-11 Curvas BER teórica y simulada para BPSK en canal AWGN

La Figura 6-11 muestra la tendencia decreciente a medida que la SNR aumenta tanto de la curva simulada como de la teórica, confirmando que a mayor calidad, menor es la probabilidad de error en la detección de bits. La curva simulada sigue a la curva teórica para valores de SNR hasta 12 dB, mientras que para valores superiores a este la curva simulada se separa debido a las limitaciones del número de bits generados, es decir, con los 200000 bits generados y una BER teórica baja, el número de errores es insuficiente. A pesar de ello, esto resulta ser algo habitual en este tipo de análisis, por lo que no invalida el modelo, sino que lo refuerza.

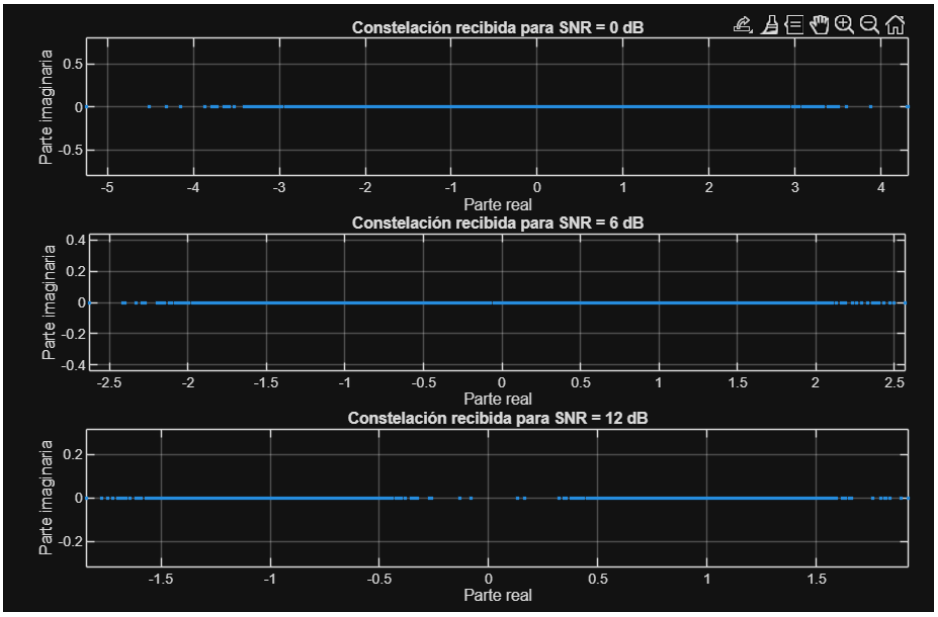

Figura 6-12 Constelaciones recibidas

A continuación, quedan representadas las constelaciones para distintos valores de SNR. Una constelación ideal en BPSK debe presentar dos puntos en el eje que representan los dos símbolos. A medida que la relación señal a ruido aumenta, los puntos de la constelación se concentran en los valores ideales, Para una SNR de 0 dB o incluso 6 dB apenas aparecen dichos puntos en la constelación, mientras que para una SNR de 12 dB la dispersión se reduce y los dos grupos empiezan a distinguirse, lo que corresponde a una VER muy baja.

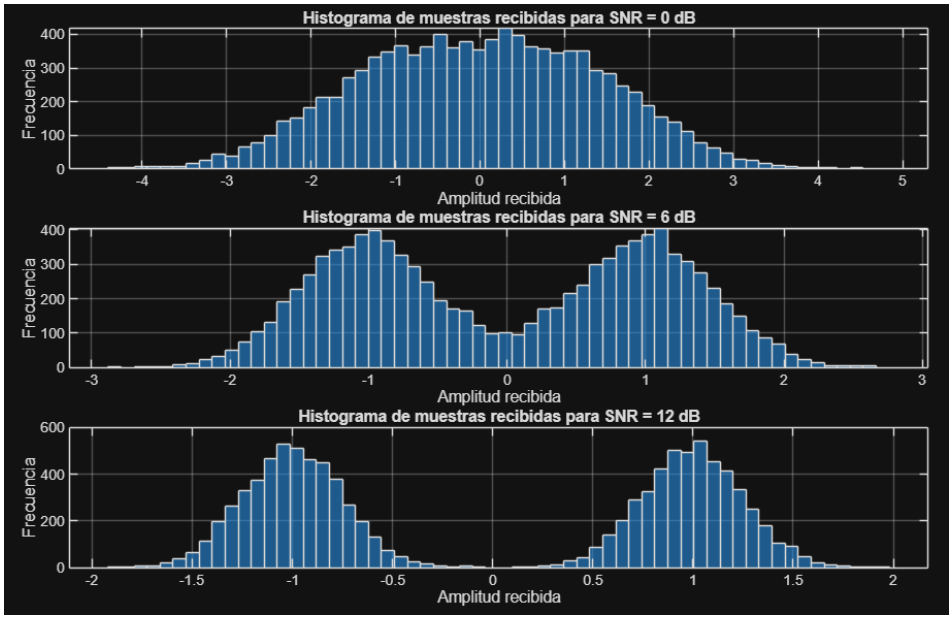

Figura 6-13 Histogramas

Con el objetivo de realizar un análisis más exhaustivo y obtener conclusiones relevantes, se graficaron los histogramas de las constelaciones recibidas para los mismos valores de SNR anteriores. La Figura 6-13 confirma la evolución estudiada en las constelaciones, para la SNR nula, la distribución de las amplitudes es prácticamente gaussiana y está centrada en 0. A medida que la SNR aumenta, van apareciendo lóbulos centrados en torno a los valores ideales, llegando a estar claramente separados y bien definidos para una SNR de 12 dB, indicando que el detector es capaz de distinguir los dos símbolos transmitidos.

6.2.2 COMPARACIÓN ENTRE MODULACIONES BPSK Y QPSK

Bajo las mismas condiciones de canal, esa sección compara el comportamiento de una modulación BPSK con la de una modulación QPSK, evaluando también su rendimiento frente al ruido con sus eficiencias espectrales.

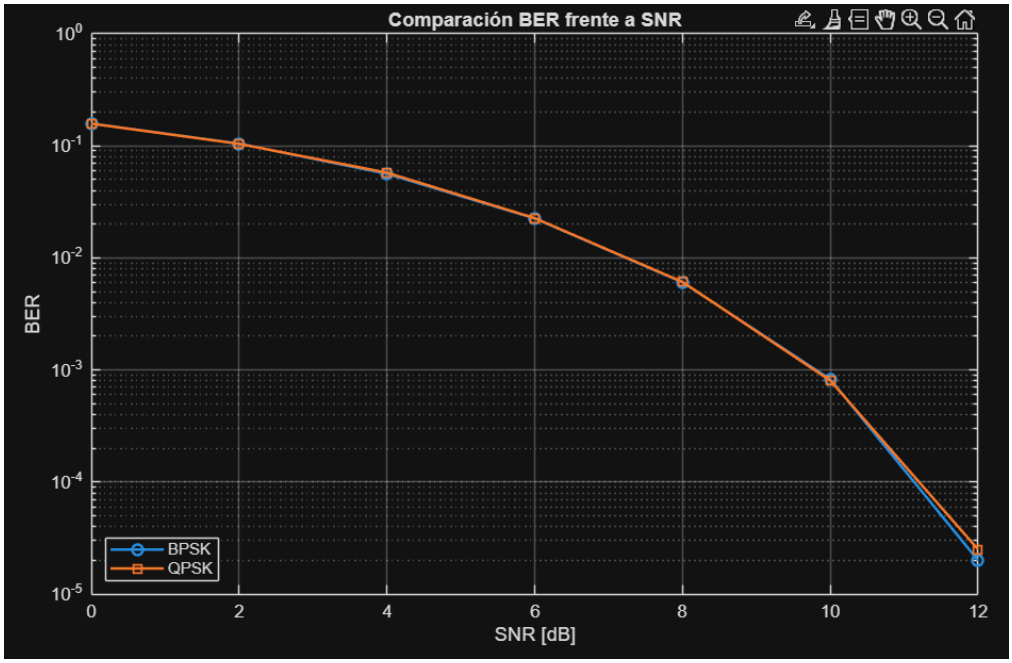

Figura 6-14 Comparación de curvas BER frente a SNR de BPSK y QPSK

Ambas curvas de las dos modulaciones son representadas en la Figura 6-14, donde se observa que son prácticamente idénticas a lo largo de todo el rango de SNR. Ambas modulaciones presentan la misma BER frente a SNR por bit, ya que aunque QPSK transmite 2 bits por símbolo, su distancia entre ellos en la constelación es equivalente cuando la energía se normaliza por bit y por eso mismo, la ganancia de QPSK frente a BPSK está relacionada con sus eficiencias espectrales al transmitir el doble de información por símbolo.

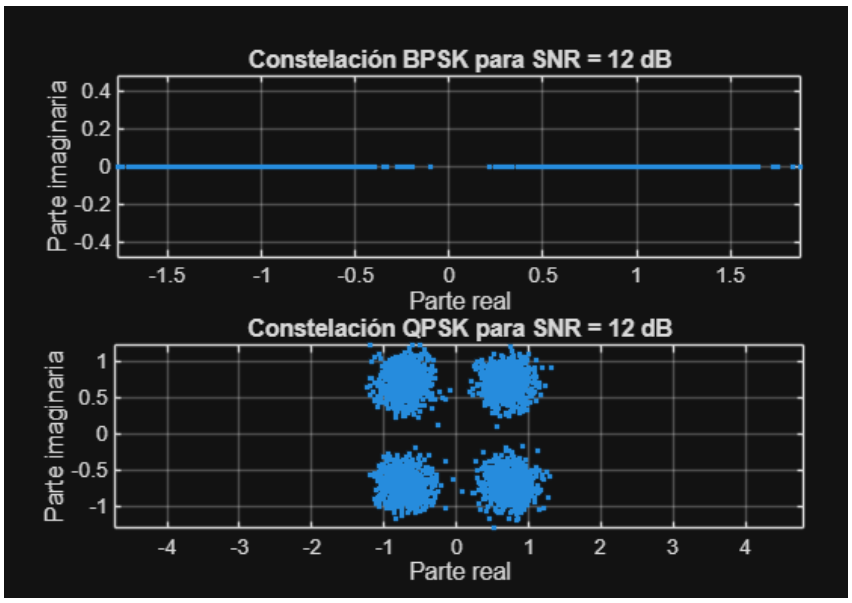

Figura 6-15 Constelaciones BPSK y QPSK

En la Figura 6-15 se muestra cómo la constelación BPSK tiene dos grupos de puntos situados en torno a +1 y -1 con una dispersión pequeña, lo cual confirma la baja tasa de error a 12 dB. Asimismo, muestra la constelación QPSK como cuatro grupos de puntos distribuidos en los cuatro cuadrantes que se corresponden con los cuatro símbolos posibles. Claramente se aprecia cómo están separados y apenas presentan una dispersión, indicando que el receptor puede distinguir entre los cuatro símbolos con alta fiabilidad. Analizando y comparando ambas constelaciones, es evidente cómo la complejidad de QPSK frente a BPSK es mayor.

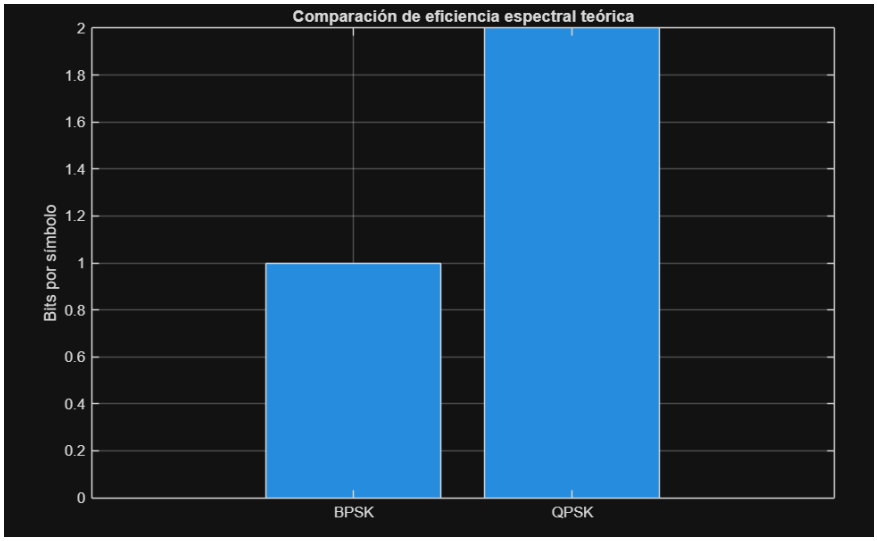

Figura 6-16 Comparación de eficiencia espectral

Como se ha mencionado en anteriores ocasiones, en términos de bits por símbolo, QPSK tiene el doble de eficiencia espectral para el mismo ancho de banda, ya que BPSK transmite 1 bit por símbolo y QPSK 2 bits por símbolo. Sin embargo, este incremento de eficiencia se consigue mediante la reducción de la separación entre los símbolos, lo cual hace que QPSK sea más sensible a las perturbaciones del canal. Por el contrario, BPSK presenta una mayor distancia entre símbolos y una constelación más sencilla, lo cual se traduce en una mayor robustez frente al ruido.

Esta robustez es una de las razones por las que modulaciones sencillas como BPSK siguen utilizándose para sistemas de comunicaciones aeronáuticos, ya que la fiabilidad de la transmisión predomina frente al intento de maximizar la velocidad de transmisión. Por lo tanto, aunque QPSK ofrece una mejor disposición del espectro, BPSK sigue siendo más útil para garantizar simplicidad y robustez.

6.2.3 EFECTO DE INTERFERENCIAS Y OFFSET EN SISTEMAS DIGITALES BPSK

Al igual que se ha realizado un análisis del impacto de distintas perturbaciones en sistemas de comunicación analógicos, también se realizó lo propio sobre un sistema BPSK.

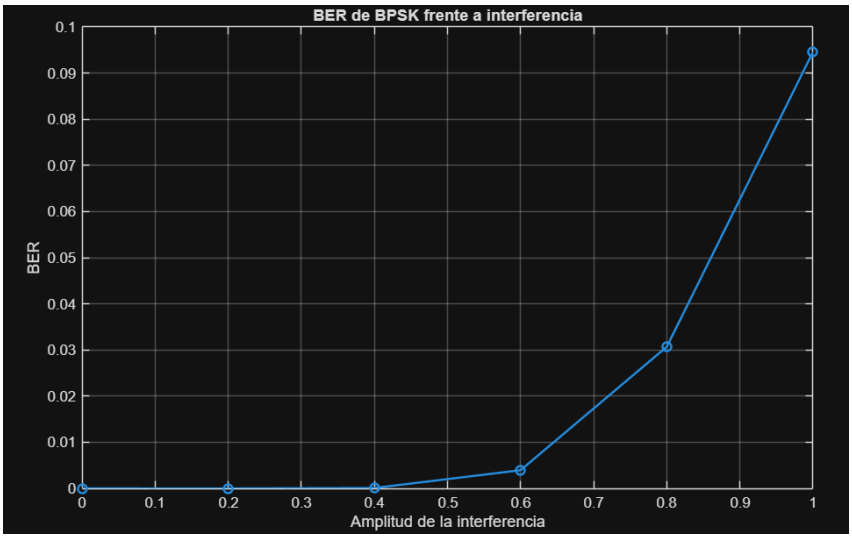

Figura 6-17 BER de BPSK frente a amplitud de interferencia

La Figura 6-17 muestra la relación de la curva BER frente a la amplitud de la interferencia tonal con un valor fijo de SNR en el que, para amplitudes bajas, la BER se mantiene nula, indicando que el sistema BPSK es robusto frente a interferencias de baja amplitud. Sin embargo, a partir de cierto nivel de amplitud, la BER se dispara, confirmando que existe un umbral de amplitud de interferencia a partir del cual el sistema se degrada de forma rápida.

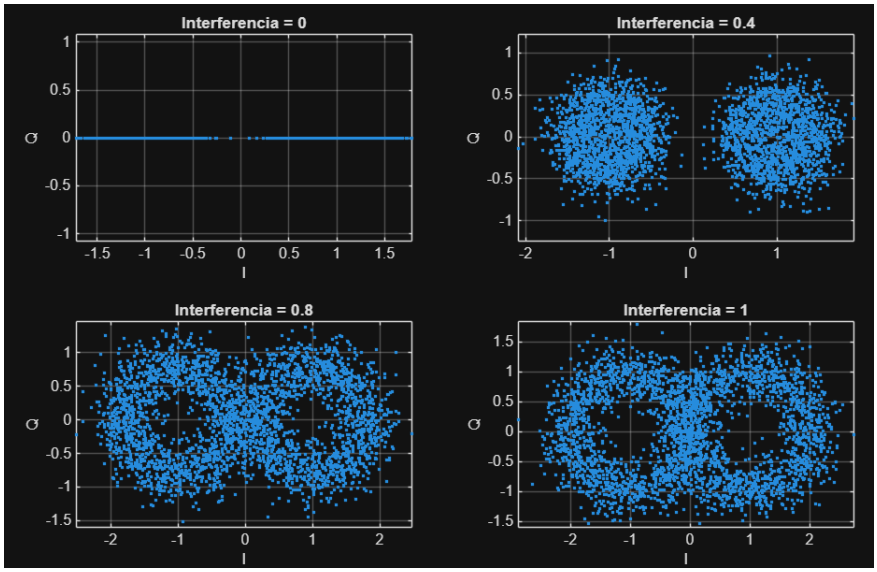

Figura 6-18 Constelación de BPSK para distintas amplitudes

La Figura 6-18 muestra el mismo concepto explicado por la Figura 6-17, pero con constelaciones recibidas para cuatro valores de amplitud de interferencia. Sin interferencia, la constelación presenta dos grupos correctamente definidos en el eje real, ya que se trata de una modulación BPSK. Pero a medida que la interferencia aumenta, los puntos empiezan a dispersarse en el eje imaginario. En el caso de 0,4, los dos grupos siguen siendo distinguibles, pero para valores como 0,8 los puntos quedan distribuidos en una nube prácticamente imposible de separar. En el caso más extremo, la constelación está completamente rota, haciendo muy difícil que el receptor tome la decisión correcta.

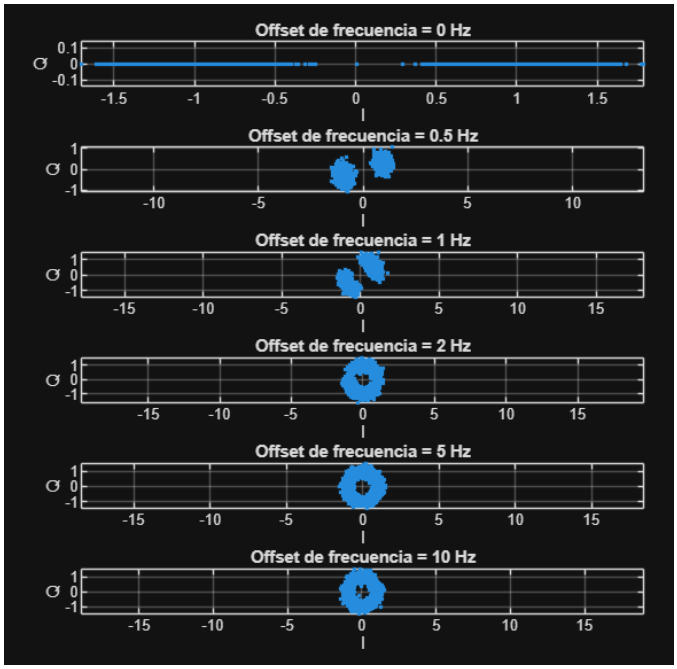

Figura 6-19 Constelación BPSK para distintos valores de offset

Los siguientes resultados obtenidos muestran las constelaciones recibidas para valores de offset y no de interferencia. Como era de esperar, se obtuvo que sin offset la constelación es la ideal, pero al igual que con la interferencia, a medida que el valor de offset aumenta, los puntos comienzan a rotar fuera del eje real, primero formando dos grupos dispersos y finalmente formando un círculo alrededor del origen. Esto se debe a que cuanto mayor es el offset, la rotación de los símbolos es mayor y se desplazan hacia el eje imaginario. La Figura 6-19 ilustra cómo la sincronización de frecuencia es importante en cualquier sistema de comunicaciones digitales en el ámbito de la aviación.

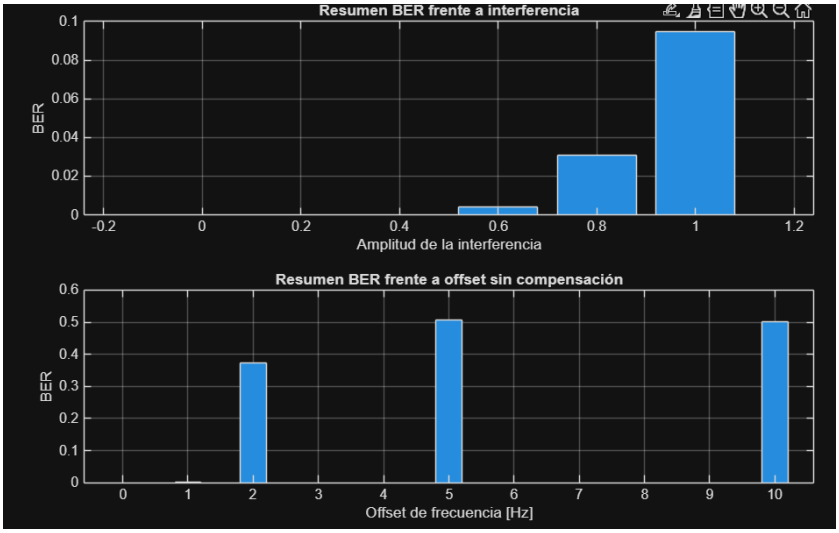

Figura 6-20 Resumen BER frente a offset e interferencia

Para finalizar, se muestra en la Figura 6-20 un resumen del efecto de las perturbaciones estudiadas. Por un lado, la gráfica superior revela que la BER permanece baja hasta amplitudes de 0,6 y se dispara a partir de ese valor. Por otro lado, la gráfica inferior muestra cómo incluso offsets pequeños de 2 Hz producen una BER considerable que aumenta directamente con el offset. De hecho, se observa cómo para valores de offset de 5 y 10 Hz la BER adquiere un valor de 0,5, lo cual indica que, sin compensación en el receptor, este tomaría decisiones prácticamente aleatorias.

6.3 COMPARACIÓN ENTRE SISTEMA ANALÓGICO AM Y DIGITAL BPSK

Con el objetivo de ofrecer un resumen de todo lo analizado, esta sección integra los resultados obtenidos de ambos sistemas para realizar una comparación entre ellos bajo las mismas condiciones, extrayendo así conclusiones relevantes como ventajas y limitaciones de cada sistema.

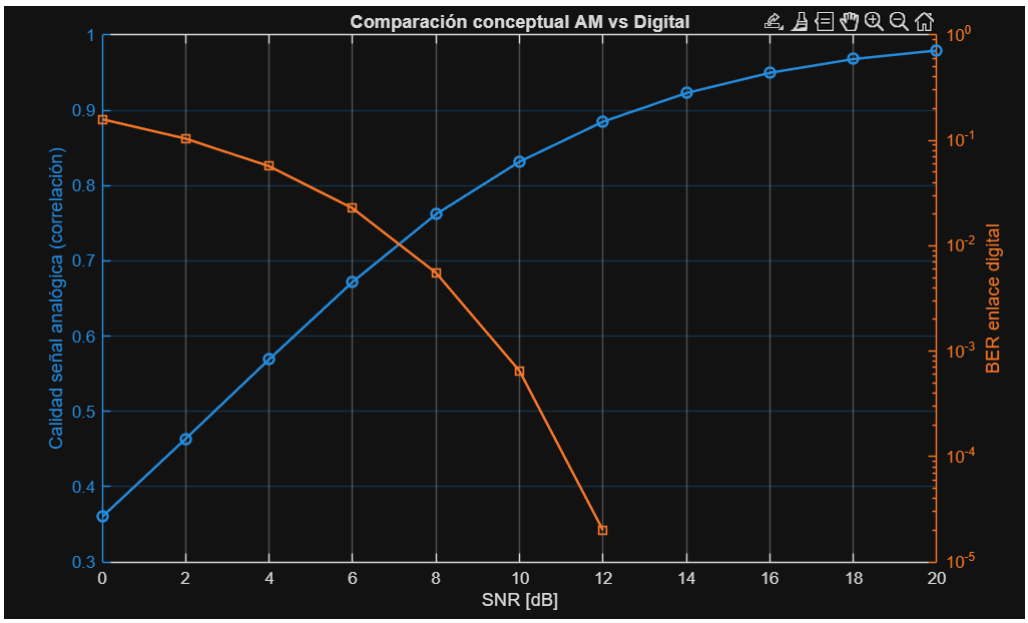

Figura 6-21 Comparación conceptual de AM y BPSK

La Figura 6-21 es una de las gráficas más relevantes de todo el proyecto, mostrando la comparación entre ambos sistemas frente a la SNR. Por un lado, la curva azul representa la calidad de la señal AM medida mediante el coeficiente de autocorrelación. A medida que aumenta la SNR, la calidad de AM mejora de manera continua. Por otro lado, la curva naranja representa la BER del sistema BPSK en escala logarítmica y evoluciona de manera opuesta a la curva de la señal AM, ya que la BER decrece de manera más pronunciada. Esta diferencia entre ambas expone una característica de los sistemas digitales, y es que llegados a un cierto punto, estos sistemas se deterioran rápidamente, pero funcionando con alta fiabilidad por encima de dicho punto, mientras que los sistemas analógicos se degradan de manera continua.

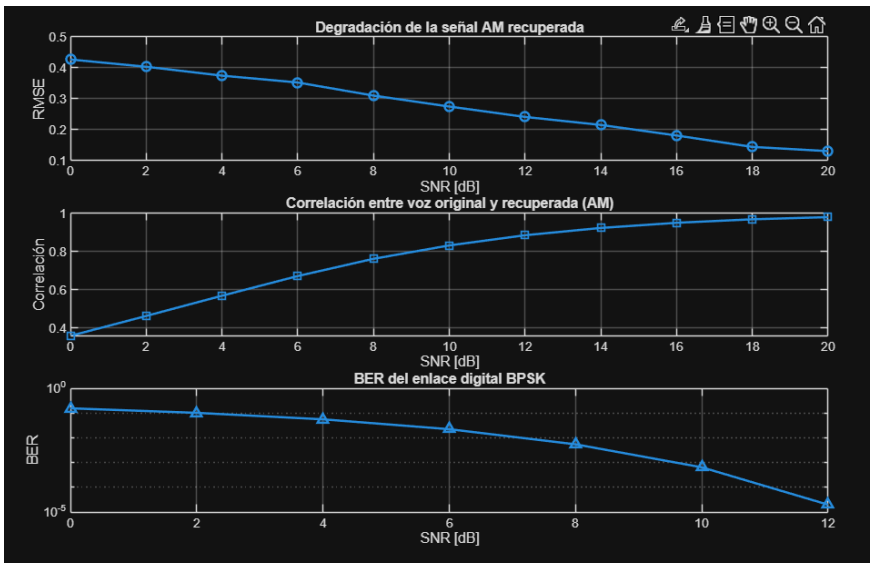

Figura 6-22 Métricas de AM y BPSK

Tomando la Figura 6-22, se observa que las dos primeras gráficas pertenecen a AM, volviéndose a demostrar lo ya explicado sobre cómo la RMSE decrece y la correlación aumenta a medida que la relación señal a ruido aumenta. La gráfica inferior muestra la BER de BPSK, que cae de forma más pronunciada. Analizando las gráficas y tomando un mismo valor de SNR para todas, se comprueba que para SNR elevadas el sistema digital ofrece una calidad de transmisión superior a la del sistema analógico.

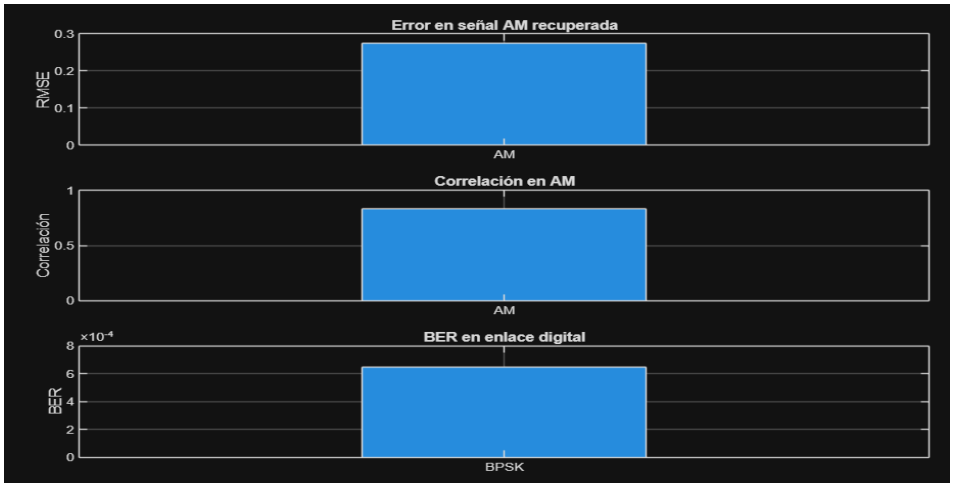

Figura 6-23 Resumen comparativo

Para fortalecer lo expuesto recientemente, la Figura 6-23 sigue exponiendo un resumen comparativo de las métricas para un SNR concreto. No obstante, se debe tener en cuenta que estas métricas no son equivalentes, ya que el RMSE y la correlación miden la calidad de la recuperación de la señal continua de voz mientras que la BER mide la proporción de bits incorrectamente detectados de una transmisión digital. Los resultados obtenidos muestran

que los sistemas digitales ofrecen mayor robustez frente al ruido y una menor degradación que los sistemas analógicos, lo cual justifica la tendencia del sector de la aviación hacia la digitalización de sus comunicaciones.

6.4 TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE TRAMAS BPSK

Esta sección analiza los resultados obtenidos en la validación experimental implementando el dispositivo ADALM Pluto para contrastar el comportamiento real del sistema frente a los resultados obtenidos.

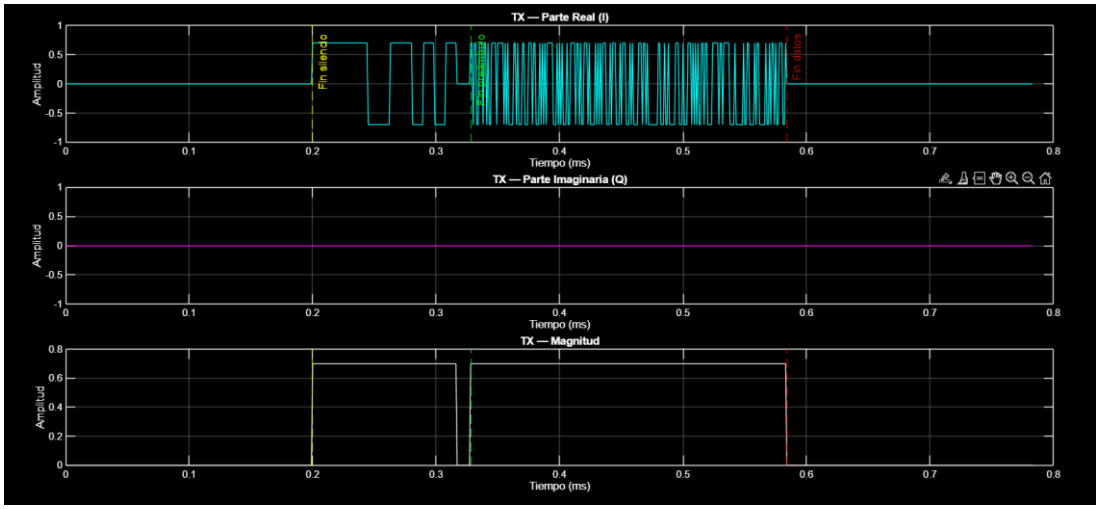

Figura 6-24 Señal transmitida

La Figura 6-24 refleja las componentes, parte real e imaginaria, de la señal transmitida en el dominio temporal. La gráfica superior muestra la parte real de la estructura de la trama completa compuesta por un período de silencio inicial hasta 0,2 ms, seguido del preámbulo de sincronización, es decir, la secuencia de datos modulados en BPSK y un último silencio.

La segunda gráfica muestra la parte imaginaria de la señal, la cual permanece nula a lo largo de toda la trama, ya que se trata de una modulación BPSK, la cual se ha demostrado que es real en la Figura 6-12. La última gráfica refuerza esta estructura, mostrando los bloques de preámbulo y secuencia de datos bien delimitados.

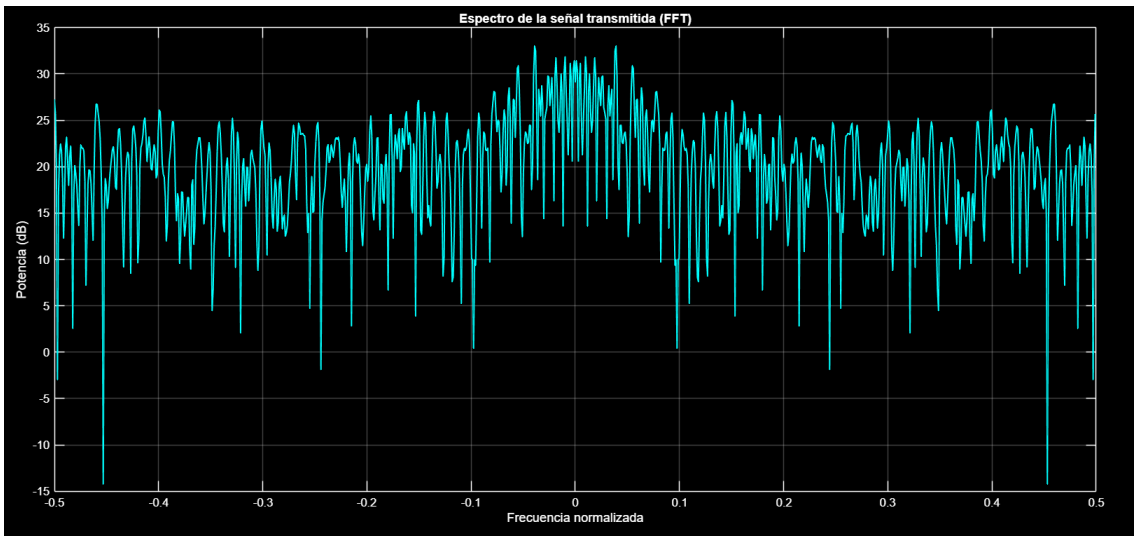

Figura 6-25 Espectro de la señal transmitida

Se observa la distribución de energía del espectro de la señal transmitida en torno a la frecuencia cero, con una potencia que oscila entre 20 y 33 dB. La mayor concentración espectral se sitúa en la banda central, coherente con la estructura de una señal BPSK ya que la energía se distribuye alrededor de la portadora. También se comprueba que no hay presencia de componentes espectrales fuera de banda y sin distorsiones significativas en transmisión.

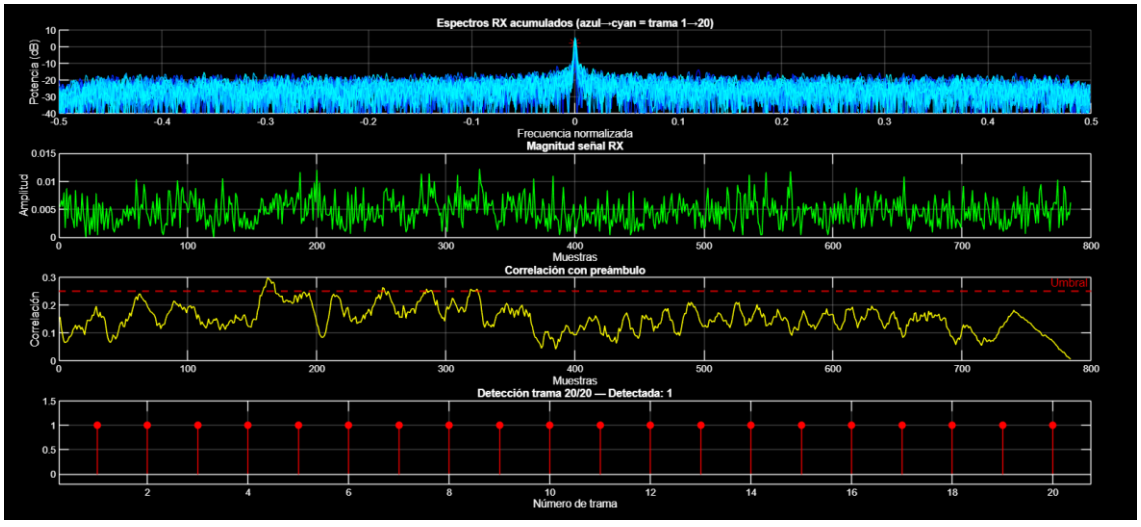

Figura 6-26 Espectros Rx acumulados y detección de tramas

La Figura 6-26 es la imagen más relevante de todo el proyecto, ya que muestra el análisis completo del lado receptor. La primera gráfica muestra los espectros Rx acumulados para las 20 tramas recibidas, quedando el primer espectro representado en cian y el último en azul. Claramente se observa un pico de energía situado en frecuencia cero que destaca por

encima del ruido de fondo, situado a -25 dB, confirmando la correcta recepción. La segunda gráfica indica la magnitud de la señal recibida a lo largo de las muestras capturadas con variaciones de amplitud irregulares, características que son propias de un canal real y de las fluctuaciones introducidas por el hardware. No obstante, la señal tiene una potencia regular a lo largo de la ventana, por lo que no se producen pérdidas durante la transmisión.

La tercera gráfica representa la correlación con el preámbulo, muy relevante porque es el mecanismo central de sincronización del sistema. La función de correlación (amarillo) tiene máximos que se aproximan al umbral de detección (rojo), superándolo en los instantes de inicio de cada trama. Queda demostrado que el umbral está bien establecido porque un valor demasiado bajo generaría falsas tramas mientras que uno alto podría provocar tramas no detectadas.

Finalmente, la última gráfica confirma que las 20 tramas transmitidas han sido detectadas correctamente, obteniendo una tasa del 100%. Cada trama es representada como un impulso en su posición, sin ausencias ni falsas detecciones, validando el diseño del preámbulo y el algoritmo de correlación.

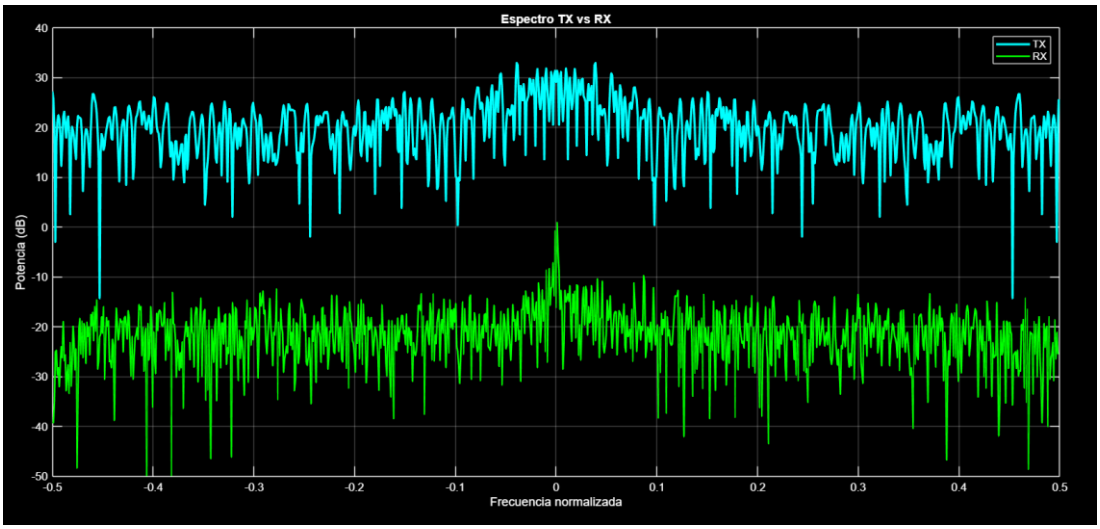

Figura 6-27 Comparación espectral

La Figura 6-27 superpone ambos espectros transmitidos y recibidos y se aprecia una diferencia de potencia de 40 dB debido a las pérdidas producidas por el canal, el cable entre Tx y Rx y la ganancia del receptor, pero mantiene la misma estructura espectral respecto a la señal transmitida. Debido al sistema SDR como es el ADALM Pluto, analizando el espectro Rx, se observa un pico pronunciado en 0 que corresponde a la interferencia o componente continua propia del hardware.

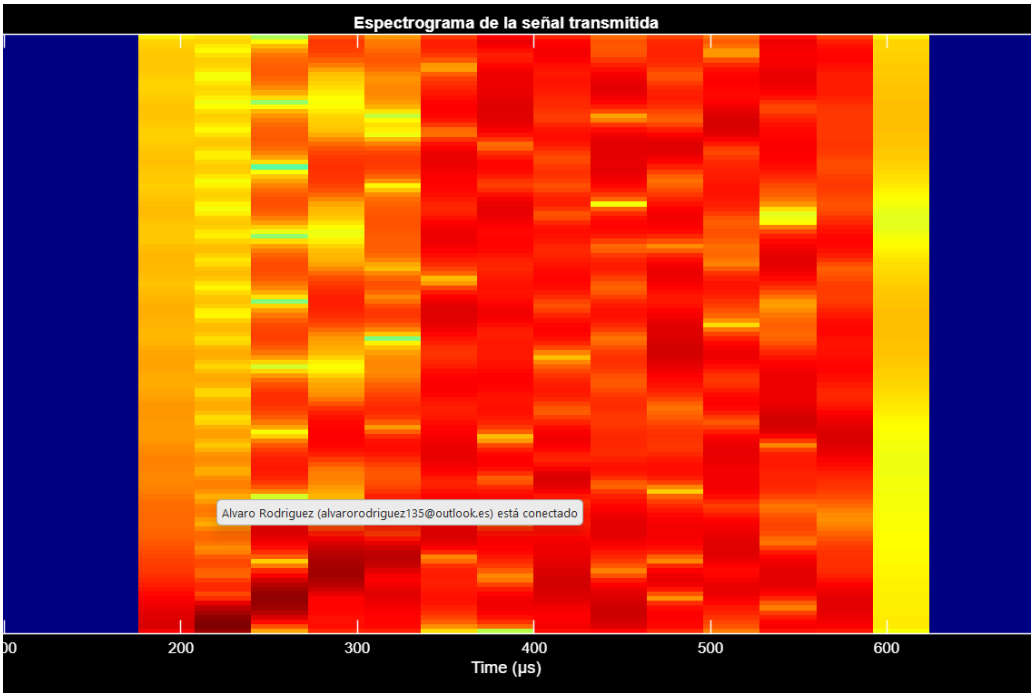

Figura 6-28 Espectrograma de la señal transmitida

El espectrograma es una representación conjunta de tiempo y frecuencia que complementa la validación previa. En la Figura 6-28 se distinguen las tres fases de la trama con los periodos de silencio y el final en azul, el preámbulo con mayor energía en la banda y la zona de datos, que es la que ocupa la mayor parte del tiempo de transmisión y, debido a la aleatoriedad de los datos, su energía queda distribuida de forma no uniforme.

6.5 COMPARACIÓN EXPERIMENTAL DE AM Y BPSK

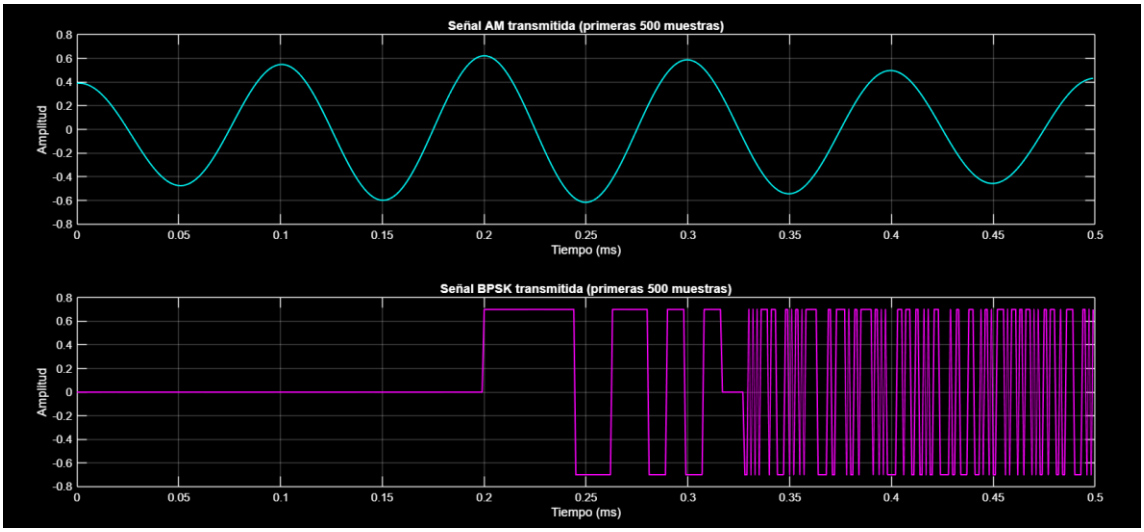

Figura 6-29 Señales transmitidas en el dominio temporal

Se muestran las primeras 500 muestras de ambas señales transmitidas en la Figura 6-29, donde AM tiene una forma sinusoidal con amplitud variable. La señal BPSK tiene la misma estructura que la empleada en el anterior análisis, compuesta por silencio, preámbulo y una secuencia de datos con cambios de fase.

La diferencia entre ambas radica en que AM es una señal continua cuya información se encuentra en la amplitud, mientras que BPSK es una señal discreta estructurada en tramas cuya información se encuentra en la fase.

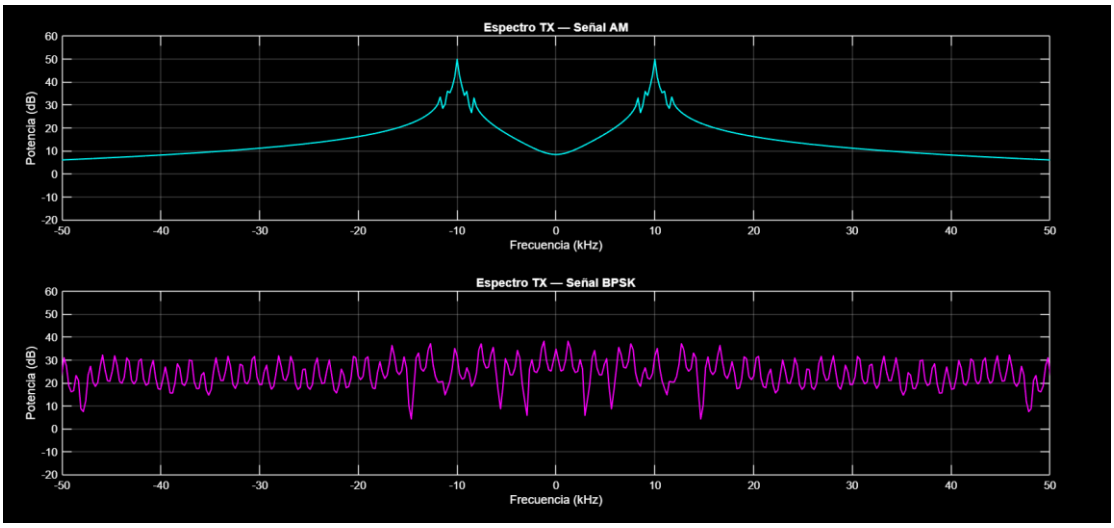

Figura 6-30 Espectros de las señales transmitidas

Se realizó una comparación de ambos espectros para entender su naturaleza. El espectro AM muestra una portadora central situada en 10 kHz y -10 kHz, dos bandas laterales que contienen la información y donde la energía se concentra con una caída fuerte fuera de dicha banda. El espectro de BPSK, en cambio, presenta una distribución de energía plana a lo largo de todo el ancho de banda, lo que refleja la aleatoriedad de los datos y una mayor ocupación espectral.

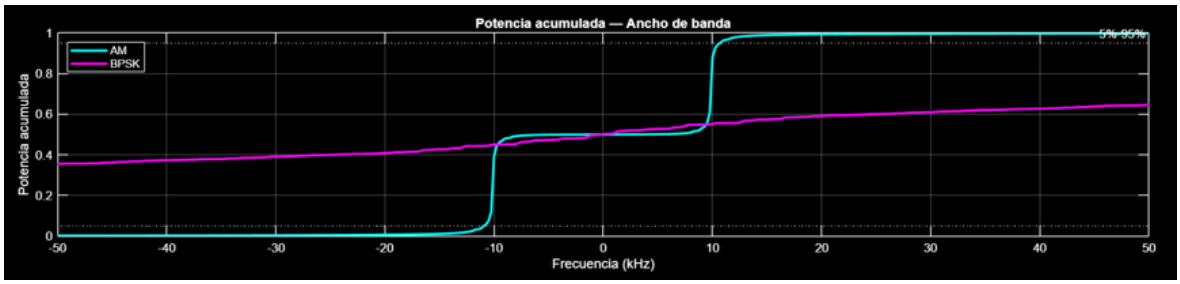

Figura 6-31 Potencia acumulada y ancho de banda

La potencia acumulada queda representada en la Figura 6-31, donde queda expresada en función de la frecuencia. Analizando la gráfica, se observa la transición brusca y concentrada en la banda de la potencia, alcanzando casi su totalidad en una banda estrecha. Al contrario, la curva BPSK crece de manera progresiva y no alcanza el umbral máximo que alcanza el AM dentro de ese rango porque su energía se distribuye de manera más dispersa en frecuencia. Estos resultados son totalmente coherentes respecto a los espectros de la Figura 6-30, reflejando cómo AM ocupa una banda más estrecha que BPSK.

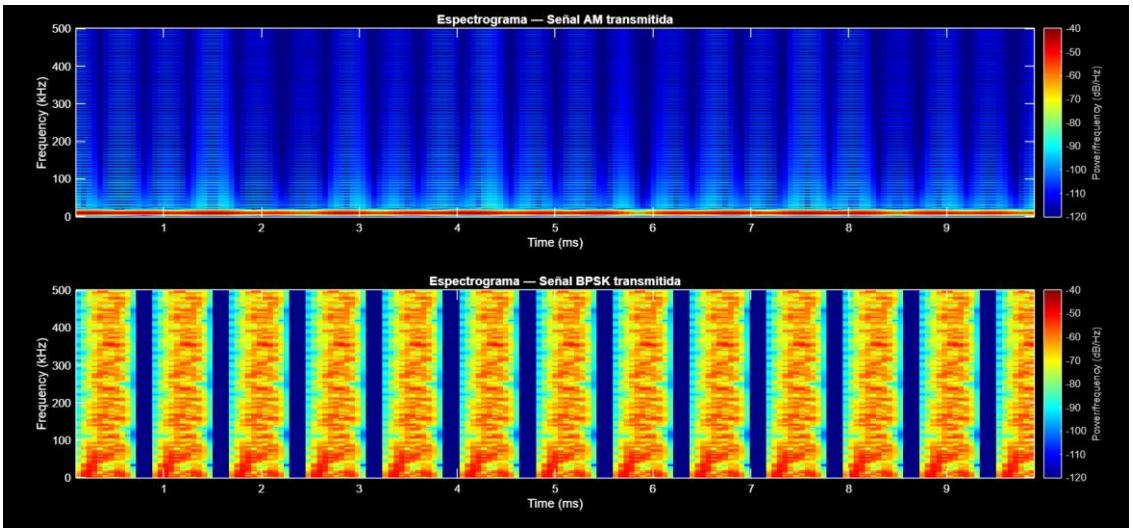

Figura 6-32 Espectrogramas comparativos

La Figura 6-32 ofrece una visión de la evolución del tiempo y de la frecuencia de cada señal transmitida. Por un lado, el espectrograma superior, la señal AM, muestra la energía concentrada en frecuencias bajas con una línea roja y estrecha muy cercana a 0 kHz,

constante a lo largo de todo el eje. Por otro lado, el espectrograma BPSK refleja cómo la energía se distribuye de forma uniforme y con una alternancia entre las zonas activas y los silencios, ya que dicha trama se repite periódicamente a lo largo del tiempo, mostrando así las diferencias entre las modulaciones en cuanto a ocupación espectral.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 CONCLUSIONES

El presente proyecto de sistemas de comunicación de aire-tierra entre aviones comerciales y torres de control aborda el análisis y la comparación de los sistemas empleados desde la simulación en MATLAB y la validación experimental mediante el dispositivo SDR ADALM Pluto. Los objetivos establecidos inicialmente se han ido cumpliendo conforme avanzaba el proyecto, obteniendo resultados coherentes e interesantes para el contexto de las comunicaciones aeronáuticas.

En primer lugar, el análisis realizado de sistemas analógicos ha permitido comprender el verdadero funcionamiento de la modulación frente a las principales perturbaciones que afectan a estas comunicaciones. Los resultados obtenidos, basados en un análisis claro y consistente, han mostrado la capacidad de AM para recuperar la señal de voz para distintos valores de SNR, apoyados en métricas como la correlación entre la señal transmitida y la recibida y el RMSE.

Sin embargo, se han demostrado sus limitaciones frente a interferencias y offset de frecuencia, donde los resultados mostraban cómo las interferencias adyacentes y cocanal perjudicaban a la demodulación por envolvente. Esto, conectado con el mundo real, muestra la implicación que tienen las interferencias en un entorno como la aviación donde las transmisiones coexisten en canales. A su vez, el análisis con offset ha revelado la importancia de una correcta sintonización que deben tener los sistemas de comunicaciones.

Todo ello fundamenta la idea de la necesidad de digitalizar las comunicaciones, con sistemas como ACARS y CPDLC como alternativa para reducir la dependencia de la voz analógica, minimizar errores y descongestionar canales VHF.

En segundo lugar, el análisis de sistemas digitales ha demostrado con datos concluyentes las ventajas que presenta BPSK frente a AM. La comparación entre BPSK y QPSK ha confirmado que, aunque QPSK ofrezca el doble de eficiencia espectral, BPSK resulta ser más robusta frente al ruido, lo que justifica su uso en áreas donde la fiabilidad de la transmisión premia a la eficiencia espectral. Por ende, adquiere sentido el principio sobre el que se sustentan las transmisiones digitales de datos en los aviones donde la fiabilidad no es negociable.

El estudio de sus limitaciones frente a adversidades permite concluir que la interferencia y el offset degradan el sistema, llegando, por ejemplo, a una BER de 0,5 para offsets de 5 Hz sin compensación, lo que se traduce en que el receptor tomaría decisiones aleatorias.

Este análisis obtenido adquiere más importancia aún si se tienen en cuenta sistemas como ADS-B donde las transmisiones operan sin cifrado ni autenticación, donde la interferencia degradaría la capacidad de detección del receptor por completo. Estos resultados refuerzan la preocupación ya documentada anteriormente sobre la vulnerabilidad de ADS-B y refuerzan la idea de incorporar mecanismos de autenticación y detección.

Como resultados a destacar, la comparación directa entre ambos sistemas ha proporcionado una visión más completa de ambos. Se ha demostrado que la caída de la BER es mucho más pronunciada que la mejora de la correlación en AM, reflejando, como ya se ha mencionado anteriormente, la característica de todos los sistemas digitales que, para un umbral de SNR operan con una alta fiabilidad que los sistemas analógicos no solo no alcanzan, sino que degradan. De hecho, en esta idea se basan iniciativas como SESAR en Europa y NextGen en Estados Unidos, cuyo objetivo es sustituir de manera progresiva las comunicaciones analógicas por sistemas digitales.

La gran herramienta del proyecto ha sido el ADALM Pluto, que con validación experimental ha permitido simular un entorno realista de la transmisión y recepción de una comunicación de transmisión digital, así como contrastar los resultados obtenidos en las simulaciones. Por un lado, la transmisión y detección de tramas BPSK han obtenido una tasa del 100% para las 20 tramas transmitidas, validando por completo el diseño del preámbulo basado en la secuencia Barker y el algoritmo de correlación. Por otro lado, la comparación experimental final entre AM y BPSK ha terminado de confirmar las diferencias espectrales observadas en las simulaciones, teniendo AM una ocupación espectral concentrada y BPSK una energía mucho más distribuida y de manera uniforme a lo largo de todo el ancho de banda disponible.

Respecto al ADALM Pluto, se considera que este proyecto ha demostrado que es una herramienta válida para la realización de experimentos de comunicaciones RF de bajo coste, confirmando que es posible verificar los principios de los sistemas aeronáuticos sin necesidad de equipamiento costoso.

En resumen, queda demostrado con una visión técnica y práctica el estado actual de las comunicaciones aeronáuticas, confirmando que los sistemas digitales proporcionan más ventajas claras en cuanto a eficiencia y robustez, pero con nuevas limitaciones como la sincronización y mayor sensibilidad frente a otras perturbaciones. En este contexto, el proyecto facilita el entendimiento de las comunicaciones entre aviones y torres de control que se encuentran en plena transición.

7.2 LIMITACIONES DEL PROYECTO

A pesar del cumplimiento de los objetivos principales del proyecto, durante el propio desarrollo de este se han ido encontrando ciertas limitaciones que han condicionado algunos de los apartados y resultados obtenidos.

Una de las principales limitaciones enfrentadas ha sido la señal relacionada con la recepción de la señal AM mediante el ADALM Pluto. A diferencia de la señal BPSK, cuya detección ha sido demostrada mediante la correlación con el preámbulo, la señal AM es continua y no fue posible encontrar un mecanismo de sincronización, de modo que la relación entre la señal transmitida y recibida quedará comprometida por las características del hardware. Al ser de bajo coste el dispositivo SDR ADALM Pluto, este introduce, como se ha explicado, un componente de continua en la señal recibida, además de fluctuaciones y ruido.

Se intentaron múltiples modificaciones en la ganancia del receptor, pero no fue posible obtener unos resultados consistentes, por lo que dicha figura no ha sido incluida en el análisis de resultados. Sin embargo, la comparación entre ambas modulaciones se realizó mediante los espectros transmitidos, sus potencias acumuladas y espectrogramas, aportando información suficiente como para extraer conclusiones.

Una segunda limitación fue la falta de tiempo que influyó en el uso de la ADALM Pluto, la cual se configuró conectando directamente el puerto de transmisión con el puerto de recepción (loopback). De esta forma, se simplificó el experimento y se obtuvieron resultados más controlados sin los efectos típicos como el desvanecimiento o las variaciones de potencia de una transmisión a distancia, por ello, los resultados experimentales son una validación de los principios de los sistemas de comunicación aeronáutica.

Finalmente, el rango de frecuencias por defecto del ADALM Pluto no comprende la banda VHF, por lo que las pruebas se realizaron a 2,4 GHz. Sin embargo, los principios de modulación y detección expuestos son equivalentes independientemente de la frecuencia portadora.

7.3 TRABAJOS FUTUROS

Con los resultados obtenidos y las limitaciones encontradas, se proponen posibles vías de trabajo para ampliar lo realizado.

Sería de interés implementar mecanismos de compensación de offset de frecuencia en el receptor, ya que los resultados muestran que incluso con pequeños desplazamientos el rendimiento de los sistemas se degrada, por lo que incorporar diferentes técnicas de corrección mejoraría la robustez del sistema.

La experimentación podría extenderse con dos dispositivos ADALM Pluto separados, uno para transmitir y otro para recibir. Esto permitiría evaluar el comportamiento del sistema con resultados más próximos a un enlace avión-torre de control real. Mediante modificaciones de firmware el ADALM Pluto es capaz de operar en la banda VHF, por lo que sería interesante evaluar los resultados directamente en la banda aeronáutica.

Finalmente, teniendo en cuenta que sistemas como VDL Mode 2, que opera sobre CPDLC, utilizan modulaciones 8-PSK, se podría extender el análisis de modulaciones

implementando modulaciones como 8-PSK o QAM y compararlas con BPSK y QPSK bajo las mismas condiciones.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

[1] D.W. Matolak et al., "A Survey of Air-to-Ground Propagation Channel Modeling for Unmanned Aerial Vehicles," IEEE, 2018. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1801.01656

[2] SKYbrary Aviation Safety, "Communication Channel Spacing." [Online]. Available: https://skybrary.aero/articles/communication-channel-spacing

[3] TalkieWaves, "Why Aviation Uses AM Instead of FM: The Technical Story," sep. 2025. [Online]. Available: https://talkiewaves.com/why-aviation-uses-am-instead-fm-technical/

[4] Pilot Institute, "ACARS Explained: How It Keeps Aircraft Connected," jul. 2025. [Online]. Available: https://pilotinstitute.com/acars-explained/

[5] C. Finke et al., "Secure Authentication of ADS-B Aircraft Communications using Retroactive Key Publication," arXiv, 2019. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1907.04909

[6] EUROCONTROL, "Satellite Communications Datalink (SATCOM)." [Online]. Available: https://www.eurocontrol.int/system/satellite-communications-datalink

[7] SKYbrary Aviation Safety, "SATCOM." [Online]. Available: https://skybrary.aero/articles/satcom

[8] F. Bhatti et al., "Software-defined Radios: Architecture, State-of-the-art, and Challenges," arXiv, 2018. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1804.06564

[9] Analog Devices, "ADALM-PLUTO Evaluation Board." [Online]. Available: https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm-pluto.html

[10] Analog Devices Wiki, "ADALM-PLUTO Detailed Specifications." [Online]. Available: https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/devs/specs

[11] MathWorks, "Communications Toolbox — MATLAB." [Online]. Available: https://www.mathworks.com/products/communications.html

[12] SKYbrary, "Controller Pilot Data Link Communications (CPDLC)." [Online]. Available: https://skybrary.aero/articles/controller-pilot-data-link-communications-cpdlc

[13] EUROCONTROL, "Controller-pilot datalink communications (CPDLC) — recommended practices." [Online]. Available: https://www.eurocontrol.int/publication/controller-pilot-datalink-communications-cpdlc-recommended-practices

[14] X. Ying et al., "Detecting ADS-B Spoofing Attacks using Deep Neural Networks," arXiv, 2019. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1904.09969

[15] M. Al-Nabhani et al., "Frame Synchronization in Digital Communication Systems," *Quest Journals*, vol. 3, 2015. [Online]. Available: https://www.questjournals.org/jses/papers/Vol3-issue-6/B360611.pdf

ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS

El presente proyecto, centrado en el análisis y comparación de sistemas de comunicación aire-tierra entre aviones comerciales y torres de control, presenta una alineación directa con los siguientes objetivos.

El número 9 expone: “Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación”.

Las estructuras aeronáuticas son esenciales para garantizar la seguridad del tráfico aéreo y su modernización requiere investigación técnica. Este proyecto contribuye a dicha idea analizando sistemas de comunicación mediante simulación y experimentación con hardware SDR, demostrando que es posible investigar principios de comunicaciones.

El número 11 expone: “Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles”.

El transporte aéreo es el medio de transporte que más pasajeros mueve, no solo por viaje sino al año, y su seguridad depende de la fiabilidad de las comunicaciones entre pilotos y controladores aéreos. El proyecto estudia el comportamiento de los sistemas frente al ruido, las interferencias y el offset de frecuencia, identificando sus limitaciones y aportando información para desarrollar comunicaciones más seguras y resilientes.

El número 16 expone: “Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar el acceso a la justicia para todos y construir instituciones eficaces e inclusivas que rindan cuentas”.

La tendencia a digitalizar las comunicaciones ha introducido nuevas vulnerabilidades críticas. Se ha analizado dichas vulnerabilidades, dejando en evidencia las vulnerabilidades como ADS-B frente a ataques y contribuye a la idea de desarrollar mecanismos de seguridad que protejan dichas estructuras.

ANEXO II

8.2 SCRIPT 01- IMPLEMENTACIÓN BÁSICA DE SISTEMA DE COMUNICACIONES AM

```
fs = 48000;                % Frecuencia de muestreo [Hz]
T = 3;                     % Duración total [s]
t = (0:1/fs:T-1/fs)';      % Vector temporal

fc = 10000;                % Portadora IF simulada [Hz]
mu = 0.8;                  % Índice de modulación AM
snr_dB = 20;               % Relación señal/ruido del canal [dB]


% Se crea una señal compuesta por varias frecuencias típicas de voz
voz = 0.6*sin(2*pi*300*t) + 0.3*sin(2*pi*800*t) + 0.2*sin(2*pi*1500*t);

% Normalización
voz = voz / max(abs(voz));

portadora = cos(2*pi*fc*t);

% AM con portadora
tx = (1 + mu*voz).*portadora;

rx = awgn(tx, snr_dB, 'measured');
env = abs(hilbert(rx));
env = env - mean(env);
env = env / max(abs(env));


rmse = sqrt(mean((voz - env).^2));
% Coeficiente de correlación entre señal original y recuperada
R = corrcoef(voz, env);
corr_val = R(1,2);
```

8.3 SCRIPT 02 – ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL RUIDO SOBRE SEÑALES AM

```
fs = 48000;                % Frecuencia de muestreo [Hz]
T = 2;                     % Duración [s]
t = (0:1/fs:T-1/fs)';      % Vector temporal

fc = 10000;                % Portadora IF simulada [Hz]
mu = 0.8;                  % Índice de modulación

snr_vec = 0:2:30;
```

```
voz = 0.6*sin(2*pi*300*t) + 0.3*sin(2*pi*1000*t) + 0.2*sin(2*pi*2200*t);
voz = voz / max(abs(voz));
portadora = cos(2*pi*fc*t);
tx = (1 + mu*voz).*portadora;


rmse_vec = zeros(size(snr_vec));
corr_vec = zeros(size(snr_vec));

snr_show = [0 10 20 30];
env_examples = cell(size(snr_show));

for k = 1:length(snr_vec)

    % Canal AWGN
    rx = awgn(tx, snr_vec(k), 'measured');

    % Demodulación por envolvente
    env = abs(hilbert(rx));
    env = env - mean(env);
    env = env / max(abs(env));

    % Métrica RMSE
    rmse_vec(k) = sqrt(mean((voz - env).^2));

    % Métrica de correlación
    R = corrcoef(voz, env);
    corr_vec(k) = R(1,2);

    % Guardar ejemplos para ciertas SNR
    idx_show = find(snr_show == snr_vec(k));
    if ~isempty(idx_show)
        env_examples{idx_show} = env;
    end
end
```

8.4 SCRIPT 03 – ANÁLISIS DE INTERFERENCIAS ADYACENTES Y COCANAL EN AM

```
fs = 100e3;                % Frecuencia de muestreo [Hz]
T = 0.2;                   % Duración [s]
t = (0:1/fs:T-1/fs)';      % Vector temporal

fc1 = 15e3;                % Portadora señal deseada [Hz]
mu1 = 0.8;                 % Índice de modulación señal deseada

fc2 = 18e3;                % Portadora interferente adyacente [Hz]
mu2 = 0.7;                 % Índice de modulación interferente

A_des = 1.0;               % Amplitud señal deseada
```

```
A_adj = 0.6;                % Amplitud interferente adyacente
A_co  = 0.5;                % Amplitud interferente cocanal

snr_dB = 25;                % SNR de ruido adicional

m_des = 0.6*sin(2*pi*300*t) + 0.3*sin(2*pi*900*t) + 0.2*sin(2*pi*1500*t);
m_adj = 0.5*sin(2*pi*500*t) + 0.3*sin(2*pi*1200*t);
m_des = m_des / max(abs(m_des));
m_adj = m_adj / max(abs(m_adj));

s_des = A_des*(1 + mu1*m_des).*cos(2*pi*fc1*t); % señal deseada

s_adj = A_adj*(1 + mu2*m_adj).*cos(2*pi*fc2*t); % señal interferente

s_co = A_co*(1 + mu2*m_adj).*cos(2*pi*fc1*t); % interferencia cocanal

% Caso limpio
rx_clean = awgn(s_des, snr_dB, 'measured');

% Caso con interferencia adyacente
rx_adj = awgn(s_des + s_adj, snr_dB, 'measured');

% Caso con interferencia cocanal
rx_co = awgn(s_des + s_co, snr_dB, 'measured');

% Demodulación por envolvente
env_clean = abs(hilbert(rx_clean));
env_adj   = abs(hilbert(rx_adj));
env_co    = abs(hilbert(rx_co));

% Eliminación DC y normalización
env_clean = env_clean - mean(env_clean);
env_adj   = env_adj   - mean(env_adj);
env_co    = env_co    - mean(env_co);

env_clean = env_clean / max(abs(env_clean));
env_adj   = env_adj   / max(abs(env_adj));
env_co    = env_co    / max(abs(env_co));

% métricas
rmse_clean = sqrt(mean((m_des - env_clean).^2));
rmse_adj   = sqrt(mean((m_des - env_adj).^2));
rmse_co    = sqrt(mean((m_des - env_co).^2));

R1 = corrcoef(m_des, env_clean); corr_clean = R1(1,2);
R2 = corrcoef(m_des, env_adj);   corr_adj   = R2(1,2);
R3 = corrcoef(m_des, env_co);    corr_co    = R3(1,2);
```

8.5 SCRIPT 04 – ESTUDIO DEL EFECTO DEL OFFSET EN AM

```
fs = 100e3;                  % Frecuencia de muestreo [Hz]
T = 0.2;                     % Duración [s]
t = (0:1/fs:T-1/fs)';        % Vector temporal

fc = 15e3;                   % Portadora IF simulada [Hz]
mu = 0.8;                    % Índice de modulación
snr_dB = 25;                 % Relación señal/ruido del canal

% Offsets de frecuencia a estudiar [Hz]
offset_vec = [0 50 200 500 1000];

m = 0.6*sin(2*pi*300*t) + 0.3*sin(2*pi*900*t) + 0.2*sin(2*pi*1500*t);
m = m / max(abs(m));

tx = (1 + mu*m).*cos(2*pi*fc*t); % Modulación AM

% Métricas
rmse_vec = zeros(size(offset_vec));
corr_vec = zeros(size(offset_vec));
env_examples = cell(size(offset_vec));

% Bucle de offset
for k = 1:length(offset_vec)

    df = offset_vec(k);

    % Señal recibida con offset de frecuencia
    rx = (1 + mu*m).*cos(2*pi*(fc + df)*t);

    % Añadir ruido
    rx = awgn(rx, snr_dB, 'measured');

    % Demodulación por envolvente
    env = abs(hilbert(rx));
    env = env - mean(env);
    env = env / max(abs(env));

    env_examples{k} = env;

    % Métricas
    rmse_vec(k) = sqrt(mean((m - env).^2));
    R = corrcoef(m, env);
    corr_vec(k) = R(1,2);
end
```

8.6 SCRIPT 05 – MODULACIÓN BPSK

```
Nbits = 2e5;                    % Número de bits a transmitir
snr_dB = 0:2:20;                % Rango de SNR a estudiar [dB]

ber_sim = zeros(size(snr_dB));    % BER simulada
ber_teo = zeros(size(snr_dB));    % BER teórica

bits_tx = randi([0 1], Nbits, 1); % Bits generados

% Mapeo: 0 = -1, 1 = +1
symbols_tx = 2*bits_tx - 1;

% Bucle de SNR
for k = 1:length(snr_dB)

    % Canal AWGN
    rx = awgn(symbols_tx, snr_dB(k), 'measured');

    % Demodulación BPSK
    bits_rx = rx > 0;

    % BER simulada
    ber_sim(k) = mean(bits_tx ~= bits_rx);

    % BER teórica para BPSK en AWGN
    EbN0_lin = 10^(snr_dB(k)/10);
    ber_teo(k) = 0.5*erfc(sqrt(EbN0_lin));
end
```

8.7 SCRIPT 06 – COMPARACIÓN BPSK Y QPSK

```
Nbits = 2e5;                    % Número total de bits
snr_dB = 0:2:20;                % Rango de SNR a estudiar [dB]

ber_bpsk = zeros(size(snr_dB));
ber_qpsk = zeros(size(snr_dB));

bits_tx = randi([0 1], Nbits, 1);


for k = 1:length(snr_dB)

    %% ===== BPSK =====
    bits_bpsk = bits_tx;
    sym_bpsk = 2*bits_bpsk - 1;           % 0 = -1, 1 = +1
    rx_bpsk = awgn(sym_bpsk, snr_dB(k), 'measured');
    bits_rx_bpsk = rx_bpsk > 0;
```

```
    ber_bpsk(k) = mean(bits_bpsk ~= bits_rx_bpsk);


    % QPSK. Agrupar bits de dos en dos
    bits_qpsk = bits_tx(1:2*floor(length(bits_tx)/2));
    bits_reshape = reshape(bits_qpsk, 2, []).';

    % Mapeo Gray manual
    % 00 = (1 + 1j)/sqrt(2)
    % 01 = (-1 + 1j)/sqrt(2)
    % 11 = (-1 - 1j)/sqrt(2)
    % 10 = (1 - 1j)/sqrt(2)
    sym_qpsk = zeros(size(bits_reshape,1),1);

    for n = 1:size(bits_reshape,1)
        b1 = bits_reshape(n,1);
        b2 = bits_reshape(n,2);

        if b1==0 && b2==0
            sym_qpsk(n) = (1 + 1j)/sqrt(2);
        elseif b1==0 && b2==1
            sym_qpsk(n) = (-1 + 1j)/sqrt(2);
        elseif b1==1 && b2==1
            sym_qpsk(n) = (-1 - 1j)/sqrt(2);
        else % b1==1 && b2==0
            sym_qpsk(n) = (1 - 1j)/sqrt(2);
        end
    end

    % Canal AWGN
    rx_qpsk = awgn(sym_qpsk, snr_dB(k), 'measured');

    % Demodulación por decisión en cuadrantes
    bits_rx_qpsk = zeros(size(bits_reshape));

    for n = 1:length(rx_qpsk)
        I = real(rx_qpsk(n));
        Q = imag(rx_qpsk(n));

        if I >= 0 && Q >= 0
            bits_rx_qpsk(n,:) = [0 0];
        elseif I < 0 && Q >= 0
            bits_rx_qpsk(n,:) = [0 1];
        elseif I < 0 && Q < 0
            bits_rx_qpsk(n,:) = [1 1];
        else
            bits_rx_qpsk(n,:) = [1 0];
        end
    end

    bits_rx_qpsk = reshape(bits_rx_qpsk.', [], 1);
    ber_qpsk(k) = mean(bits_qpsk ~= bits_rx_qpsk);
end
```

8.8 SCRIPT 07 – ESTUDIO DE INTERFERENCIAS Y OFFSET EN BPSK

```
Nbits = 2e5;                            % Número de bits para análisis BER con
interferencia
snr_dB = 12;                            % SNR fija [dB]
interf_levels = [0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0];    % amplitud interferente

fs = 10000;                             % frecuencia de muestreo [Hz]
Ts = 1/fs;
t = (0:Nbits-1)'*Ts;


bits_tx = randi([0 1], Nbits, 1); % Bits generados

% Mapeo BPSK complejo:
% bit 0 = +1
% bit 1 = -1
symbols = 1 - 2*bits_tx;


ber_interf = zeros(size(interf_levels)); % BER frente a interferencia

for k = 1:length(interf_levels)

    A = interf_levels(k);

    % Interferencia tonal compleja
    interf = A * exp(1j*2*pi*1500*t);

    % Señal recibida
    rx = symbols + interf;
    rx = awgn(rx, snr_dB, 'measured');

    % Detección coherente simple para BPSK
    bits_rx = real(rx) < 0;

    ber_interf(k) = mean(bits_rx ~= bits_tx);
end

% Offset de frecuencia
Noff = 2000;
t_off = (0:Noff-1)'/fs;
sym_off = symbols(1:Noff);
bits_off = bits_tx(1:Noff);

freq_offsets = [0 0.5 1 2 5 10];   % offsets más pequeños y realistas para
visualización

% BER frente a offset sin compensación
ber_offset_no_comp = zeros(size(freq_offsets));

for k = 1:length(freq_offsets)
```

```
    df = freq_offsets(k);

    rx = sym_off .* exp(1j*2*pi*df*t_off);
    rx = awgn(rx, snr_dB, 'measured');

    % Detector simple SIN compensación
    bits_rx = real(rx) < 0;

    ber_offset_no_comp(k) = mean(bits_rx ~= bits_off);
end
```

8.9 SCRIPT 08 – COMPARACIÓN ENTRE AM Y BPSK

```
fs = 48000;                     % Frecuencia de muestreo para AM
T = 2;                          % Duración [s]
t = (0:1/fs:T-1/fs)';

fc = 10000;                     % Portadora IF simulada para AM [Hz]
mu = 0.8;                       % Índice de modulación AM

snr_vec = 0:2:20;               % Rango de SNR [dB]


voz = 0.6*sin(2*pi*300*t) + 0.3*sin(2*pi*1000*t) + 0.2*sin(2*pi*2200*t);

voz = voz / max(abs(voz));

% Modulación AM
tx_am = (1 + mu*voz).*cos(2*pi*fc*t);

rmse_am = zeros(size(snr_vec));
corr_am = zeros(size(snr_vec));

% BPSK
Nbits = 2e5;
bits_tx = randi([0 1], Nbits, 1);

% BPSK real
sym_bpsk = 2*bits_tx - 1;

ber_bpsk = zeros(size(snr_vec));

% Bucle de comparación
for k = 1:length(snr_vec)

    % AM
    rx_am = awgn(tx_am, snr_vec(k), 'measured');

    env = abs(hilbert(rx_am));
```

```
    env = env - mean(env);
    env = env / max(abs(env));

    rmse_am(k) = sqrt(mean((voz - env).^2));
    R = corrcoef(voz, env);
    corr_am(k) = R(1,2);

    % BPSK
    rx_bpsk = awgn(sym_bpsk, snr_vec(k), 'measured');
    bits_rx = rx_bpsk > 0;
    ber_bpsk(k) = mean(bits_tx ~= bits_rx);
end
```

8.10 SCRIPT 09 – IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL DE TRAMAS BPSK MEDIANTE ADALM PLUTO

```
% PARÁMETROS
fs          = 1e6;
fc          = 2.4e9;
ganTx       = 0;
ganRx       = 30;
numTramas   = 20;
nFFT        = 1024;

nSilencio   = 200;
nPreamb     = 128;
nDatos      = 256;

%% PREÁMBULO
barker13 = [1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 1];
upsample_factor = floor(nPreamb / length(barker13));
preambulo = repelem(barker13, upsample_factor);
preambulo = [preambulo, zeros(1, nPreamb - length(preambulo))];
preambulo = preambulo(:) / max(abs(preambulo));

%% DATOS BPSK
bits = randi([0 1], 1, nDatos);
datos_bpsk = (2*bits - 1);
datos_bpsk = datos_bpsk(:) / max(abs(datos_bpsk));

%% TRAMA
silencio = zeros(nSilencio, 1);
trama = [silencio; preambulo(:); datos_bpsk(:); silencio];
trama = trama / max(abs(trama)) * 0.7;
trama_compleja = complex(trama);
nTrama = length(trama);

%% CONFIGURACIÓN PLUTO
```

```
tx = comm.SDRTxPluto;
tx.CenterFrequency    = fc;
tx.BasebandSampleRate = fs;
tx.Gain               = ganTx;

rx = comm.SDRRxPluto;
rx.CenterFrequency    = fc;
rx.BasebandSampleRate = fs;
rx.GainSource         = 'Manual';
rx.Gain               = ganRx;
rx.SamplesPerFrame    = nTrama;
rx.OutputDataType     = 'double';

%% BUCLE PRINCIPAL
for k = 1:numTramas

    tx(trama_compleja);
    rxSig = double(rx());

       % Correlación con preámbulo
    corr_out  = abs(xcorr(rxSig, preambulo(:)));
    corr_out  = corr_out(end-length(rxSig)+1:end);
    umbral    = mean(corr_out) + 2*std(corr_out);
    detectada = max(corr_out) > umbral;
    detecciones(k) = detectada;
end

release(tx);
release(rx);
```

8.11 SCRIPT 10 – COMPARACIÓN EXPERIMENTAL ENTRE AM Y BPSK CON SDR

```
%% PARÁMETROS
fs        = 1e6;
fc        = 2.4e9;
ganTx     = 0;
ganRx     = 71;
nFFT      = 4096;
nMuestras = 10000;

nSilencio = 200;
nPreamb   = 128;
nDatos    = 256;

%% PREÁMBULO (Barker 13)
barker13 = [1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 1];
upsample_factor = floor(nPreamb / length(barker13));
preambulo = repelem(barker13, upsample_factor);
```

```
preambulo = [preambulo, zeros(1, nPreamb - length(preambulo))];
preambulo = preambulo(:) / max(abs(preambulo));

%% SEÑAL AM
t_am  = (0:nMuestras-1)/fs;
f_voz = [300, 800, 1500];
audio = zeros(1, nMuestras);
for f = f_voz
    audio = audio + sin(2*pi*f*t_am);
end
audio = audio / max(abs(audio));
m  = 0.8;
f_portadora_am = 10000;
portadora = cos(2*pi*f_portadora_am*t_am);
senal_am  = (1 + m*audio) .* portadora;
senal_am  = senal_am / max(abs(senal_am)) * 0.7;
senal_am_compleja = complex(senal_am(:));

%% SEÑAL BPSK (trama repetida para llenar nMuestras)
bits       = randi([0 1], 1, nDatos);
datos_bpsk = (2*bits - 1);
silencio   = zeros(nSilencio, 1);
trama_base = [silencio; preambulo(:); datos_bpsk(:); silencio];
trama_base = trama_base / max(abs(trama_base)) * 0.7;

nRepeticiones = ceil(nMuestras / length(trama_base));
trama_repetida = repmat(trama_base, nRepeticiones, 1);
trama_bpsk = trama_repetida(1:nMuestras);
trama_bpsk_compleja = complex(trama_bpsk);

%% CONFIGURACIÓN PLUTO
tx = comm.SDRTxPluto;
tx.CenterFrequency    = fc;
tx.BasebandSampleRate = fs;
tx.Gain               = ganTx;

rx = comm.SDRRxPluto;
rx.CenterFrequency    = fc;
rx.BasebandSampleRate = fs;
rx.GainSource         = 'Manual';
rx.Gain               = ganRx;
rx.SamplesPerFrame    = nMuestras;
rx.OutputDataType     = 'double';

%% TRANSMITIR Y RECIBIR

for k = 1:15
    tx(senal_am_compleja);
end
pause(1.0);


dummy1 = double(rx());
```

```
dummy2 = double(rx());
pause(0.3);

tx(senal_am_compleja);
rxAM = double(rx());
pause(0.5);

%% TRANSMITIR Y RECIBIR BPSK
tx(trama_bpsk_compleja);
rxBPSK = double(rx());

release(tx);
release(rx);
```