

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Análisis mediante simulación de la comunicación entre dos puntos terrestres a través de satélite con el estándar DVB-S2

Autor: Alberto Pascual Pedrero

Tutor: Francisco Javier Escribano Aparicio

2024

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE
TELECOMUNICACIÓN

Análisis mediante simulación de la comunicación entre dos puntos terrestres a través de satélite con el estándar DVB-S2

Trabajo Fin de Grado

Autor: Alberto Pascual Pedrero

Tutor: Francisco Javier Escribano Aparicio

Tribunal:

Presidente: Donato Rodríguez Alonso

Vocal 1º: Judith Redoli Granados

Vocal 2º: Francisco Javier Escribano Aparicio

Resumen

En las comunicaciones satelitales, es muy importante realizar una buena elección de la modulación, la codificación o la frecuencia de la señal, entre otros parámetros, para garantizar una comunicación confiable y eficiente. En este trabajo se pretende, mediante simulaciones, poder observar como varía la calidad de la comunicación dependiendo de diversos parámetros, así como el comportamiento ante distorsiones de la señal y la utilización de estrategias para compensarlas.

Abstract

In satellite communications, it is crucial to make a good choice of modulation, encoding or signal frequency, among other factors, to ensure reliable and efficient communication. In this work, we intend to observe, through simulation, how the communication quality varies depending on various parameters, the behavior of signal distortions and the use of strategies for their compensation.

Glosario de acrónimos y abreviaturas

16APSK: *16-ary Amplitude and Phase Shift Keying*

32APSK: *32-ary Amplitude and Phase Shift Keying*

8PSK: *8-ary Phase Shift Keying*

AES: *Advanced Encryption Standard*

AGC: *Automatic Gain Controller*

APSK: *Amplitude Phase Shift Keying*

ATM: *Asynchronous Transfer Mode*

BCH: *Bose-Chaudhuri-Hocquenghem*

BER: *Bit Error Rate*

DC: *Direct Current*

DES: *Data Encryption Standard*

DPD: *Digital Pre-Distortion,*

DTH: *Direct To Home*

DVB-S2: *Digital Video Broadcasting - Satellite - Second Generation*

E_b/N₀: *Densidad espectral de potencia de ruido por bit*

E_s/N₀: *Densidad espectral de potencia de ruido por símbolo*

ECC: *Elliptic Curve Cryptography*

ETSI: *European Telecommunications Standards Institute.*

EVM: *Error Vector Magnitude.*

FDM: *Frequency Division Multiplexing*

FEC: *Forward Error Correction*

GEO: *Geostationary Earth Orbit*

GPS: *Global Positioning System*

GTO: *Geostationary Transfer Orbit*

HPA: *High Power Amplifier*

HEO: *High Earth Orbit*

ISI: *InterSymbol Interference*

ISS: *International Space Station)*

LDPC: *Low Density Parity Check*

LEO: *Low Earth Orbit*

LNA: *Low-Noise Amplifier*

MEO: *Medium Earth Orbit*

MER: *Modulation Error Ratio*

PSK: *Phase Shift Keying*

QAM: *Quadrature Amplitude Modulation*

QPSK: *Quaternary Phase Shift Keying*

RC4: *Rivest Cipher 4*

RSA: *Rivest-Shamir-Adleman*

SNR: *Signal to Noise Power Ratio*

TDM: *Time Division Multiplexing*

UIT: *Unión Internacional de Telecomunicaciones*

Índice

1. Introducción	7
2. Marco Teórico	9
2.1. Aspectos importantes de las comunicaciones por satélite	9
2.1.1. Frecuencias de Transmisión	9
2.1.2. Modulación y codificación de la señal	11
2.1.3. Antenas	15
2.1.4. Órbitas satelitales	16
2.1.5. Sistemas de control y gestión del satélite	18
2.1.6. Seguridad y encriptación de la señal	19
2.1.7. Retardo de propagación y latencia	21
2.2. DVB-S2: Características, ventajas y aplicaciones en comunicaciones por satélite	22
2.2.1. Modulación	22
2.2.2. Códigos de corrección de errores	23
2.2.3. Ancho de banda	23
2.2.4. Velocidades de transmisión	24
2.2.5. Multiplexación	25
2.2.6. Aplicaciones	26
3. Descripción del Modelo de Simulación	28
3.1. Estación terrena transmisora	28

3.2. Enlace ascendente y descendente	30
3.3. Satélite	32
3.4. Estación Terrena Receptora	34
4. Simulaciones y Resultados	37
4.1. Resultados al variar el tipo de modulación y codificación	39
4.2. Resultados al variar el orden del filtro de Chebyshev	41
4.3. Resultados al variar el factor de retroceso	43
4.4. Resultados al variar la altitud del satélite	44
4.5. Resultados al variar las frecuencias de enlace ascendente y descendente	47
4.6. Resultados obtenidos en función de diversos efectos de distorsión, con y sin compensación	49
4.6.1. I/Q Amplitude Imbalance (dB)	49
4.6.2. I/Q Phase Imbalance (deg)	53
4.6.3. In-Phase DC Offset (%)	57
4.6.4. Doppler Error	60
4.7. Discusión	61
5. Conclusiones	63
6. Bibliografía	64

1. Introducción

Desde la mitad del siglo XX, cuando se puso en órbita el primer satélite artificial de la historia (Sputnik 1), lanzado al espacio por la Unión Soviética, los satélites artificiales se convirtieron en una herramienta fundamental para la comunicación global y su impacto afecta en muchos aspectos de la vida cotidiana, cambiando la forma en que la humanidad se comunica, navega y observa el mundo, mejorando la calidad de vida de las personas [1].

Los satélites son dispositivos artificiales que orbitan la Tierra utilizándose para proporcionar múltiples servicios y funcionalidades. Los satélites de navegación son utilizados por sistemas de posicionamiento global (GPS, *Global Positioning System*) para proporcionar información precisa sobre la ubicación y el tiempo. Otros, como los satélites de observación de la Tierra, se utilizan para monitorizar el clima, la vegetación, la topografía y otros aspectos del medio ambiente. También podemos encontrar satélites de comunicación que pueden conectar las zonas rurales y remotas, donde la infraestructura de comunicaciones terrestres es limitada o inexistente, o alejadas, donde la distancia podría ser un problema en la comunicación terrestre. Por otra parte, pueden ser cruciales para la seguridad nacional y la defensa, ya que permiten la comunicación entre las fuerzas militares y la coordinación de operaciones, así como para la coordinación de operaciones humanitarias y de socorro en casos de desastres naturales y emergencias médicas. Además, se utilizan para proporcionar servicios de telecomunicaciones, como llamadas de voz y vídeo, internet, fax, televisión y canales de radio. Los campos de aplicación de las comunicaciones por satélite se amplían continuamente, permitiendo a individuos, empresas y agencias gubernamentales intercambiar rápidamente datos e información de manera eficiente y rentable [1].

Estas tecnologías han revolucionado la forma en que las personas se comunican, brindando un medio de comunicación más eficiente, seguro y confiable a través de grandes distancias. Además, la comunicación por satélite ha permitido el desarrollo de redes globales que facilitan la comunicación entre diferentes países y regiones convirtiéndose en una herramienta vital para el progreso global en el siglo XXI.

Los satélites de comunicaciones están ubicados en órbitas específicas alrededor de la Tierra y son capaces de recibir, procesar y transmitir señales de radio y televisión en todo el mundo. Los satélites son lanzados al espacio mediante cohetes y, una vez en órbita, son controlados desde estaciones terrestres que monitorizan su posición, velocidad y rendimiento [1].

Existen diferentes tipos de órbitas dónde posicionar los satélites de comunicaciones. Pueden ser órbitas geoestacionarias, órbitas de altura media y órbitas de altura baja. Los satélites geoestacionarios están situados en órbitas a una altura de unos 36.000 kilómetros sobre el ecuador y giran a la misma velocidad que la Tierra gira sobre su propio eje, lo que les permite permanecer en la misma posición en relación a la superficie de la Tierra en todo momento. Los satélites de órbita media y baja, por otro lado, se mueven a una velocidad mayor y están ubicados en órbitas más bajas que los satélites

geoestacionarios. Además, no sólo se mueven a mayor velocidad, sino que también se mueven con relación a la superficie terrestre, por lo que no los vemos estáticos como sucede con los geoestacionarios [1].

La puesta en órbita de estos satélites no es una tarea sencilla. Además de la enorme complejidad que supone el lanzamiento hasta alcanzar y mantener la altura y velocidad deseada, la comunicación con ellos supone un desafío que se debe resolver constantemente.

Los principales factores que afectan negativamente a la comunicación con un satélite son el movimiento aparente de éste debido a los balanceos de la Tierra en su rotación, el retardo producido por las enormes distancias, la actividad solar, las variaciones del medio, la interferencia de señal, la obstrucción de la línea de visión, posibles averías, etc.

Para evitar o minimizar todos estos problemas, se pueden tomar diversas medidas como la utilización de filtros, uso de distintos sistemas de modulación y codificación de la señal, uso de diversas frecuencias, utilización de códigos de detección de errores, etc.

En este trabajo, se pretende examinar cómo se comporta la comunicación entre una estación terrena y un satélite bajo distintos aspectos que pueden implementarse mediante un simulador. Se analizará cómo afecta a la señal de comunicaciones la variación de distintos parámetros y se podrá observar el comportamiento de ésta bajo el uso de estrategias que puedan mitigar o solucionar los distintos problemas que pueden afectar a una comunicación satelital.

Para ello, en el siguiente capítulo, se expone un marco teórico en el que se explicarán las distintas características y dificultades que tienen las comunicaciones por satélite y una descripción del estándar de comunicación DVB-S2. En el capítulo 3, se lleva a cabo una descripción detallada del funcionamiento del simulador utilizado para la obtención de los resultados. En el capítulo 4 se presentarán y analizarán los resultados y finalmente en el capítulo 5 se expondrán las conclusiones.

2. Marco Teórico

2.1. Aspectos importantes de las comunicaciones por satélite

Las comunicaciones por satélite son una tecnología de transmisión de información que ha revolucionado la forma en que la humanidad se comunica. Estas comunicaciones son posibles gracias a la presencia de satélites artificiales en el espacio que realizan la recepción y envío de señales de radiofrecuencia tanto para transmitir voz como datos. Dichos satélites actúan como un enlace entre diferentes puntos del planeta.

Los satélites pueden actuar como repetidores de señales de radiofrecuencia. Funcionan de la siguiente manera: un transmisor terrestre emite una señal que es recibida por un equipo receptor en el satélite. Posteriormente, el satélite, después de procesar la señal, utiliza otro equipo emisor a bordo para retransmitir esa señal a un receptor terrestre ubicado en un punto diferente del planeta [1].

Aunque las comunicaciones por satélite tienen muchas ventajas, como la capacidad de transmitir señales a través de grandes distancias sin la necesidad de infraestructura terrestre intermedia, también presentan algunos desafíos. La posible presencia de interferencias, las limitaciones en las bandas disponibles en frecuencia, así como los costes asociados con el lanzamiento y mantenimiento de los satélites son algunos de los problemas a los que se enfrentan las comunicaciones por satélite.

En lo que sigue se detallarán los conceptos y características más relevantes para la transmisión de datos mediante comunicación por satélite.

2.1.1. Frecuencias de Transmisión

Los satélites utilizan diferentes bandas de frecuencia para transmitir y recibir señales, dependiendo del tipo de aplicación y del espectro disponible. Para llevar a cabo esta tarea, las más utilizadas se dividen en 4 categorías principales: frecuencias de banda L, C, Ku y Ka.

La banda L se encuentra en el rango de frecuencia de 1 a 2 GHz. Se utiliza principalmente en aplicaciones de navegación y control de tráfico aéreo. La banda L es menos susceptible a la atenuación de la señal debido a la lluvia y otros obstáculos que las bandas de frecuencia más altas, lo que la hace adecuada para aplicaciones en regiones tropicales y de alta humedad. Sin embargo, tiene una capacidad de transmisión más baja que las bandas de frecuencia más altas [1] [2].

La banda C se refiere a las frecuencias de transmisión que se encuentran en el rango de 4 a 8 GHz. Esta banda se utiliza principalmente en aplicaciones comerciales, como la transmisión de televisión, aunque también es utilizada para aplicaciones militares,

gubernamentales y científicas, debido a que tiene menor afectación por los efectos de la lluvia y de la atmósfera que otras bandas de frecuencia [1] [3].

La banda Ku se refiere a las frecuencias de transmisión que se encuentran en el rango de 12 a 18 GHz. se utiliza en una variedad de aplicaciones, como la transmisión de televisión, la telefonía móvil y las comunicaciones de voz y datos. Las señales en banda Ku son susceptibles de sufrir los efectos de la lluvia y la atenuación producida por otros obstáculos, aunque proporciona una mayor capacidad de transmisión que la banda C [1] [3].

La banda Ka se refiere a las frecuencias de transmisión que se encuentran en el rango de 26 a 40 GHz. Esta banda se utiliza en aplicaciones de alta velocidad, como la transmisión de datos y servicios de Internet de alta velocidad, esto se debe a un mayor ancho de banda disponible, lo que permite la transmisión de más datos en un período de tiempo determinado [2]. La banda Ka tiene una mayor capacidad de transmisión que la banda Ku, pero es aún más susceptible a la atenuación de la señal debido a la lluvia y otros efectos. Para mitigar este problema, los satélites de comunicaciones que utilizan esta banda suelen incluir tecnologías avanzadas de mitigación de la atenuación de la señal, como la compensación de la atenuación de la lluvia y la transmisión adaptativa de la potencia, es decir, intentar mantener una relación señal ruido constante en el receptor variando la potencia de transmisión. Además, se utilizan técnicas de modulación y codificación avanzadas para aumentar la eficiencia de la transmisión de datos [1] [3].

Es importante tener en cuenta que cada banda de frecuencia tiene sus propias características de propagación y limitaciones técnicas. La elección de la banda de frecuencia adecuada para una aplicación específica depende de factores como la distancia entre el satélite y la estación terrestre, las condiciones climáticas y la cantidad de datos que se transmiten. Además, el uso de cada banda de frecuencia está regulado por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), que establece normas y reglamentos para garantizar un uso eficiente y equitativo del espectro de frecuencias.

En el siguiente gráfico se proporciona una visión clara de cómo las diferentes bandas de frecuencia pueden influir en varios aspectos de los sistemas de comunicación tales como el rendimiento, el tamaño de la antena, el ancho de banda y la susceptibilidad a la atenuación por lluvia.

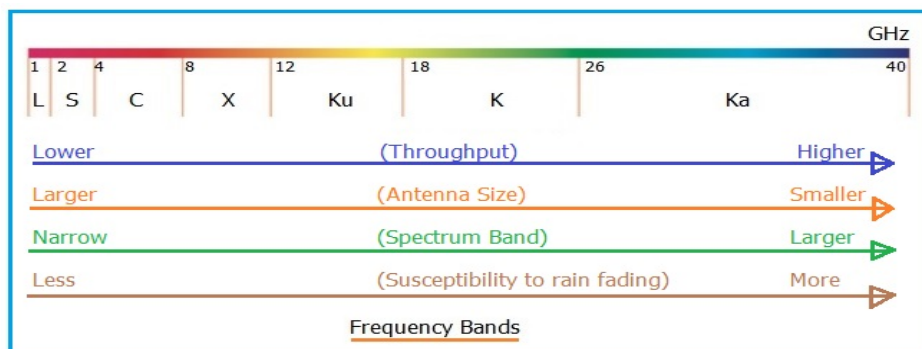


Figura 1: Bandas de frecuencia de uso en comunicaciones satelitales [27].

2.1.2. Modulación y codificación de la señal

Para transmitir información a través de un canal de comunicación, es necesario modular y codificar la señal para que pueda ser transmitida de manera eficiente y segura.

Las técnicas de modulación y codificación son esenciales en las comunicaciones por satélite para transmitir información a largas distancias y con alta fiabilidad. En particular, la modulación se utiliza para convertir una señal de información en una señal de alta frecuencia, mientras que la codificación se utiliza, entre otras funciones, para proteger la información transmitida contra los errores que pueden ocurrir durante la transmisión.

Modulación: la modulación, en el ámbito de comunicaciones a través de satélite, se utiliza, tal como se ha indicado en el párrafo anterior, para convertir una señal de información de baja frecuencia en una señal de alta frecuencia que pueda ser transmitida por el canal de comunicación por satélite. La señal de información se modula en una señal de portadora de alta frecuencia, lo que permite transmitir la señal a largas distancias a través del espacio sin que se degrade significativamente. La modulación también permite transmitir múltiples señales de información al mismo tiempo, lo que se conoce como multiplexación.

Codificación: la codificación se utiliza para proteger la información transmitida contra errores que pueden ocurrir durante la transmisión. Los errores pueden ser causados por diversos factores, como la interferencia electromagnética, el ruido en el canal de comunicación o las limitaciones de la capacidad de recepción de la estación terrestre, en el caso de que se utilicen, por ejemplo, equipos portátiles o personales. La codificación agrega información redundante a la señal de información original, lo que permite detectar y corregir errores en la señal recibida. Esto permite mejorar significativamente la fiabilidad de la transmisión de datos por satélite.

Tradicionalmente, se han utilizado varios tipos de modulación para transmitir señales de información. Inicialmente se utilizaron la modulación de amplitud, la modulación de frecuencia y la modulación de fase. En cada caso es, respectivamente, la amplitud, la frecuencia y la fase de la señal portadora la que varía de acuerdo con la amplitud de la señal de información que se quiere transmitir.

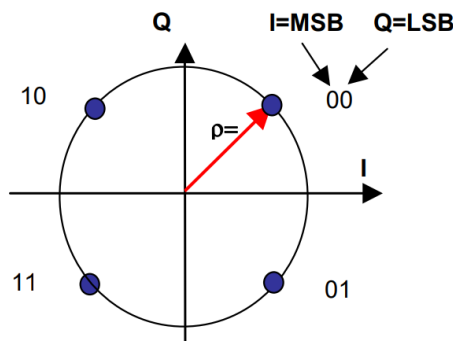
Actualmente se suelen utilizar las siguientes modulaciones:

- **Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*):** en la modulación de amplitud en cuadratura, se utilizan dos señales portadoras que están desfasadas 90 grados. La señal de información se divide en dos partes y se modula cada parte por separado en cada señal portadora. La señal resultante es una combinación de las dos señales portadoras y se transmite a través del canal, si bien no es muy utilizada en el entorno satelital [4].

- Modulación por desplazamiento de fase (PSK, *Phase Shift Keying*): es una técnica de modulación donde se varía la fase de la onda portadora para representar los bits de información. Es decir, la información se codifica mediante cambios en la fase de la señal portadora.

Existen varias formas de modulación PSK, siendo las más comunes PSK en cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*) y PSK en 8 fases (8PSK, *8-Phase Shift Keying*), entre otras [5] [4].

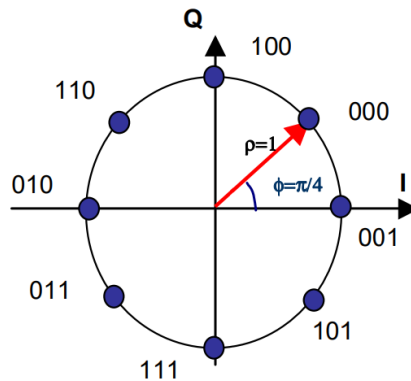
- QPSK: utiliza cuatro fases equiespaciadas en la onda portadora, permitiendo representar dos bits por símbolo. Los cuatro estados de fase son usualmente 0° , 90° , 180° y 270° . QPSK se utiliza comúnmente para transmitir señales de baja velocidad de datos y es más resistente al ruido que otras técnicas de modulación [4] [5].



(a) QPSK

Figura 2: Constelacion QPSK [5].

- 8PSK: se utilizan ocho fases equiespaciadas para representar tres bits por símbolo. Esto incrementa la eficiencia espectral, ya que se están transmitiendo más bits por símbolo. Sin embargo, 8PSK es más susceptible al ruido que QPSK debido a que tiene menos margen de error [5].



(b) 8PSK

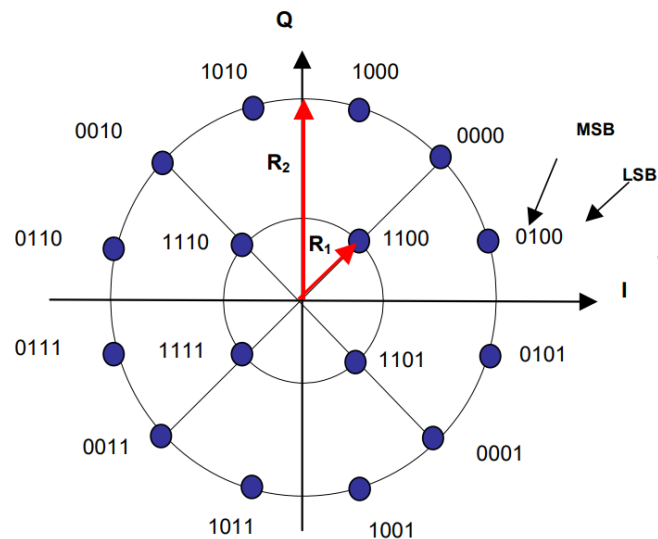
Figura 3: Constelacion 8PSK [5].

- La modulación APSK (*Amplitude Phase Shift Keying*), es un tipo de modulación que combina, al mismo tiempo, los principios de la modulación de amplitud y la modulación de fase en un solo esquema. En la modulación APSK, la información se transmite mediante la variación simultánea de la amplitud y la fase de la señal portadora [4].

La modulación APSK es utilizada en sistemas de comunicación por satélite de alta velocidad de transmisión de datos y puede ser vista como una extensión de la modulación QAM y la modulación PSK. En la modulación APSK, los bits de datos se asignan a diferentes constelaciones en el plano de la amplitud-fase, lo que permite una mayor eficiencia espectral en la transmisión de datos además de ser más robusta frente a distorsiones [5].

Existen varias formas de modulación APSK, siendo las más comunes 16APSK y 32APSK[4] [5].

- 16APSK: la modulación 16APSK utiliza 16 símbolos diferentes para transmitir información y es más eficiente que QPSK y 8PSK porque puede transmitir más información por símbolo. Sin embargo, es más susceptible al ruido que QPSK y 8PSK, y requiere un mayor nivel de precisión en el hardware y la transmisión [5].



(c) 16APSK

Figura 4: Constelacion 16APSK [5].

- 32APSK: la modulación 32APSK utiliza 32 símbolos diferentes para transmitir información, lo que implica una mayor eficiencia que la modulación 16APSK ya que puede transmitir una mayor cantidad de información por símbolo, sin embargo es más susceptible al ruido y es necesario un hardware de alta calidad y una transmisión cuidadosa para evitar errores [5].

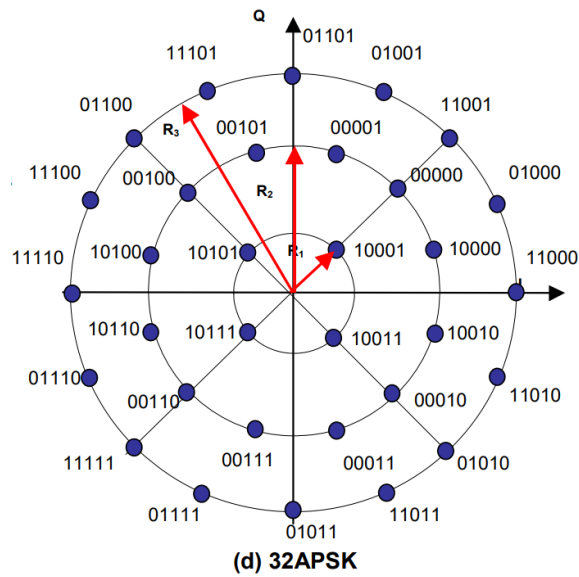


Figura 5: Constelacion 32APSK [5].

Respecto a la codificación de canal, existen varios tipos de técnicas en la comunicación satelital, cada una con sus propias ventajas y desventajas. Entre otros tenemos:

- Códigos de bloque: dividen los datos de entrada en bloques de tamaño fijo y agregan redundancia a cada bloque de forma independiente. Un ejemplo conocido es el código Reed-Solomon, que se usa ampliamente en aplicaciones como la televisión digital.
- Códigos convolucionales: agregan redundancia a los datos de entrada mediante un conjunto de polinomios generadores. Son especialmente adecuados para aplicaciones en las que el ruido del canal es aleatorio y se distribuye uniformemente en los datos transmitidos.
- Códigos turbo: combinan las fortalezas de los códigos de bloque y los códigos convolucionales. Consisten en dos o más códigos convolucionales concatenados en paralelo. La decodificación iterativa es una técnica de decodificación asociada, entre otros, con los códigos turbo. En la decodificación iterativa, el proceso de decodificación se repite varias veces para mejorar la precisión de la decodificación. En el caso de los códigos turbo, la decodificación iterativa se utiliza para mejorar la precisión de la decodificación y garantizar una transmisión fiable de datos.
- Códigos de paridad: toma un conjunto de bits de entrada y agrega un bit adicional para garantizar la paridad, par o impar. Si se produce un error en la transmisión, el receptor puede detectarlo utilizando el bit de paridad.
- Códigos BCH (*Bose-Chaudhuri-Hocquenghem*): se basan en polinomios de Bose-Chaudhuri-Hocquenghem y se utilizan para detectar y corregir errores en la transmisión de datos. Son muy eficaces para corregir errores en transmisiones de alta velocidad y se utilizan en aplicaciones como la transmisión de televisión digital por satélite. Los códigos BCH se construyen utilizando polinomios de grado n que

satisfacen ciertas propiedades algebraicas. Los polinomios se utilizan para generar un conjunto de palabras de código que se transmiten junto con los datos. Cuando se reciben los datos, se pueden utilizar los polinomios para detectar y corregir errores en la transmisión [5] [6].

- Códigos LDPC (*Low Density Parity Check*): son una familia de códigos de corrección de errores que se basan en la verificación de paridad de baja densidad. Son muy eficientes en términos de uso de recursos de hardware y ancho de banda. Además, tienen una complejidad de decodificación baja, lo que los hace ideales para aplicaciones de transmisión de alta velocidad. Una de las características de los códigos LDPC es que durante el diseño del código, se tiene un control preciso sobre el número de errores de símbolos que se pueden corregir. Además, al igual que los códigos turbo, los códigos LDPC utilizan la decodificación iterativa para mejorar la precisión de la decodificación y garantizar una transmisión fiable de datos [5] [6].

2.1.3. Antenas

Las antenas forman parte esencial de la comunicación por satélite, ya que son las encargadas de la transmisión y recepción de señales entre el satélite y la estación terrestre.

La antena parabólica consiste en un reflector parabólico, un alimentador y un soporte. El reflector parabólico es responsable de enfocar las señales en el punto focal. El alimentador es la parte de la antena que recibe o transmite la señal de radiofrecuencia y se coloca en el punto focal del reflector parabólico.

En cuanto al funcionamiento de una antena parabólica, cuando actúa como receptora, la onda electromagnética llega al reflector, éste la refleja y la enfoca en un punto focal. La señal se recibe en el punto focal por medio del alimentador y se dirige hacia el receptor. El funcionamiento en el caso de que actúe como emisora, es similar aunque en sentido inverso, intercambiando el receptor por un transmisor. El tamaño de la antena y la frecuencia de la señal determinan la ganancia de la antena parabólica según la fórmula [7]:

$$G = \eta \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

donde G representa la ganancia total, η representa la eficiencia de la antena, D representa el diámetro de la antena y λ la longitud de onda de espacio libre.

La ganancia se puede aumentar mediante el uso de un reflector más grande y/o un alimentador de mayor eficiencia. Además, es importante mencionar que las antenas parabólicas tienen diferentes tipos de polarización, relacionada con la orientación de las ondas electromagnéticas respecto al plano terrestre. Es importante que el receptor y

el transmisor estén sintonizados en la misma polarización para que la señal se reciba correctamente.

El array de antenas, por otro lado, es un conjunto de antenas individuales que se agrupan para formar una antena equivalente más grande y potente. Cada antena individual puede sintonizarse en una frecuencia diferente y combinarse para transmitir y recibir señales simultáneamente. El array de antenas es útil para aplicaciones en las que se necesitan transmitir o recibir señales en diferentes frecuencias simultáneamente.



Figura 6: Array de antenas para transmisión de TV intercontinental [32].

2.1.4. Órbitas satelitales

Existen varios tipos de órbitas en las que pueden operar los satélites, cada una con sus propias características y ventajas.

Si tomamos como referencia la altitud podemos diferenciar los siguientes tipos de órbitas:

- Órbita baja terrestre (LEO, *Low Earth Orbit*): esta órbita se encuentra a una altitud entre 160 y 2000 kilómetros sobre la Tierra. Debido a su cercanía a la Tierra, los satélites en órbita LEO tienen un periodo corto y pueden proporcionar imágenes de alta resolución. Además, la atmósfera terrestre en esta altitud es lo suficientemente densa para desacelerar y desorbitar los satélites al final de su vida útil, reduciendo así el problema de la basura espacial. Los satélites LEO son utilizados para la observación de la Tierra, comunicaciones secundarias y misiones tripuladas como las realizadas en la estación espacial internacional (ISS, *International Space Station*) [20].
- Órbita media terrestre (MEO, *Medium Earth Orbit*): esta órbita se encuentra a una altitud entre 2000 y 34780 kilómetros sobre la Tierra. Los satélites en órbita MEO pueden proporcionar una mayor cobertura que los satélites LEO, ya que su

altitud permite una vista más amplia de la Tierra. Son utilizados principalmente como satélites de navegación (GPS, GLONASS, GALILEO, etc.) [20].

- Órbita geoestacionaria (GEO, *Geostationary Earth Orbit*): esta órbita se encuentra a una altitud de aproximadamente 35786 kilómetros sobre la Tierra y tiene un período de revolución igual al período de rotación de la Tierra (aproximadamente 24 horas). Esto significa que los satélites en órbita GEO parecen estar estacionarios en el cielo sobre un punto en la Tierra, lo que los hace ideales para la comunicación y la observación de la Tierra además de para la observación meteorológica. Debido a su gran altitud, los satélites GEO requieren mucha energía para alcanzar la velocidad necesaria para su inserción en órbita y no son adecuados para la observación de la Tierra de alta resolución [20].
- Órbita alta terrestre (HEO, *High Earth Orbit*): ésta se encuentra por encima de la órbita geosíncrona. Su principal ventaja es la capacidad para proporcionar cobertura continua de un área específica en la Tierra. Sin embargo, debido a la larga distancia entre el satélite y la Tierra, hay un retraso notable en la transmisión de señales, lo que puede afectar las aplicaciones de comunicación en tiempo real.

Si tomamos como referencia otros factores que no sean la altitud, podemos considerar también estos tipos de órbita:

- Órbita elíptica: esta órbita tiene forma de elipse, con la Tierra en uno de los focos de la misma. Los satélites en órbita elíptica pueden proporcionar cobertura global y son utilizados principalmente para la observación de la Tierra y la investigación científica.
- Órbita de transferencia geoestacionaria (GTO, *Geostationary Transfer Orbit*): esta órbita se utiliza para colocar satélites en órbita GEO. Los satélites se colocan inicialmente en una órbita de transferencia elíptica con el punto más bajo en una órbita LEO y el punto más alto en la órbita GEO. Posteriormente, se utiliza la energía de un propulsor instalado en el satélite para modificar su órbita a la altitud de GEO [20].
- Órbita polar: los satélites sobrevuelan los polos de la Tierra, lo que permite una vista completa del planeta. Los satélites en órbita polar son utilizados principalmente para barrer toda la superficie terrestre [20].
- Órbita heliosíncrona: tipo de órbita que mantiene siempre la misma orientación respecto al eje Sol-Tierra.

En la Figura 7, podemos observar algunas de las órbitas descritas, teniendo en cuenta que se trata de un ilustración que no está a escala:

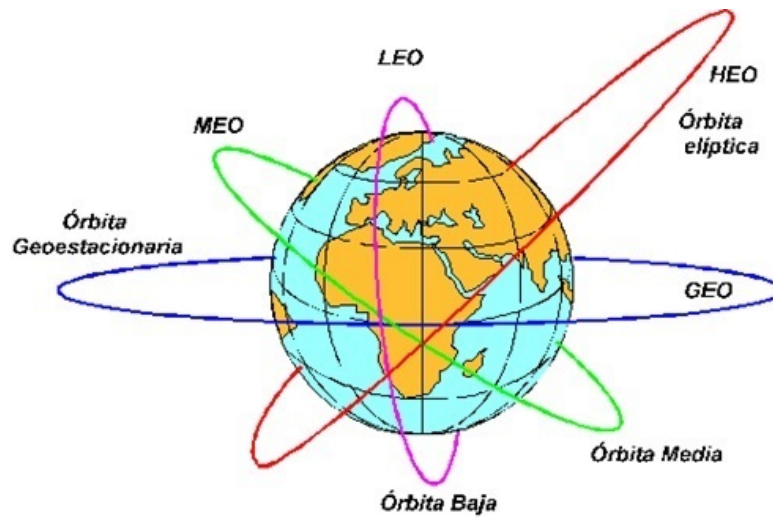


Figura 7: Ejemplo de órbitas Satelitales [28].

2.1.5. Sistemas de control y gestión del satélite

Para operar un satélite de manera efectiva y segura, se requieren sistemas de control y gestión que permitan monitorear, supervisar y controlar todas las funciones y actividades relacionadas con el satélite desde la Tierra. Estos sistemas son fundamentales para garantizar el correcto funcionamiento del satélite, la ejecución de las misiones previstas y la protección del sistema espacial.

Los principales sistemas de control y gestión del satélite se pueden clasificar en varias categorías, que incluyen:

- Sistema de control de actitud y órbita: este sistema se encarga de mantener la orientación y posición del satélite en el espacio. Controla la actitud del satélite (su orientación en relación con un sistema de referencia) y su órbita (su posición y velocidad en relación con la Tierra). Para ello, utiliza sensores de actitud, como giróscopos y sensores solares, así como propulsores y actuadores para realizar ajustes precisos en la orientación y órbita del satélite. El sistema de control de actitud y órbita es esencial para mantener al satélite en su trayectoria correcta, evitar colisiones con otros objetos espaciales y optimizar la calidad de las observaciones o comunicaciones realizadas por el satélite [1].
- Sistema de control térmico: debido a las condiciones extremas del espacio, los satélites están expuestos a fluctuaciones significativas de temperatura. El sistema de control térmico se encarga de mantener la temperatura interna del satélite dentro de los límites seguros y óptimos para el funcionamiento de los componentes electrónicos y los sistemas a bordo. Esto se logra mediante la utilización de materiales aislantes, radiadores, calentadores y sistemas de refrigeración, que disipan o suministran calor según sea necesario [1].

- Sistema de energía: el suministro de energía es esencial para el funcionamiento del satélite. Los sistemas de energía a bordo, como paneles solares, baterías y sistemas de gestión de energía, se utilizan para generar, almacenar y distribuir la energía eléctrica necesaria para alimentar los sistemas y subsistemas del satélite. Estos sistemas también supervisan el consumo de energía y aseguran un uso eficiente de los recursos disponibles [1].
- Sistema de comunicación: los satélites se utilizan para transmitir y recibir información desde y hacia la Tierra. El sistema de comunicación a bordo del satélite comprende antenas, transmisores, receptores y procesadores de señales que permiten la transmisión y recepción de datos, ya sea para aplicaciones de telecomunicación, observación de la Tierra u otros fines. Además, los sistemas de control y gestión también incluyen protocolos de comunicación y enlaces de datos para garantizar una transferencia de información fiable y segura entre el satélite y las estaciones terrestres [1].
- Sistema de control de misión: este sistema supervisa y coordina todas las operaciones y funciones del satélite para cumplir con los objetivos de la misión. Incluye algoritmos y software de control que planifican y ejecutan las maniobras, recopilan y procesan los datos científicos o de ingeniería, y realizan las correcciones necesarias en tiempo real.

2.1.6. Seguridad y encriptación de la señal

La seguridad y encriptación de la señal son elementos clave en las comunicaciones por satélite, ya que estas señales son enviadas desde el espacio y son vulnerables a la interceptación y el sabotaje. En este sentido, es necesario aplicar técnicas de seguridad y encriptación para proteger las comunicaciones y garantizar su confidencialidad, integridad y disponibilidad de forma que solamente el emisor y el receptor tengan acceso a ellas.

La encriptación de la señal es un proceso por el cual se codifica la información que se envía por el satélite, de manera que solo puede ser decodificada por aquellos que tengan la clave de descifrado correspondiente. Este proceso se lleva a cabo mediante algoritmos de cifrado, que utilizan diferentes técnicas para convertir la información en un formato ilegible para cualquiera que no tenga la clave de descifrado adecuada.

Existen diferentes técnicas de encriptación de señales en el ámbito de las comunicaciones por satélite, entre ellas, podemos destacar las siguientes:

- Encriptación simétrica: el cifrado simétrico se basa en el uso de una clave secreta compartida entre las partes que desean comunicarse. Este método se utiliza para cifrar y descifrar la información transmitida. Los algoritmos de cifrado simétrico más comunes en las comunicaciones satelitales son AES (*Advanced Encryption Standard*) y DES (*Data Encryption Standard*) [8].

- **Encriptación asimétrica:** el cifrado asimétrico se basa en el uso de dos claves diferentes, una pública y una privada. La clave pública se comparte con todas las partes que desean comunicarse, mientras que la clave privada se mantiene secreta. Los algoritmos de cifrado asimétrico más comunes en las comunicaciones satelitales son RSA (*Rivest-Shamir-Adleman*), Diffie-Hellman y ECC (*Elliptic Curve Cryptography*) [8].
- **Cifrado de flujo:** se basa en la generación de una secuencia de números aleatorios que se utilizan para cifrar los datos en tiempo real. Este método se utiliza para proteger las comunicaciones en tiempo real, como las llamadas de voz y vídeo. Uno de los algoritmos de cifrado de flujo más comunes es RC4 (*Rivest Cipher 4*) [8].

Además de la encriptación de la señal, existen otras técnicas de seguridad que se utilizan en las comunicaciones por satélite, como la autenticación, la integridad y la no repudiación. La autenticación consiste en verificar la identidad de las partes que se comunican, mientras que la integridad se refiere a la protección de la información contra modificaciones no autorizadas. Por último, la no repudiación garantiza que las partes no puedan negar haber enviado o recibido una determinada información.

En las Figuras 8 y 9 se muestra el flujo de los cifrados mencionados anteriormente.

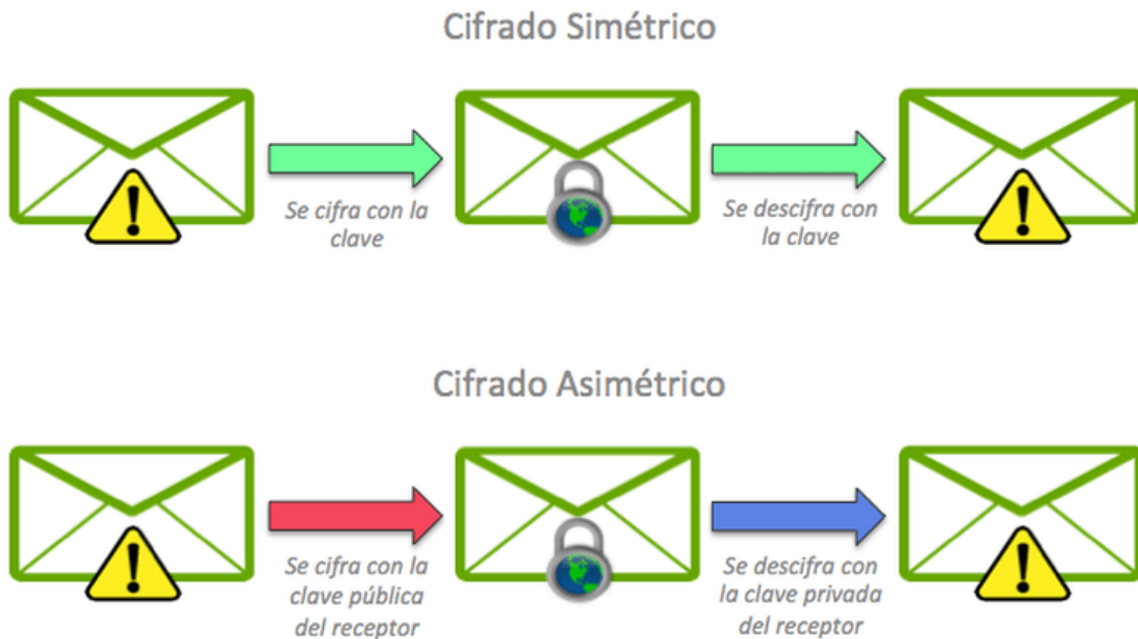


Figura 8: Cifrados Simétrico y Asimétrico [29].

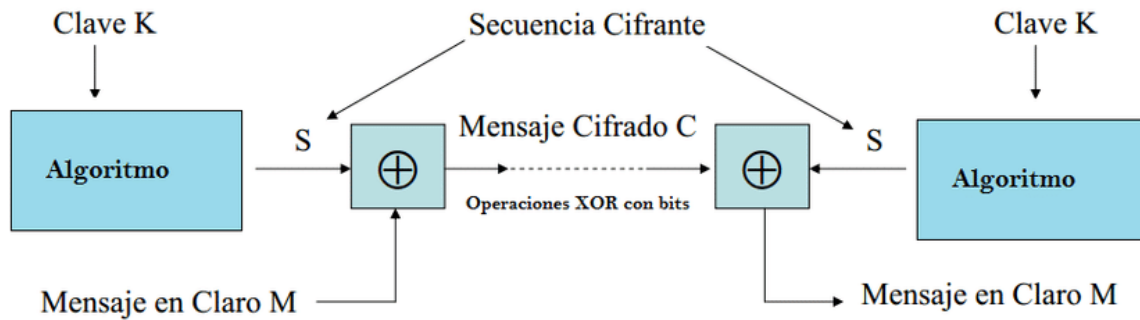


Figura 9: Cifrado de Flujo [30].

2.1.7. Retardo de propagación y latencia

En el ámbito de las comunicaciones satelitales, el retardo de propagación y la latencia son conceptos clave que se refieren al tiempo que tarda una señal en viajar desde un punto de origen hasta un punto de destino a través de un enlace satelital. Estos dos términos están estrechamente relacionados, pero se refieren a aspectos diferentes del tiempo de transmisión.

El retardo de propagación se refiere al tiempo que tarda una señal en viajar desde un satélite hasta un receptor en la Tierra. Este retardo es causado por la distancia que debe recorrer la señal a través del espacio libre y por la velocidad finita de las ondas. En otras palabras, la señal se propaga a la velocidad de la luz, pero debido a la gran distancia que debe recorrer, el retardo de propagación puede ser significativo. El retardo de propagación es una propiedad inherente de los sistemas de comunicación satelitales y no puede ser reducido. Como ejemplo, el retardo para una comunicación con un satélite GEO, se puede calcular como 2 veces la distancia entre la Tierra y el satélite ($2 \times 36.000 \text{ km}$ aproximadamente) dividido por la velocidad de la señal (300.000 km/s aproximadamente) lo que nos daría un retardo de $0,24 \text{ s}$.

Por otro lado, la latencia se refiere al tiempo total que tarda una señal en viajar desde un punto de origen hasta un punto de destino, incluyendo el retardo de propagación y otros retrasos asociados con el procesamiento de la señal. Estos otros retrasos pueden incluir el tiempo de procesamiento en el transmisor, el tiempo de procesamiento en el receptor y el tiempo que tarda la señal en viajar a través de otros medios, como cables y routers. Por lo tanto, la latencia es el tiempo que tarda una señal en viajar a través de todo el sistema de comunicación, desde el origen hasta el destino.

La latencia es un parámetro importante en las comunicaciones satelitales, ya que puede afectar la calidad y la eficiencia de la transmisión de datos. En algunos casos, la latencia puede ser lo suficientemente alta como para afectar la capacidad de los sistemas de comunicación para soportar aplicaciones en tiempo real, como las videoconferencias o los juegos en línea. En estos casos, se pueden utilizar técnicas de optimización del tamaño de los paquetes de datos.

2.2. DVB-S2: Características, ventajas y aplicaciones en comunicaciones por satélite

El estándar DVB-S2 (*Digital Video Broadcasting - Satellite - Second Generation*) es un estándar de modulación y codificación de señales diseñado específicamente para las comunicaciones por satélite, para la transmisión de señales de televisión digital, datos y servicios multimedia. La modulación utilizada es una modulación por desplazamiento de amplitud (QPSK, 8PSK, 16APSK o 32APSK), que permite una transmisión eficiente de datos y un uso óptimo del ancho de banda disponible. Las codificaciones de canal más utilizadas son la codificación BCH y LDPC, que agregan redundancia a los datos para detectar y corregir errores en la transmisión con una complejidad de decodificación relativamente baja. La codificación de canal BCH se suele utilizar para proteger la información crítica de la transmisión de datos, como la información de sincronización y control [5].

Además, DVB-S2 también utiliza técnicas de modulación adaptativa y codificación de canal adaptativa para optimizar la transmisión en condiciones variables de canal, como cambios en la atenuación y la interferencia de la señal.

DVB-S2 representa un estándar esencial en las comunicaciones por satélite. Este estándar ofrece altas prestaciones y múltiples aplicaciones, desempeñando un papel fundamental en la transmisión eficiente y confiable de datos y contenido multimedia.

En lo que sigue, se detallan los conceptos y características más relevantes del estándar DVB-S2.

2.2.1. Modulación

El estándar DVB-S2 representa una tecnología de comunicaciones satelitales que permite la transmisión eficiente de datos, voz y video digital a través de satélites. El estándar DVB-S2 es una evolución del estándar DVB-S, que fue desarrollado originalmente en la década de 1990. Las modulaciones utilizadas en el estándar DVB-S2 incluyen QPSK, 8PSK, 16APSK y 32APSK. Esta última es la técnica de modulación más eficiente utilizada en DVB-S2 ya que puede transmitir la mayor cantidad de información por símbolo, sin embargo, también es la técnica de modulación más susceptible al ruido, por lo que es necesario un hardware de alta calidad y una transmisión cuidadosa para evitar errores [5].

Las modulaciones utilizadas en DVB-S2 se eligen según las necesidades de transmisión específicas, como la tasa de bits requerida, la relación señal-ruido (SNR, *Signal to Noise Power Ratio*) y la eficiencia espectral requerida. Cada técnica de modulación tiene sus fortalezas y debilidades, con lo cual se debe elegir la más adecuada para la aplicación de transmisión satelital que precisemos [9].

2.2.2. Códigos de corrección de errores

DVB-S2 utiliza diversas técnicas de corrección de errores para mejorar la calidad de la señal recibida en los decodificadores.

El FEC (*Forward Error Correction*) es uno de los componentes críticos de DVB-S2, ya que ayuda a corregir los errores de transmisión que pueden ocurrir debido a la interferencia, la atenuación y otros factores en el canal de transmisión. DVB-S2 utiliza técnicas de FEC, como LDPC y BCH [5].

Los códigos LDPC utilizados en DVB-S2 se conocen como códigos LDPC de Gallager. Se basan en la teoría de grafos y se pueden construir a partir de una matriz bipartita. La matriz bipartita consta de dos conjuntos de nodos: nodos de variable y nodos de chequeo. Los nodos de variable representan los bits transmitidos y los nodos de chequeo representan las restricciones de paridad [5] [6].

2.2.3. Ancho de banda

El ancho de banda se refiere a la cantidad de espectro de frecuencia necesario para transmitir una señal.

El estándar DVB-S2 ofrece diversas modulaciones y esquemas de corrección de errores que permiten adaptar la transmisión a diferentes condiciones del canal. Algunos de los parámetros clave que determinan el ancho de banda utilizado en una transmisión DVB-S2 son los siguientes:

- Esquemas de modulación: esquemas de modulación como QPSK, 8PSK y 16APSK utilizan distintos anchos de banda. La utilización de más bits por símbolo, implica una mayor eficiencia espectral [5].
- Tasa de codificación: el estándar DVB-S2 utiliza códigos de corrección de errores para mejorar la resistencia a las interferencias y la atenuación del canal. La tasa de codificación se refiere a la cantidad de bits de corrección de errores añadidos a los datos transmitidos. DVB-S2 admite diferentes tasas de código, como 1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 y 9/10 [5]. Los códigos agregan cierta sobrecarga, lo que implica que una porción del ancho de banda se utiliza para transmitir la información redundante necesaria para la corrección de errores.
- Factores de roll-off: se refiere a la pendiente de la transición entre las partes del espectro de frecuencia útiles de una señal y las partes atenuadas. Es una medida de cómo decae la energía de la señal a medida que se aleja del centro de la banda de frecuencia. El roll-off se utiliza para controlar el ancho de banda ocupado por una señal y también para limitar la interferencia con otras señales adyacentes en el espectro. Un valor de roll-off más bajo puede permitir una transmisión más eficiente de datos, pero a costa de una mayor interferencia entre símbolos. Por otro

lado, un valor de roll-off más alto reduce la interferencia, pero puede requerir un ancho de banda mayor para transmitir la misma cantidad de información [9].

En el estándar DVB-S2 se establece la siguiente relación entre el ancho de banda y el factor de *roll-off*:

$$BW = R_s * (1 + \alpha) \quad (2)$$

donde BW es el ancho de banda, R_s la Tasa de símbolos y α el factor *roll-off*. Los valores de *roll-off* admitidos en DVB-S2 son $\alpha=0,25$, $\alpha=0,20$ y $\alpha=0,351$.

El ancho de banda depende de factores como el esquema de modulación, la tasa de codificación y el factor de *roll-off* utilizados en la transmisión. Estos parámetros se seleccionan según las condiciones del canal y los requisitos de calidad de servicio para maximizar la eficiencia espectral y la capacidad de transmisión. La ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), como organismo encargado de establecer los estándares, proporciona las especificaciones técnicas detalladas para garantizar la compatibilidad y la interoperabilidad de los sistemas DVB-S2.

2.2.4. Velocidades de transmisión

La velocidad de transmisión en DVB-S2 se define en términos de la tasa de bits (*bitrate*), que es la cantidad de datos transmitidos por unidad de tiempo. La tasa de bits depende de varios factores, como la modulación utilizada, la codificación de canal, la frecuencia de transmisión y el ancho de banda utilizado, entre otros.

Una de las mejoras más significativas en DVB-S2 es la utilización de técnicas de codificación avanzadas, como la codificación de baja densidad de paridad (LDPC). Estas técnicas permiten una mayor eficiencia en la transmisión de datos y una mayor resistencia a los errores de transmisión[5] [10].

Otro factor que contribuye a las velocidades de transmisión más altas en DVB-S2 es la utilización de modulaciones más avanzadas, como la modulación 16APSK y 32APSK. Éstas permiten una mayor eficiencia espectral, es decir, una mayor cantidad de datos transmitidos por unidad de ancho de banda utilizado[5].

En términos de velocidades de transmisión, DVB-S2 permite tasas de bits superiores a las del estándar DVB-S. Por ejemplo, para una modulación de 32APSK, una tasa de codificación de corrección de errores de 7/9, un ancho de banda de 36 MHz y un factor de codificación de 9/10, se podría alcanzar una velocidad de 268,8 Mbps.

Es importante tener en cuenta que esta sería la velocidad de transmisión teórica máxima y que la velocidad real puede ser menor debido a factores como la interferencia, la calidad de la señal y la configuración del receptor de satélite.

2.2.5. Multiplexación

Las técnicas de multiplexación utilizadas en DVB-S2 son la multiplexación por división de tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*), la multiplexación por división de frecuencia (FDM *Frequency Division Multiplexing*) y la multiplexación ATM (*Asynchronous Transfer Mode*).

La multiplexación por división de tiempo (TDM) se utiliza en DVB-S2 para combinar múltiples servicios de televisión, audio y datos en un solo flujo de transporte digital. Es una técnica que permite la transmisión de señales digitales a través de un canal de transmisión compartido. Se divide el canal en intervalos de tiempo y se asigna cada intervalo a una señal diferente. Cada intervalo de tiempo contiene una parte de los datos de cada servicio, junto con información de control para permitir la reconstrucción de los servicios originales en el receptor [5].

La multiplexación por división de frecuencia (FDM) se utiliza en DVB-S2 para asignar diferentes bandas de frecuencia a diferentes servicios de televisión, audio y datos. En FDM, se divide el ancho de banda total de la transmisión en diferentes bandas de frecuencia, y se asigna una banda de frecuencia diferente a cada servicio. Cada servicio se modula en la banda de frecuencia asignada y se combina en el flujo de transporte digital [5].

En la Figura 10 se observa la estructura de estos tipos de multiplexación.

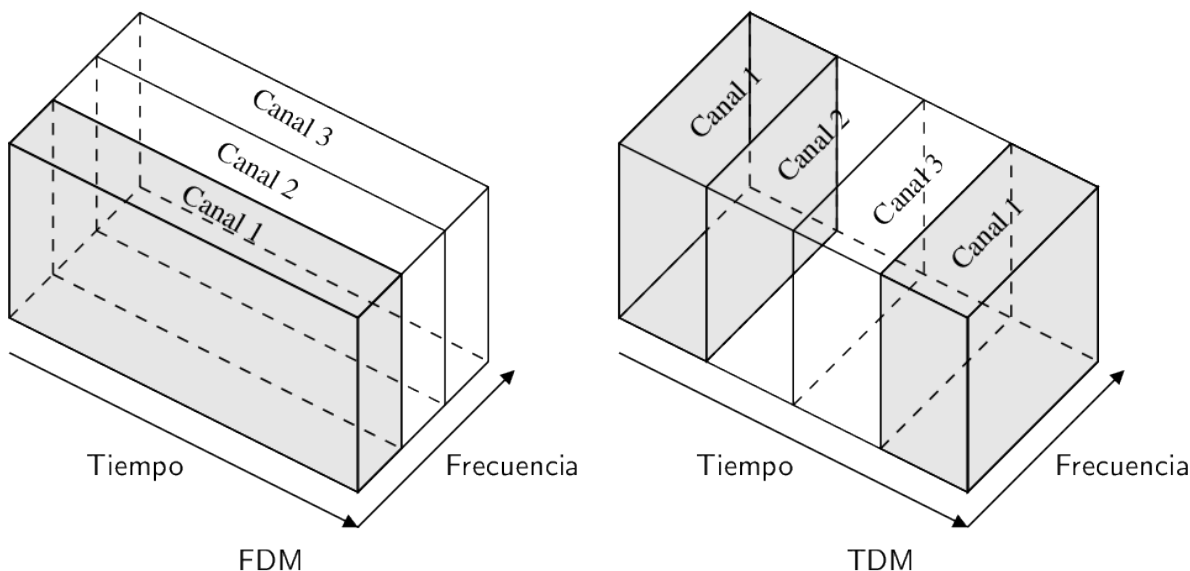


Figura 10: Multiplexación por división de tiempo y por división en frecuencia [31].

La multiplexación ATM se utiliza en DVB-S2 para combinar múltiples servicios en una única corriente de paquetes pequeños de tamaño fijo de 53 bytes denominados celdas. Los datos se dividen en estas celdas y se transmiten de manera asíncrona. Cada celda contiene una pequeña parte de los datos de cada servicio. A diferencia de TDM, donde

los intervalos de tiempo son fijos y la transmisión es síncrona, en ATM estos intervalos se asignan dinámicamente según sea necesario [6].

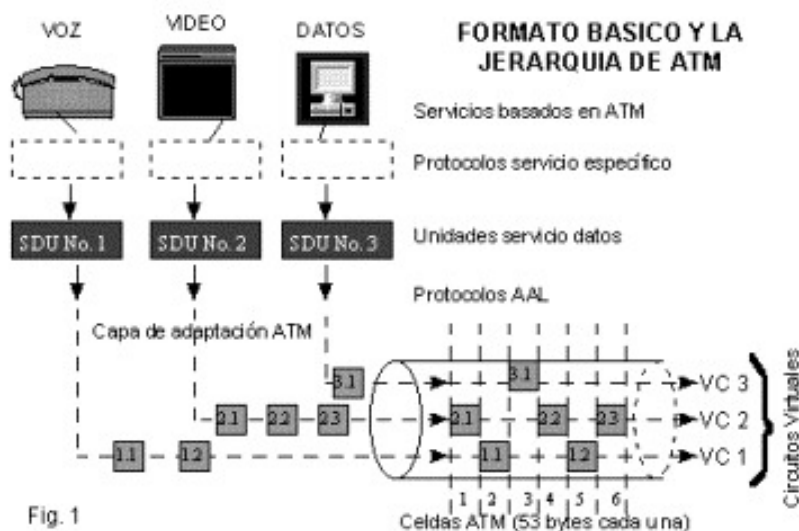


Figura 11: Esquema de multiplexación ATM [33].

2.2.6. Aplicaciones

El estándar DVB-S2 es utilizado en una amplia gama de aplicaciones de comunicaciones por satélite. A continuación, se detallan algunas de las aplicaciones:

- **Televisión Directa al Hogar (DTH, *Direct To Home*):** el estándar DVB-S2 se utiliza en la transmisión de televisión por satélite directa al hogar ya que permite la transmisión de canales de televisión de alta definición y definición estándar, así como servicios interactivos y de banda ancha.
- **Contribución y distribución de contenido:** los proveedores de contenido pueden utilizar el estándar para enviar contenido de televisión y radio de alta calidad, mediante la transmisión de datos a alta velocidad y alta capacidad, punto a punto o multipunto, a centros que redistribuyen los servicios a otros medios.
- **Redes corporativas y de Gobierno:** el estándar DVB-S2 también se utiliza en redes corporativas y gubernamentales para la transmisión de datos y comunicaciones de voz. Es una opción eficiente y segura para conectar oficinas remotas.
- **Comunicaciones de emergencia:** permite la transmisión de información vital a áreas afectadas por desastres naturales y otros sucesos.
- **Servicios de telemedicina:** el estándar DVB-S2 se utiliza en servicios de telemedicina para la transmisión de imágenes médicas y datos de pacientes en tiempo real.
- **Servicios de navegación y control:** permite la transmisión de comandos y datos de control de manera confiable y eficiente.

A lo largo de este capítulo, hemos ido comentando los aspectos más destacados de las comunicaciones por satélite. Se ha puesto énfasis en mencionar el papel crucial que juegan los distintos componentes que integran una comunicación satelital. Desde las frecuencias de transmisión, que determinan la capacidad de los satélites para enviar y recibir señales hasta el retardo de propagación y la latencia, que pueden afectar significativamente la calidad de la comunicación, pasando por la modulación y codificación de la señal que son esenciales para garantizar la integridad de la información transmitida. También se han mencionado las antenas, que son elementos fundamentales en la recepción y transmisión de estas señales. Se han descrito las distintas órbitas satelitales que determinan la cobertura y los sistemas de control y gestión del satélite necesarios para asegurar su funcionamiento y orientación adecuados. Además, se ha hecho mención de la seguridad y encriptación de la señal, que son vitales para proteger la información transmitida frente a las amenazas cibernéticas.

En la segunda parte de este capítulo, se ha descrito el estándar DVB-S2, con su modulación, códigos de corrección de errores, ancho de banda, sus velocidades de transmisión y la capacidad de multiplexación, que han permitido una variedad de aplicaciones, desde la transmisión de televisión hasta la conectividad a Internet.

El modelo de simulación que se va a utilizar en este trabajo, debe implementar un gran número de los aspectos destacados anteriormente. En el siguiente capítulo, se describe el simulador utilizado, así como las partes que componen el diagrama de bloques que representan los distintos elementos asociados a la comunicación satelital. El simulador, reproduce la comunicación desde una estación terrestre transmisora, a través de un enlace ascendente hasta el satélite y desde éste mediante un enlace descendente hasta la estación terrena receptora.

3. Descripción del Modelo de Simulación

Para este trabajo, se ha utilizado, mediante el entorno de simulación de Matlab (Simu-Link), una Demo ya existente basada en el modelo *bent pipe*, para simular la transmisión de la señal de comunicación a través de un satélite entre dos puntos alejados de la Tierra [11].

En la Figura 12 se representa el esquema general donde se pueden diferenciar claramente y de forma sucesiva las distintas secciones involucradas en las comunicaciones satelitales.

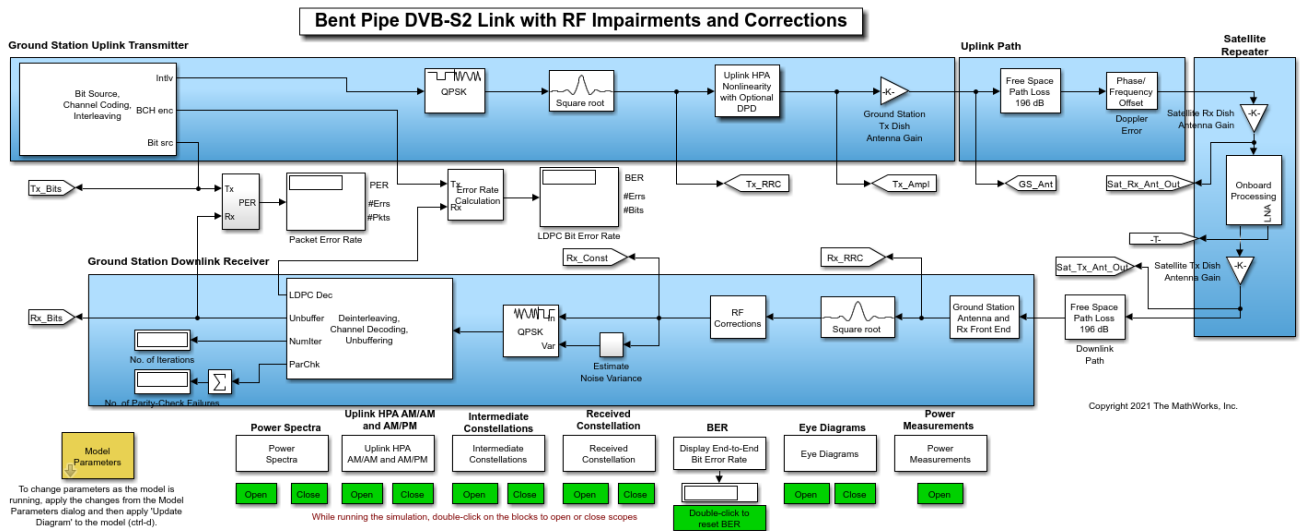


Figura 12: Diagrama de Bloques de la Demo *Bent pipe DVB-S2 with RF impairments and Corrections* [11].

A lo largo de este capítulo, se detallan las distintas partes en las que se divide el sistema simulado.

3.1. Estación terrena transmisora

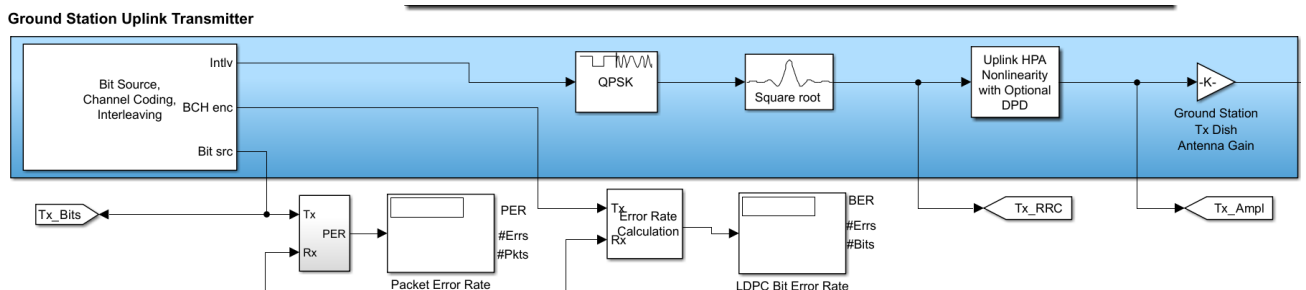


Figura 13: Diagrama de bloques de la estación terrena transmisora [11].

Se pueden distinguir las siguientes partes:

- Transmisor: consta de un generador binario de Bernoulli utilizado para generar secuencias de bits pseudoaleatorias, un buffer para almacenar datos antes de ser procesados o transmitidos, dos bloques para la codificación de canal, BCH como codificador externo y LDPC como codificador interno, y un intercalador de bloques general, que es una técnica utilizada para reordenar los datos y mejorar la dispersión de los errores.
- Modulador: es un dispositivo que se utiliza para convertir a un formato adecuado una señal de información para su transmisión a través de un canal de comunicación. Toma una señal de baja frecuencia y la modula en una señal de alta frecuencia para su transmisión eficiente. En resumen, su función principal es preparar la señal de información para su transmisión.
- Filtro de coseno alzado: también conocido como filtro de *raised cosine* en inglés, es un tipo de filtro utilizado en el procesamiento de señales y en la modulación digital. Es ampliamente utilizado para reducir la interferencia entre los símbolos transmitidos, lo que se conoce como interferencia entre símbolos adyacentes (ISI *InterSymbol Interference*).
- Amplificador no lineal con DPD (*Digital Pre-Distortion*): se utiliza un amplificador de alta potencia para el enlace ascendente (HPA *High Power Amplifier*) para amplificar la señal transmitida.

Cuando un HPA trabaja en régimen no lineal, la señal amplificada puede experimentar distorsiones no deseadas, lo que puede afectar negativamente a la calidad de la comunicación y a la capacidad del sistema para transmitir datos de manera eficiente. Estas distorsiones no lineales pueden ser causantes de interferencias de canal adyacente, disminución de la relación señal-ruido y aumento de la tasa de error de bit [13].

Para abordar este problema, se puede utilizar una técnica llamada DPD. El DPD es una técnica de procesamiento de señal que se utiliza para compensar las distorsiones no lineales introducidas por el HPA. Consiste en medir y caracterizar la no linealidad del amplificador, para luego aplicar una pre-distorsión a la señal de entrada para contrarrestar las distorsiones que ocurrirán durante la amplificación [13].

El DPD es un proceso adaptativo que ajusta continuamente la pre-distorsión aplicada en función de las características cambiantes del HPA. Esta técnica ayuda a reducir las distorsiones no lineales y mejorar la linealidad global del sistema de comunicación, lo que a su vez mejora la calidad de la señal y aumenta la eficiencia espectral.

En la Figuras 14 y 15 se pueden observar las distintas partes en las que se divide el diagrama de bloques que utiliza Simulink para recrear el amplificador no lineal con DPD.

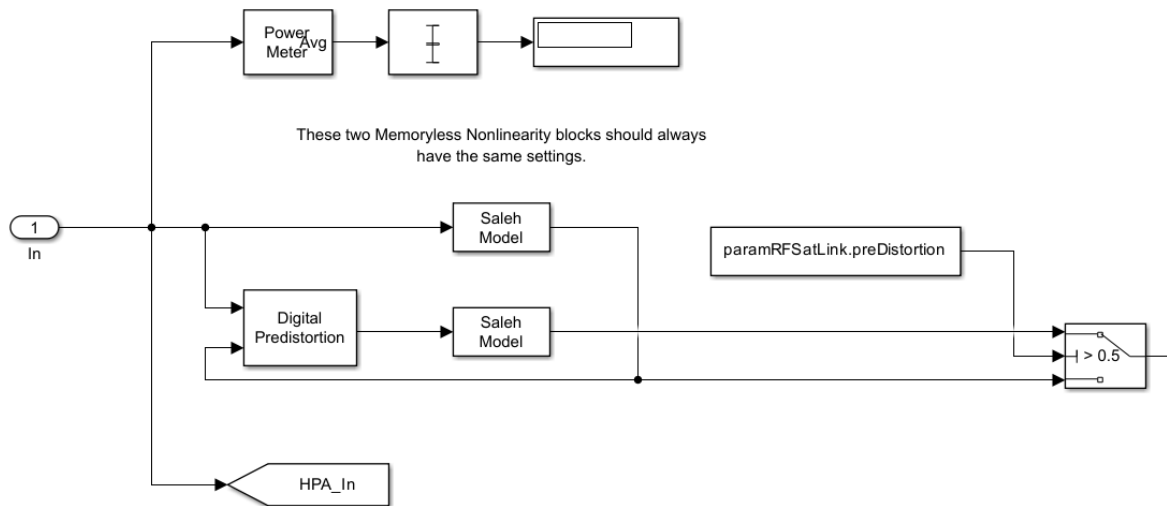


Figura 14: Amplificador no lineal con DPD del modelo de simulink - Parte 1.

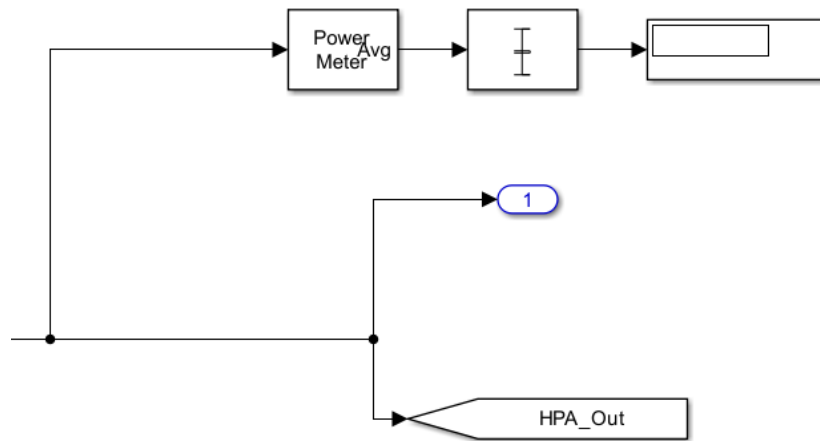


Figura 15: Amplificador no lineal con DPD del modelo de simulink - Parte 2.

3.2. Enlace ascendente y descendente

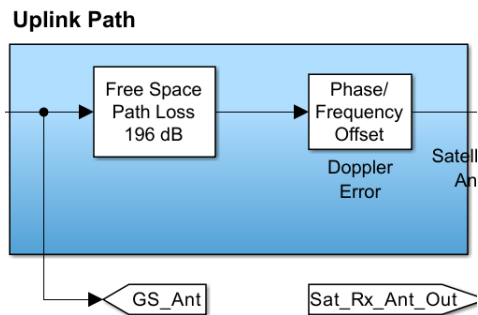


Figura 16: Diagrama de bloques del enlace ascendente[11].

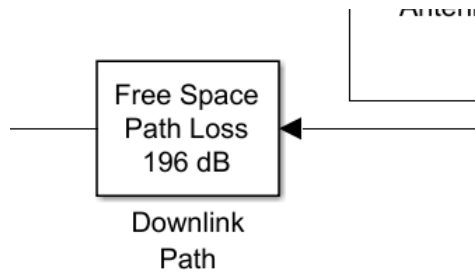


Figura 17: Diagrama de bloques del enlace descendente [11].

Se pueden distinguir las siguientes partes:

- Pérdidas en espacio libre (*Free Space Path loss*): la pérdida en espacio libre se refiere a la atenuación de la señal electromagnética a medida que se propaga en el espacio sin obstáculos ni interferencias. Esta pérdida se debe principalmente a la dispersión y difracción de la señal a medida que se aleja de su fuente.

La pérdida en espacio libre se calcula utilizando la fórmula del modelo de propagación del espacio libre, que establece que la intensidad de la señal se reduce a medida que se propaga a través del espacio según la distancia recorrida. La fórmula es la siguiente:

$$L = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right), \quad (3)$$

donde d es la distancia y λ la longitud de onda de espacio libre. En magnitudes logarítmicas, se escribe como:

$$L[dB] = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right), \quad (4)$$

donde d es la distancia en m, f es la frecuencia en Hz y c la velocidad de la luz en el espacio libre. Si consideramos la distancia en Km y la frecuencia en GHz, magnitudes habituales, la fórmula sería:

$$L[dB] = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 92,44dB, \quad (5)$$

donde el término constante se calcula a partir de los 240dB procedentes de cambiar las magnitudes de la distancia y la frecuencia y -147,55dB del término

$$20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right). \quad (6)$$

Ambas fórmulas se utilizan para calcular el mismo parámetro. La ecuación (5) está expresada en términos de dB mientras que la ecuación (3) está expresada en magnitudes lineales. Es importante tener en cuenta que estas fórmulas asumen condiciones ideales de propagación y no tienen en cuenta otros factores que

podrían afectar a la propagación de la señal, como obstáculos físicos, interferencias electromagnéticas o reflexiones.

- Desplazamiento de fase y frecuencia. Efecto Doppler (*Phase/Frequency offset-Doppler error*): el error Doppler es un fenómeno físico que se produce cuando hay un cambio en la frecuencia o en la fase percibida de una onda debido al movimiento relativo entre la fuente de la onda y el observador. Este efecto es observable en diferentes tipos de ondas, como ondas sonoras u ondas electromagnéticas.

Cuando una fuente generadora de ondas se acerca al observador, las ondas se comprimen y su frecuencia aparente aumenta. Por otro lado, cuando la fuente de ondas se aleja del observador, las ondas se expanden y su frecuencia aparente disminuye.

Un efecto similar ocurre con la fase. Ésta representa la posición relativa de la onda en un punto dado del tiempo. Cuando hay un desplazamiento debido al movimiento relativo, la fase percibida puede diferir de la fase real de la señal. Esto puede tener implicaciones en aplicaciones que dependen de la coherencia de fase, como los sistemas de radar, comunicaciones de alta velocidad o posicionamiento preciso [14].

3.3. Satélite

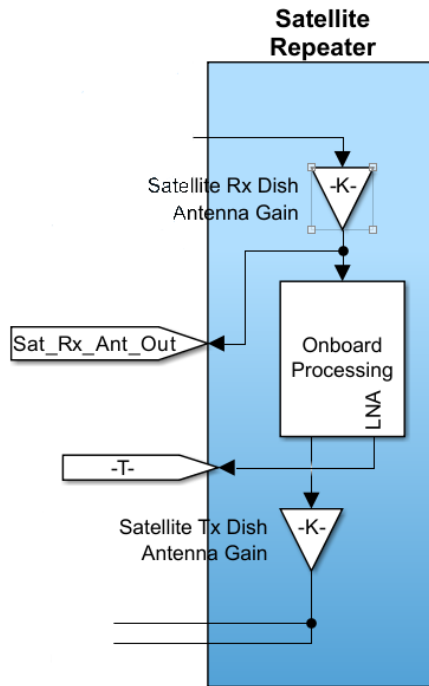


Figura 18: Diagrama de bloques del satélite [11].

Se pueden distinguir las siguientes partes:

- Procesador de datos (*Onboard processing*): en el simulador, el satélite tiene las funciones de recepción, procesamiento y transmisión de los datos.

En la Figura 19 se pueden observar las distintas partes del procesador de datos del satélite según se simula en la demo.

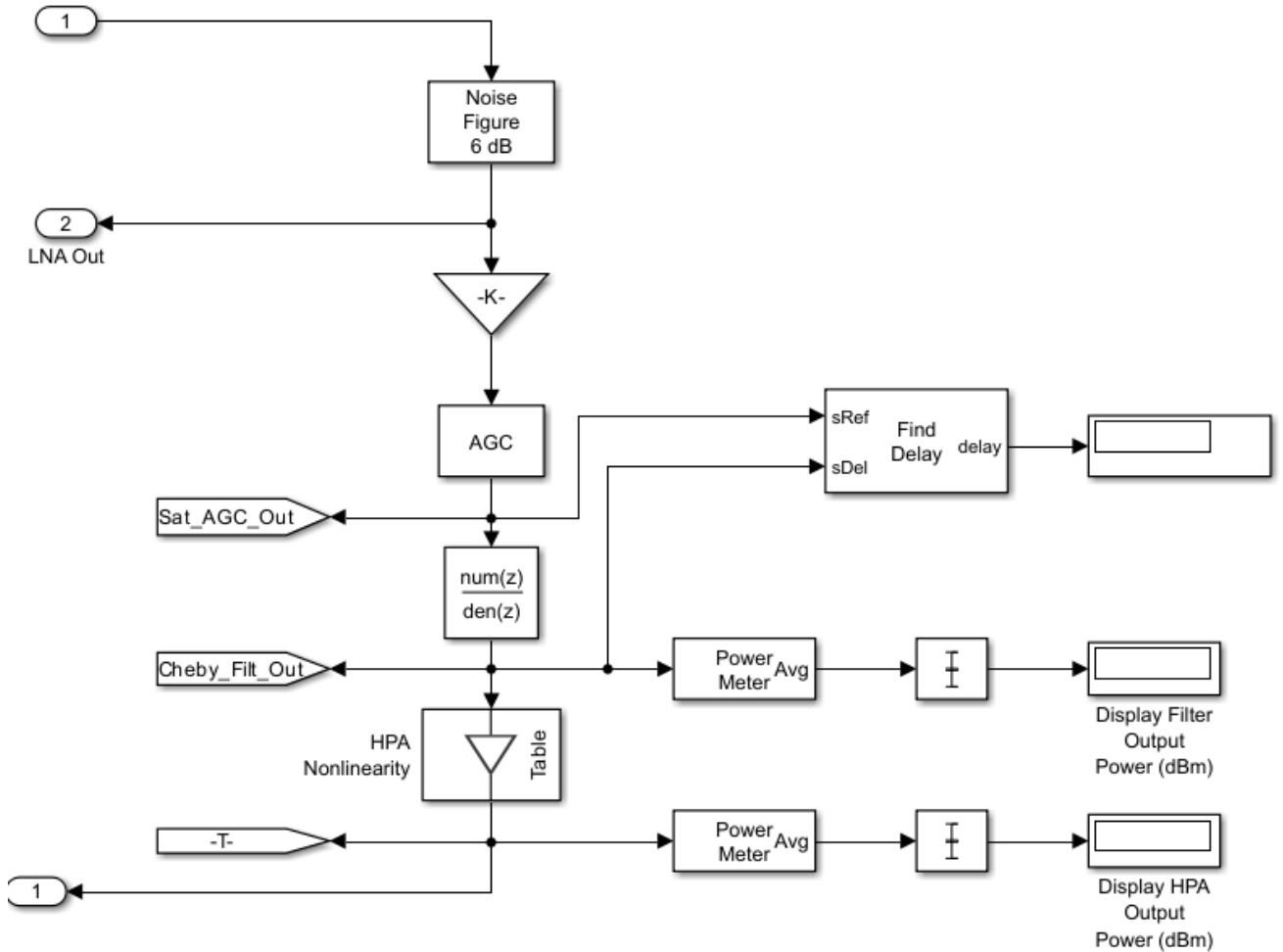


Figura 19: *Onboard processing*.

Un componente a destacar es el filtro Chebyshev, utilizado en comunicaciones satelitales para filtrar señales de radiofrecuencia. Estos filtros tienen una mejor respuesta en frecuencia debido a que poseen una pendiente mayor a costa de un rizado en alguna de sus bandas. La cantidad de ondulación permitida en este tipo de filtros y la pendiente viene determinada por el orden del filtro [15].

El orden de un filtro Chebyshev viene determinado por el grado del polinomio de la función de la respuesta en frecuencia. Afecta a la cantidad de ondulación. Un orden más alto implica una ondulación menor, lo que resulta en una mayor selectividad y una atenuación más pronunciada de las frecuencias no deseadas. Sin embargo, también implica una mayor complejidad en el diseño y la implementación del filtro y como resultado un aumento en el retardo de grupo.

Otros componentes a destacar son el amplificador de alta potencia, ya comentado anteriormente en la estación terrena transmisora, y el AGC (*Automatic Gain Controller*), que es una técnica para ajustar automáticamente la ganancia de una señal en función de su potencia. Su objetivo es mantener la señal dentro de un rango óptimo de amplitud y evitar problemas relacionados con la fluctuación de la potencia de la señal de entrada [16].

El factor de retroceso del amplificador de un satélite, también conocido como *Back-Off* en inglés, se refiere a la cantidad de potencia de la señal que un amplificador reduce o atenúa para evitar alteraciones en la señal de salida.

Tenemos un *back-off* de entrada cuando la señal de entrada al amplificador es excesiva y se reduce la potencia para evitar la distorsión. Por otro lado, podemos considerar el *back-off* de salida como la reducción de la potencia de salida del amplificador para evitar la distorsión que puede ocurrir cuando se opera cerca de su zona no lineal.

Este fenómeno es crucial en los sistemas de comunicación por satélite, donde las señales de entrada pueden variar significativamente en términos de potencia debido a varios factores, como la distancia entre el satélite y la estación terrestre, las condiciones atmosféricas o las interferencias electromagnéticas. El factor de retroceso asegura que el amplificador funcione dentro de sus límites de potencia segura y que la calidad de la señal de salida se mantenga en un nivel adecuado, incluso cuando las condiciones de entrada varían ampliamente, evitando la distorsión en la señal de salida o incluso daños permanentes al componente.

Otro componente es la figura de ruido (*Noise Figure*) que se define como la relación entre la potencia de la señal de entrada al receptor y la potencia de ruido adicional generada por el receptor. Un receptor ideal no agregaría ruido adicional a la señal de entrada, por lo que su figura de ruido sería de 0 dB. En nuestro simulador, es posible variar este parámetro en función de la calidad del receptor que se quiere simular.

3.4. Estación Terrena Receptora

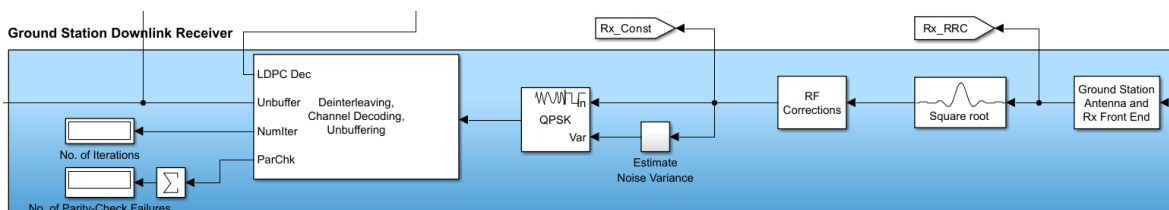


Figura 20: Diagrama de bloques de la estación terrena receptora [11].

Se pueden distinguir las siguientes partes:

- Antena y receptor (*Ground station antenna and RX Front End*): éste está subdi-

vidido en distintos bloques que se pueden observar en la Figura 21.

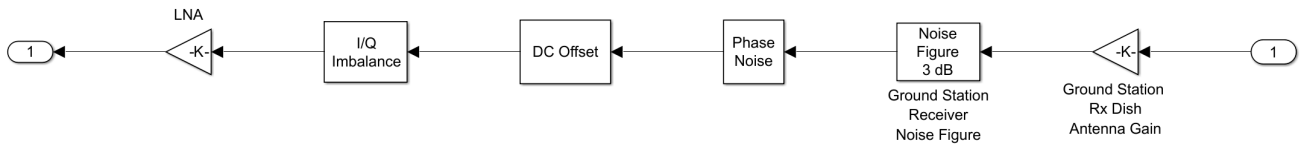


Figura 21: Esquema del receptor simulado.

A continuación se detallan los bloques de la Figura 21:

- La figura de ruido ya mencionada en la descripción del diagrama de bloques del satélite.
 - El ruido de fase (*Phase Noise*) se refiere a las fluctuaciones aleatorias en la fase; puede introducir distorsiones en la señal transmitida, lo que dificulta la detección y decodificación precisa de la información. También puede afectar a la calidad de la señal recibida, especialmente en sistemas de alta velocidad o en aplicaciones sensibles a la precisión de la fase, como la transmisión de datos digitales. El ruido de fase es causado por diversas fuentes, como el ruido térmico, fluctuaciones en los componentes electrónicos, interferencias electromagnéticas y otros efectos ambientales.
 - Desplazamiento en la parte continua (*DC offset*) es una variación de corriente no deseada presente en una señal de corriente alterna o voltaje. Puede causar distorsiones y dificultades en el procesamiento de señales, pero se puede corregir mediante técnicas de filtrado y amplificación adecuadas [17].
 - El desbalance (*Imbalance In-Phase/Quadrature*) se refiere a las discrepancias o desviaciones entre las componentes I/Q de una señal modulada en amplitud y frecuencia. Puede causar distorsiones y degradación en el rendimiento del sistema de comunicación, pero se pueden utilizar técnicas de compensación para minimizar estos efectos [18].
 - Amplificador de bajo ruido (LNA, *Low-Noise Amplifier*) es un componente electrónico utilizado para amplificar señales débiles en sistemas de comunicación y recepción, al mismo tiempo que se mantiene un nivel de ruido mínimo. Su objetivo es aumentar la amplitud de la señal sin introducir una cantidad significativa de ruido adicional [19].
- Correcciones de radiofrecuencia (*RF corrections*): éste está subdividido en distintos bloques que se pueden observar en la Figura 22.



Figura 22: Correcciones de RF.

A continuación se detallan los bloques de la Figura 22:

- Bloqueo de corriente continua (*DC blocking*): es una técnica utilizada para bloquear o eliminar el componente de corriente continua de una señal de corriente alterna. Se logra utilizando capacitores en serie que permiten el paso de la señal AC mientras bloquean el paso de la corriente continua. Esta técnica es utilizada para evitar distorsiones o problemas en el procesamiento de la señal. En nuestro caso el bloqueador no es parametrizable.
 - La corrección de desbalance I/Q se utiliza para compensar las discrepancias entre las componentes I/Q de una señal modulada. Su objetivo es equilibrar y ajustar las componentes I/Q para minimizar los desbalances, lo que ayuda a reducir distorsiones y mejorar el rendimiento del sistema de comunicación.
 - La corrección Doppler compensa los efectos del desplazamiento de frecuencia Doppler en las señales de radiofrecuencia. Su objetivo es restaurar la frecuencia original de la señal y minimizar los efectos de distorsión causados por el movimiento relativo entre la fuente de la señal y el receptor.
- Receptor: consta de un bloque de alineación de tramas *Frame Alignment* que se utiliza para asegurar que las tramas de datos transmitidas en una red se reciban y decodifiquen correctamente, un desentrelazador de bloque general que facilita la detección y corrección de errores en el receptor, así como los correspondientes decodificadores BCH y LDPC.

A lo largo de este capítulo, se han comentado las partes que componen el diagrama de bloques que representan los distintos elementos asociados a la comunicación satelital. En primer lugar, se ha descrito la estación terrena transmisora, que es responsable de enviar las señales al satélite: para ello se precisa simular, entre otros, un equipo transmisor, un modulador, los filtros necesarios para tratar la señal y un amplificador que aumente la potencia de la señal para poderla transmitir hasta el satélite mediante una antena. En segundo lugar, se ha descrito el diagrama de bloques necesario para simular los enlaces, tanto ascendente como descendente. En tercer lugar se ha presentado el diagrama de bloques que simula el satélite y en último lugar el de la estación terrena receptora. En este último apartado, se detallan elementos como generadores de ruido y distorsión, así como sus correspondientes correctores.

A partir del simulador que se ha ido describiendo en este apartado, se han realizado múltiples simulaciones, que podemos observar en el capítulo 4. Los distintos resultados, se representan en forma de gráficas e imágenes.

4. Simulaciones y Resultados

Tal como hemos indicado anteriormente, los resultados de las simulaciones que vienen a continuación se han obtenido mediante Simulink, un entorno de programación visual que funciona sobre Matlab. Éste está basado en bloques que permite modelar sistemas complejos de forma fácil y rápida. Se ha utilizado una demo ya existente, basada en el modelo *bent pipe*, para simular la transmisión de la señal de comunicación por satélite entre dos puntos alejados de la Tierra.

El simulador es parametrizable en numerosos campos, habiéndose utilizado por defecto los valores de la Figura 23 .

	Parámetros	Valores
Uplink	Mode	QPSK 1/4
	Seed (for random data and noise)	25
	LDPC frame length	Normal
	Digital Predistorsion	NO
	Uplink frequency (GHz)	4
	HPA backoff level	30 dB (negligible nonlinearity)
	Transmit antenna diameter (m)	8
	Doppler Error (Hz)	0
Satellite	Satellite altitude (km)	35600
	Receive antenna diameter (m)	2
	Receiver noise figure (dB)	6
	Chebyshev filter order	4
	HPA backoff level (dB)	4
	Downlink frequency (GHz)	4,2
	Transmit antenna diameter (m)	2
Downlink	Receive antenna diameter (m)	8
	Receiver noise figure (dB)	3
	Phase noise	Negligible (-100 dBc/Hz @ 100Hz)
	I/Q amplitude imbalance (dB)	0
	I/Q phase imbalance (deg)	0
	In-phase DC offset (%)	0
	DC offset correction	NO
	I/Q imbalance correction	NO
	Doppler correction	NO
	Number of LDPC decoder iterations	50

Figura 23: Valores por defecto en las simulaciones.

Además, no se han utilizado estrategias para la compensación de los errores producidos por diversos efectos como el efecto Doppler el desbalance de la señal, etc., excepto en las simulaciones dedicadas a ellos.

Los parámetros que se han ido variando a lo largo de las distintas simulaciones han sido los indicados en la Figura 24.

Parámetros	
Uplink	Mode
	Uplink frequency (GHz)
	Transmit antenna diameter (m)
	Doppler Error (Hz)
Satellite	Satellite altitude (km)
	Receive antenna diameter (m)
	Chebyshev filter order
	HPA backoff level (dB)
	Downlink frequency (GHz)
	Transmit antenna diameter (m)
Downlink	Receive antenna diameter (m)
	I/Q amplitude imbalance (dB)
	I/Q phase imbalance (deg)
	In-phase DC offset (%)
	DC offset correction
	I/Q imbalance correction
	Doppler correction

Figura 24: Parámetros Variables.

Se ha simulado un periodo de 0,025s, lo que implica que se han generado entre $1,7 \cdot 10^6$ y $2,7 \cdot 10^6$ bits, dependiendo de la modulación y codificación. El detalle se puede observar en la Figura 25.

La duración de la simulación se limitó a 0,025 segundos debido a la complejidad del sistema modelado en Simulink, que para llevar a cabo la simulación de estos periodos de tiempo, precisa del orden de minutos para finalizarla. Debido a las numerosas simulaciones que han sido necesarias para realizar este trabajo, ha sido indispensable buscar un compromiso que equilibre la precisión de la simulación con el tiempo de procesamiento y el uso de recursos.

Modo	Bits
qpsk 3/4	1,750E+06
qpsk 9/10	1,750E+06
qpsk 5/6	1,780E+06
qpsk 2/5	1,788E+06
qpsk 3/5	1,788E+06
qpsk 1/4	1,912E+06
8psk 5/6	2,670E+06
8psk 3/4	2,673E+06
8psk 3/5	2,722E+06

Figura 25: Bits simulados según modulación y codificación.

4.1. Resultados al variar el tipo de modulación y codificación

Las primeras simulaciones se han realizado para ver el comportamiento en función de las distintas combinaciones de modulación y codificación de la tasa de error de bit según varía la densidad espectral de potencia de ruido. Debido a que en el simulador no es posible especificar directamente la SNR o la densidad espectral de potencia de ruido, se ha obtenido un rango de relaciones señal-ruido variando el tamaño de las antenas del satélite, entre valores de 1 a 8 metros.

El valor de la densidad espectral de potencia de ruido por bit (E_b/N_0), se ha calculado a partir de los valores EVM_{RMS} extraídos directamente en las simulaciones. En un primer lugar se ha obtenido el valor de la densidad espectral de potencia de ruido por símbolo (E_s/N_0) mediante la Fórmula 7.

$$EVM_{RMS} \approx \sqrt{\frac{N_0}{E_s}} \quad (7)$$

Una vez obtenida la densidad espectral de potencia de ruido por símbolo, se ha calculado la densidad espectral de potencia de ruido por bit, mediante la Fórmula 8, que tiene en cuenta la modulación y la codificación.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{E_s/N_0}{(R_c \cdot \log_2(M))} \quad (8)$$

donde R_c es la tasa de codificación de canal y M el número de símbolos de la constelación.

El resultado se puede observar en las Figuras 26 y 27.

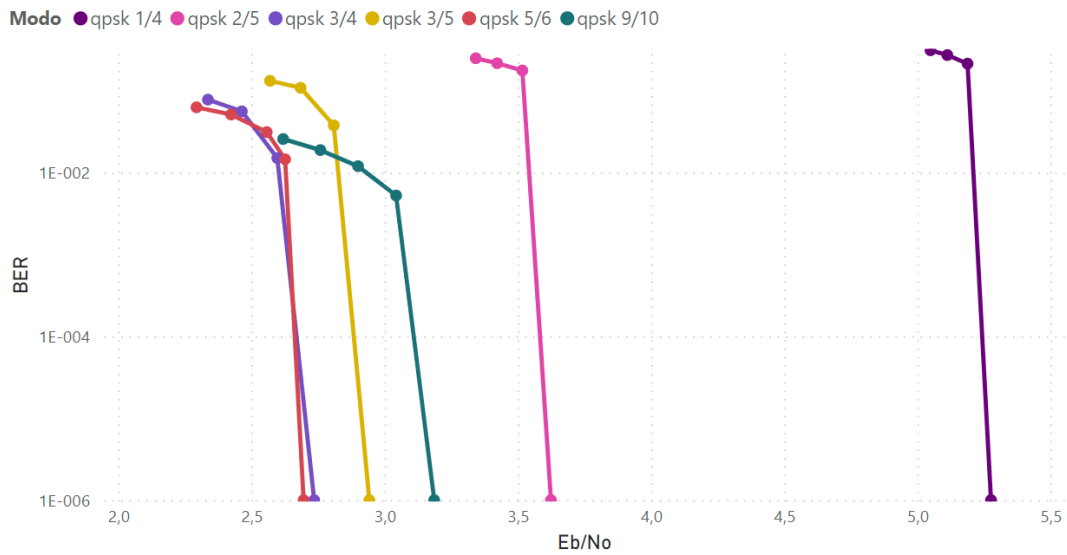


Figura 26: Comparación de la BER en función de E_b/N_0 para diferentes tasas de codificación de canal para la modulación QPSK.

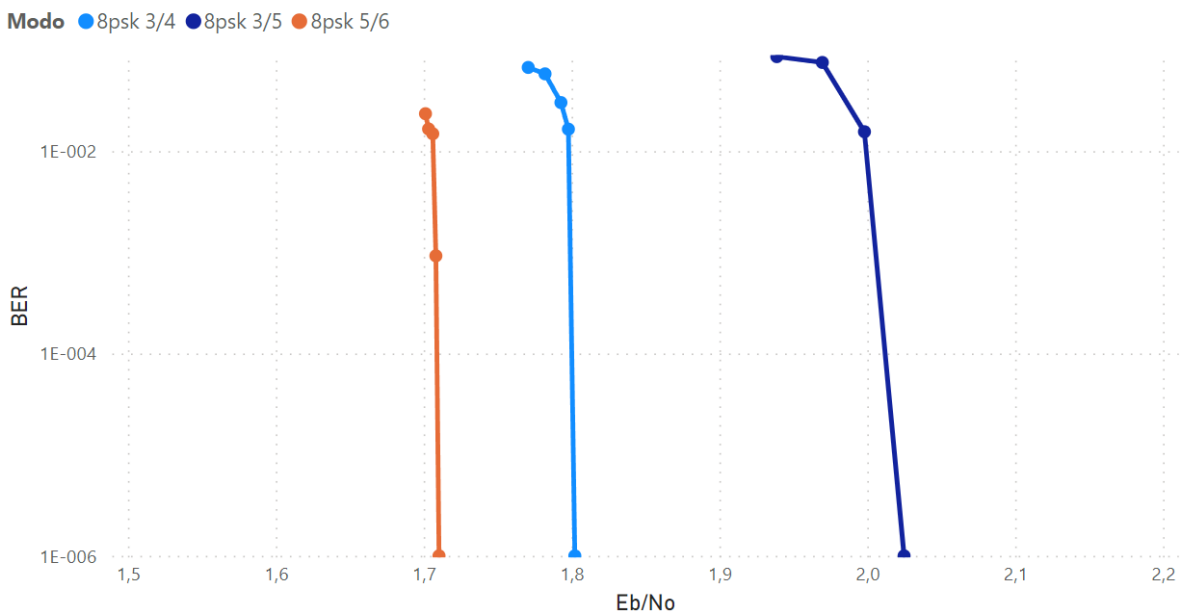


Figura 27: Comparación de la BER en función de E_b/N_0 para diferentes tasas de codificación de canal para la modulación 8PSK.

Para realizar el análisis de esta gráfica, se debe tener en cuenta la variación en la tasa de codificación de los distintos esquemas analizados. Éstos tienen diferentes tasas, lo que significa que transmiten a diferentes regímenes binarios. La tendencia es que, manteniendo la modulación, según aumenta la tasa de codificación es más fácil lograr una BER menor. El aumento de la tasa de codificación implica una mayor BER en términos de SNR debido a una menor capacidad para detectar y corregir errores, pero se traduce en una menor BER si lo relacionamos con la densidad espectral de potencia de ruido por bit, debido a que el número de bits de información no redundante es mayor.

Hay una excepción, que es la QPSK 9/10, la modulación con mayor tasa de codificación y que sin embargo no es la mejor, ya que, aún teniendo un gran porcentaje de bits de información, el mecanismo de detección y corrección de errores parece que no está lo suficientemente optimizado para lograr BER próximos a cero con valores de E_b/N_0 bajos.

La elección del esquema de modulación y de la tasa de codificación debe basarse en las condiciones específicas del canal de comunicación. Si el canal es ruidoso o propenso a errores, es posible que se prefieran esquemas de baja tasa de codificación para garantizar una comunicación confiable, incluso a costa de una menor velocidad de transmisión, aunque hay que tener en cuenta la densidad espectral de potencia de ruido por bit. También en este caso es preferible la utilización de QPSK. Por otro lado, en canales con una SNR suficientemente alta, los esquemas de alta tasa de codificación pueden ofrecer una mayor velocidad de transmisión con una calidad controlada en términos de BER, así como la posibilidad de usar 8PSK que debido al mayor número de bits por símbolo respecto QPSK, proporciona una mayor velocidad.

4.2. Resultados al variar el orden del filtro de Chebyshev

Se han realizado una serie de simulaciones analizando la BER para distintos valores de orden del filtro y modulaciones, dando como resultado las curvas que se pueden observar en las Figuras 28 y 29:

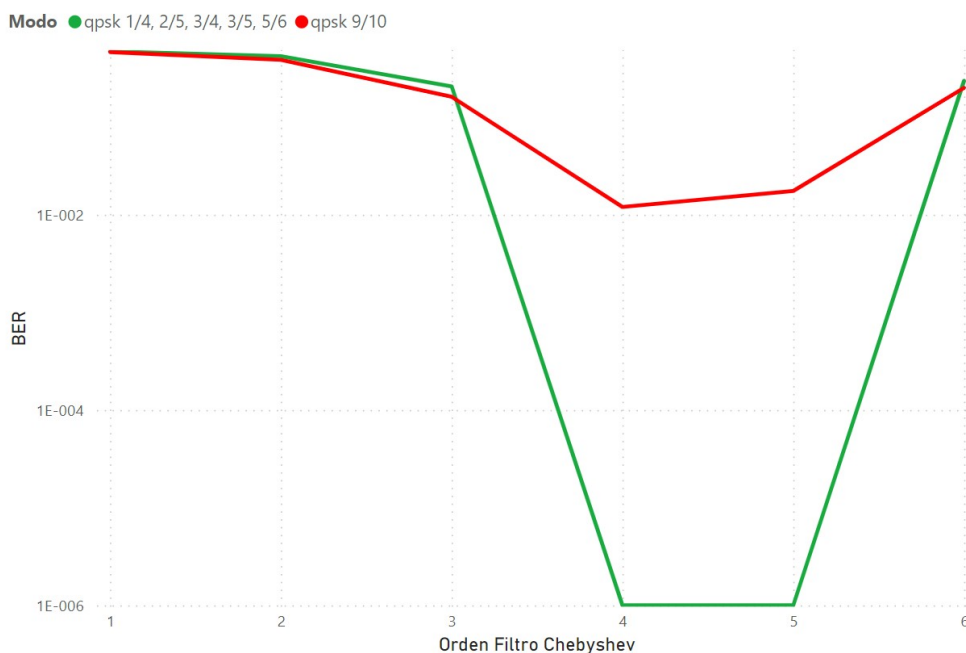


Figura 28: Comparación de la tasa de error de bits (BER) en función del orden del filtro Chebyshev para QPSK.

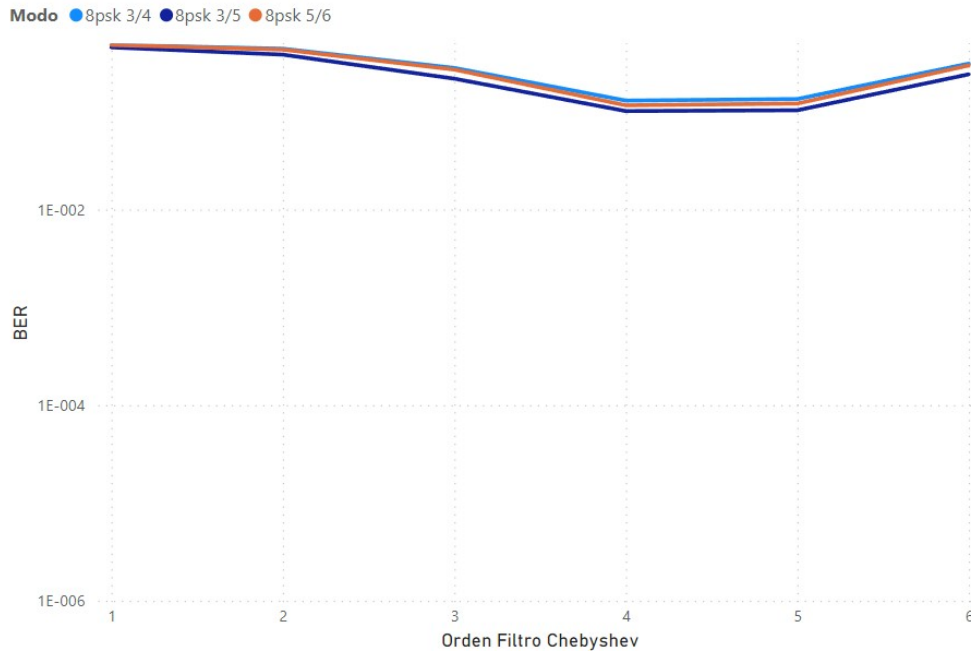


Figura 29: Comparación de la tasa de error de bits (BER) en función del orden del filtro Chebyshev para 8PSK.

Los valores de la BER son aceptables para la modulación QPSK (excepto 9/10) cuando el orden del filtro Chebyshev es de 4 y 5. Respecto la modulación 8PSK se observa, aún siendo cifras inapropiados para una comunicación, una leve mejoría para estos valores. Esto indica que el uso de un filtro Chebyshev de orden 4 o 5 es efectivo para que los esquemas de corrección de errores puedan reducir la tasa de errores de bit.

Comparando las modulaciones, se observa que, en el caso de 8PSK, todos los valores de BER son altos en comparación con los valores de QPSK. Esto se debe a la mayor sensibilidad de 8PSK respecto QPSK, ya que utiliza ocho fases en lugar de cuatro, lo que implica una distancia entre símbolos menor, lo que provoca que la señal sea más susceptible a errores y dependa más de la forma del filtro.

Para valores de orden bajos o altos, tanto el rizado de la banda de paso como la pendiente del filtro apenas afecta. Por el contrario para valores de 4 y 5, se optimiza la forma del filtro.

La respuesta en frecuencia del filtro Chebyshev en función del orden puede observarse en la Figura 30.

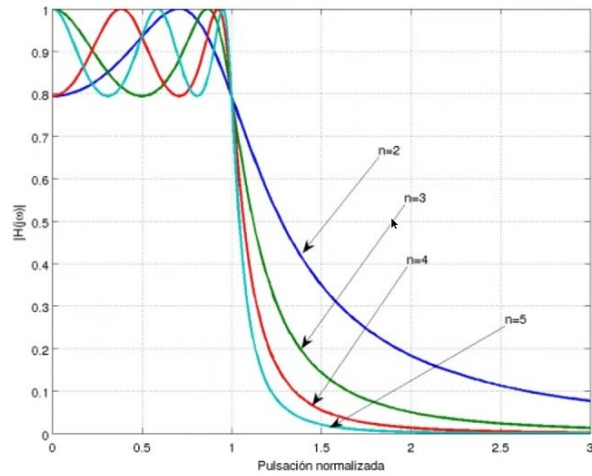


Figura 30: Filtro Chebyshev para distintos órdenes.

En el contexto de las distintas simulaciones llevadas a cabo en este trabajo, es relevante destacar que se ha empleado por defecto un filtro Chebyshev de orden 4. En las figuras anteriores se puede observar que es un valor apropiado, habiéndose obtenido los mejores resultados para cualquier modulación y codificación simuladas.

4.3. Resultados al variar el factor de retroceso

Para determinar cómo afecta el comportamiento del amplificador, se han realizado simulaciones variando la ganancia para las distintas modulaciones y el resultado en términos de BER puede verse en la Figura 31:

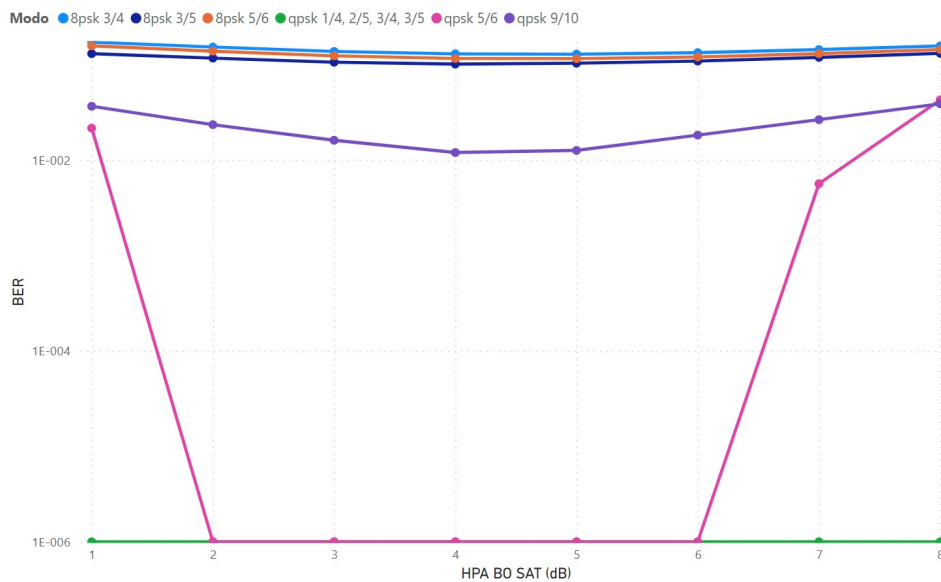


Figura 31: Comparación de la BER en función del retroceso del amplificador del satélite para diversas modulaciones y codificaciones.

En esta gráfica se puede observar que la modulación QPSK muestra un rendimiento sobresaliente en términos de BER para la mayoría de los factores de retroceso (valores entre 1dB y 8dB). Para el número de bits simulado, no se obtienen errores para todos los factores de retroceso, excepto para QPSK 5/6 y QPSK 9/10. Esto sugiere que, para la mayoría de los factores de retroceso, la señal QPSK es robusta y se recibe prácticamente sin errores. Sin embargo, la modulación 8PSK muestra un rendimiento inferior en términos de BER en comparación con QPSK. Todos los valores de la BER en 8PSK superan 0.1, lo que representa una situación en la que el sistema es inservible.

El aumento en el factor de retroceso del amplificador conduce a una señal de menor potencia, lo que disminuye la relación señal a ruido. En una comunicación real, aumentaría la sensibilidad a las interferencias y estos factores combinados contribuirían al aumento de la tasa de errores en la recepción (BER) a medida que aumenta el factor de retroceso del amplificador.

En el contexto de las distintas simulaciones llevadas a cabo en este trabajo, es significativo destacar que se ha empleado por defecto un factor de retroceso del amplificador del satélite de 4dB. Este valor ha sido el que mejores resultados ha obtenido en las simulaciones.

4.4. Resultados al variar la altitud del satélite

Se han realizado simulaciones para observar como evoluciona la BER respecto la altitud, para los diferentes esquemas de modulación y codificación y el resultado puede observarse en la Figura 32:

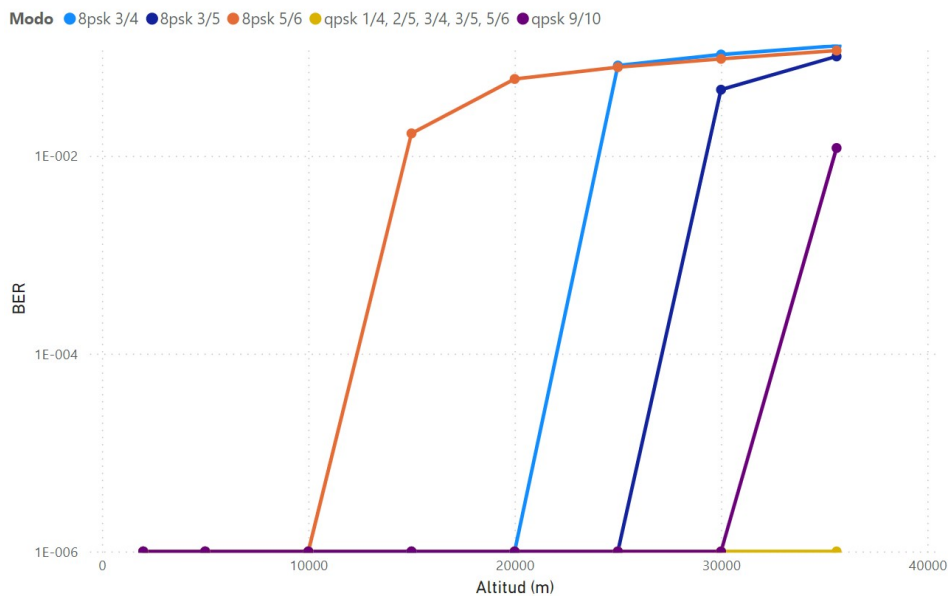


Figura 32: Comparación de la BER en función de la altitud del satélite para diversas modulaciones y codificaciones.

Para los parámetros usados, que son los habituales que ya se han mencionado con anterioridad, no se han obtenido errores para todas las modulaciones QPSK, esto sugiere que tiene un buen funcionamiento a cualquier tipo de altitud. Por el contrario, para la modulaciones 8PSK, a altitudes bajas sí tienen BER prácticamente nula, pero según aumenta ésta, la tasa de error de Bit se incrementa. El aumento de la distancia implica un aumento de la atenuación de la señal, lo que nos indica que la modulación 8PSK es mucho más sensible a ésta que QPSK.

La diferencia de comportamiento entre ambas modulaciones se debe a que la 8PSK no es tan robusta ante variaciones significativas de SNR como QPSK. La 8PSK tiene una constelación más compleja y vulnerable, al tener una distancia mínima menor para igual energía promedio de símbolo y, por tanto, resulta más propensa a errores.

En conclusión, para una mayor altitud del satélite que significa una mayor distancia de la comunicación extremo a extremo y que implica un aumento de la atenuación de la señal, los esquemas QPSK son más robustos, si bien la elección del esquema de modulación debe considerar otros muchos factores.

En el caso de elección de esquemas con modulación 8PSK en altitudes elevadas, habrá que tener en cuenta que se deben utilizar técnicas adicionales para mitigar los errores y, de esta forma, establecer una comunicación viable.

Una de las opciones para mejorar el comportamiento de 8PSK podría ser modificar el tamaño de las antenas transmisoras y receptoras de las estaciones terrenas. A medida que la altitud aumenta, la atmósfera de la Tierra tiene un impacto significativo en la propagación de las señales de comunicación. Las antenas más pequeñas, como la de 2 metros, son más susceptibles a los efectos de la atenuación de la señal debido a su menor ganancia y directividad.

Por el contrario, las antenas más grandes, como la de 8 metros, tienen una mayor ganancia y directividad, ya que pueden enfocar la energía de la señal de manera más efectiva hacia el satélite, lo que reduce la probabilidad de errores en la comunicación a mayores altitudes. Es importante reseñar que las antenas más grandes pueden ser más costosas de implementar y mantener en comparación con las más pequeñas.

Para ver el comportamiento de la tasa de error dependiendo de la altura y el tamaño de antena, se han hecho las simulaciones utilizando 8PSK 3/5, siendo el resultado el que podemos observar en la Figura 33.

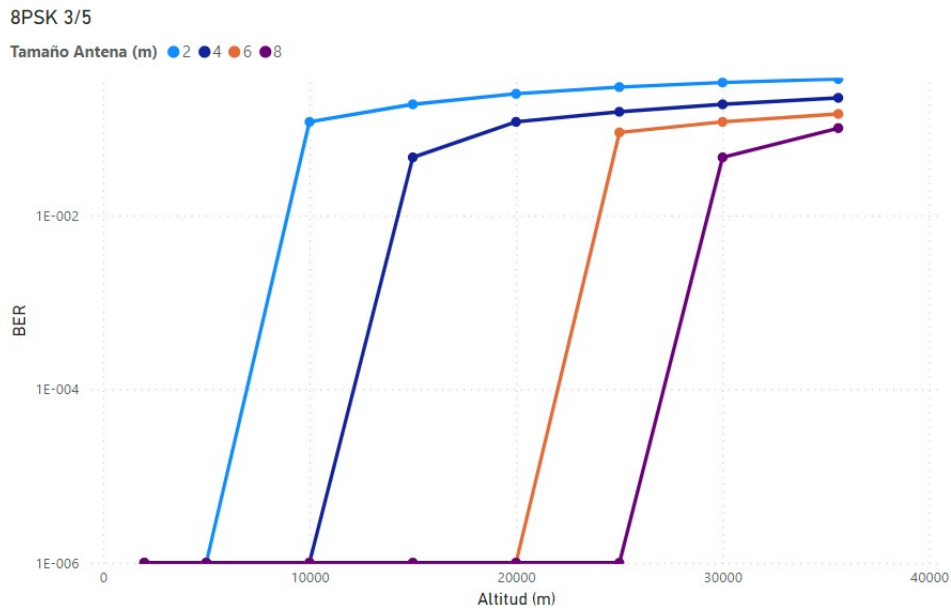


Figura 33: Comparación de la BER en función del tamaño de la antena para una modulación 8PSK 3/5.

Aumentando de 8m a 10m las antenas terrestres, obtenemos en la simulación una BER nula para el número de bits simulados.

Para poder comparar el comportamiento de la variación del tamaño de la antena en 8PSK respecto a QPSK, se ha realizado también la misma simulación pero para QPSK 3/5, pudiendo ver el resultado en la Figura 34.

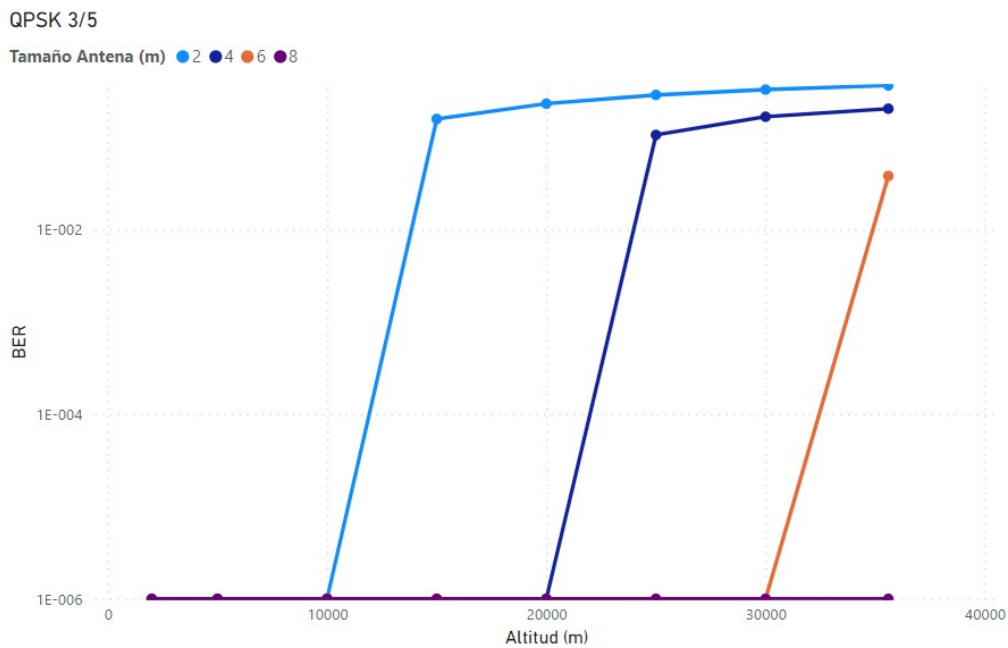


Figura 34: Comparación de la BER en función del tamaño de la antena para una modulación QPSK 3/5.

Comparando las curvas de las figuras 33 y 34 se puede observar claramente que para los mismos tamaños de antena se obtienen para QPSK 3/5 valores menores de BER que para 8PSK 3/5. Esto significa que la modulación 8PSK es más susceptible a la altitud, lo que sugiere que es necesario utilizar un tamaño de antena mayor que si utilizamos QPSK para una misma tasa de BER.

Tal como se ha indicado anteriormente, la modulación 8PSK tiene una mayor eficiencia espectral en comparación con la QPSK, ya que transporta más bits por símbolo, sin embargo esta ventaja puede verse comprometida si utilizásemos el mismo tamaño de antena.

La elección del tamaño de la antena también depende de factores económicos y de disponibilidad de recursos. Debe basarse en un análisis detallado del sistema de comunicación, teniendo en cuenta la altitud, la distancia al satélite o la estación base, el presupuesto de enlace y otros factores relevantes.

Como conclusión, se puede indicar que la selección de la modulación debe adaptarse a las condiciones específicas de la comunicación. A altitudes más bajas, podría ser preferible utilizar 8PSK en lugar de QPSK al no depender tanto del tamaño de antena (o indirectamente del valor de SNR), sin embargo en altitudes mayores, se deberá sopesar los inconvenientes que pueda tener el utilizar 8PSK para tener una calidad de comunicación similar.

4.5. Resultados al variar las frecuencias de enlace ascendente y descendente

Se han realizado diversas simulaciones, manteniendo los parámetros por defecto y variando la frecuencia del enlace ascendente. En todas ellas, durante el periodo de simulación, no ha aparecido ningún error. En un principio se esperaba que el aumento de frecuencia, que implica un aumento de atenuación por la propagación de las ondas en el espacio y en la atmósfera terrestre, afectara a la calidad de la comunicación; sin embargo, no ha sido así. Uno de los factores que puede explicar esto, es que el aumento de frecuencia acarrea un aumento de la ganancia de la antena, suficiente para compensar esa atenuación de la señal.

Tal como podemos observar en la Fórmula 1, la ganancia de la antena depende de $\frac{1}{\lambda^2}$, es decir depende de f^2 , mientras que la atenuación en espacio libre, tal como se observa en la Fórmula 4 depende de f , por lo que al aumentar la frecuencia es mayor el aumento de ganancia de la antena que el de las pérdidas en el espacio libre.

También se han realizado simulaciones modificando la frecuencia del enlace descendente y en este caso sí que hemos obtenido diferentes valores para las distintas frecuencias y las habituales combinaciones de modulación y codificación. Se ha de tener en cuenta que el tamaño por defecto de la antena en el satélite (2m) es menor que el de las estaciones terrenas (8m).

El resultado lo vemos reflejado en las Figuras 35 y 36.

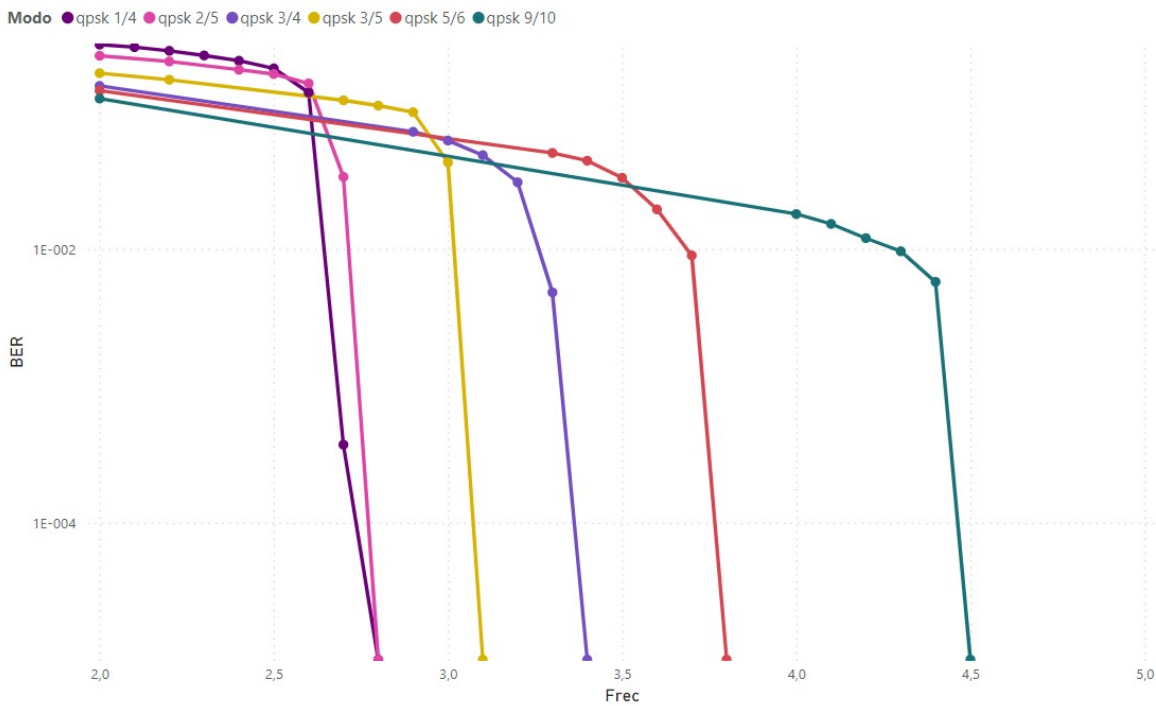


Figura 35: Comparación de la BER en función de la frecuencia del enlace descendente para diversas codificaciones con modulación QPSK.

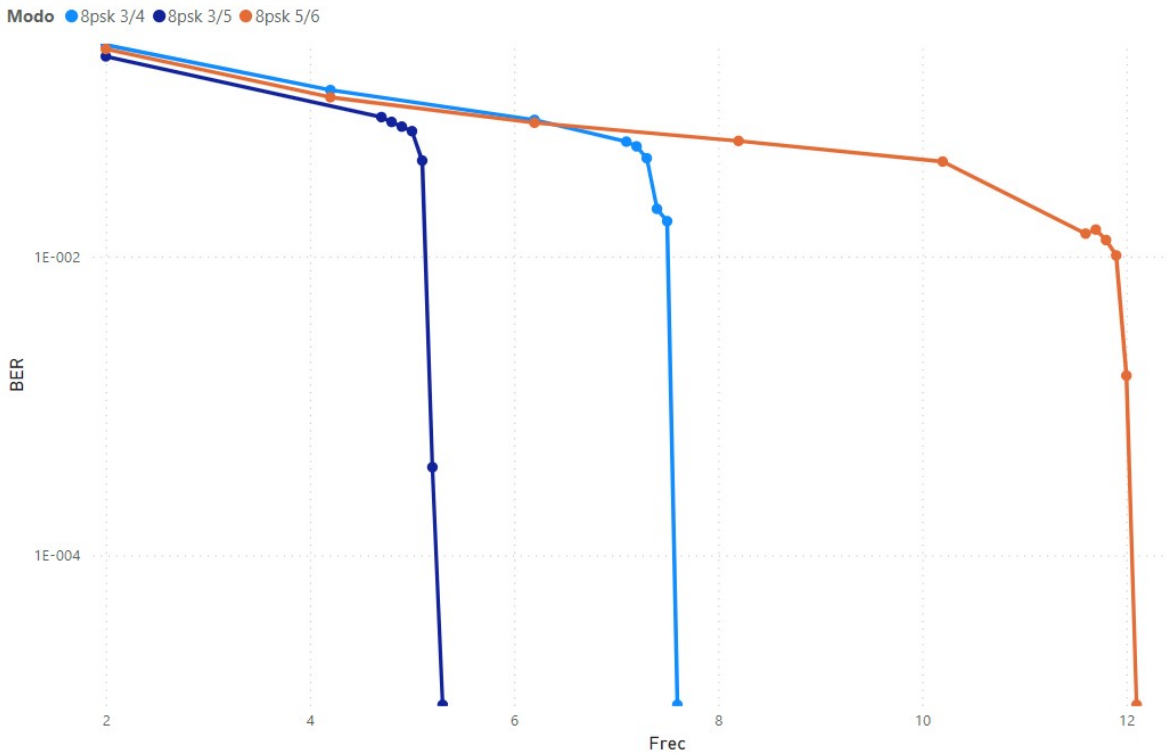


Figura 36: Comparación de la BER en función de la frecuencia del enlace descendente para diversas codificaciones con modulación 8PSK.

En ambas gráficas se puede observar que, al igual que en el caso de las simulaciones realizadas variando la frecuencia ascendente, el aumento de la frecuencia del enlace descendente, que implica un aumento de la atenuación de la señal, no afecta a la calidad de la comunicación, ya que para frecuencias altas no se han recibido errores durante el tiempo de la simulación. Por el contrario, la disminución sí que provoca un efecto umbral en la BER.

Esto se debe al menor tamaño de la antena utilizada en el satélite. Para comprobar el efecto del tamaño de la antena del satélite, se han realizado simulaciones aumentando el tamaño y no se han recibido errores para la cantidad de bits simulados. Esto significa que la elección del tamaño de la antena del satélite debe estar íntimamente ligada a la elección de la frecuencia de la señal utilizada.

4.6. Resultados obtenidos en función de diversos efectos de distorsión, con y sin compensación

Para este apartado, si queremos observar el comportamiento de todos los esquemas vistos hasta ahora, implica la realización de un elevado número de simulaciones y presentación de una cantidad enorme de figuras. Por ese motivo, sin pérdida de generalidad, se ha considerado realizar las simulaciones con únicamente QPSK 3/5.

4.6.1. I/Q Amplitude Imbalance (dB)

Respecto los sistemas de comunicación digital, *I/Q Amplitude Imbalance* (Desbalance de Amplitud I/Q) se refiere a la discrepancia entre las amplitudes de las señales en fase (I) y en cuadratura (Q). Cuando este desbalance es cero, las amplitudes de las señales I y Q están proporcionadas correctamente. Sin embargo, en situaciones reales, debido a imperfecciones en el hardware o en el canal de comunicación (interferencias electromagnéticas o condiciones ambientales), existe desbalance en estas amplitudes. Esta diferencia de amplitud entre las componentes I y Q de la señal, medida en dBs, es el parámetro que modificamos para la obtención de la gráfica [26].

Tal como se ha indicado anteriormente, se ha considerado una única modulación y codificación, la QPSK 3/5. Se ha variado los niveles de desbalance para observar el comportamiento de la tasa de error de bit y el resultado puede verse en la Figura 37.

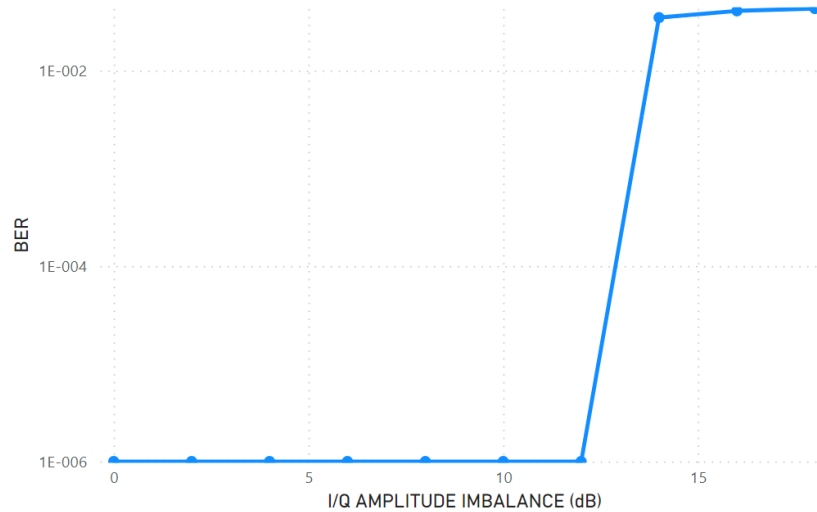


Figura 37: Comparación de la BER en función del Desbalance de Amplitud I/Q para la modulación QPSK 3/5 Sin corrector.

Se puede observar que para valores inferiores a 14 dB, no se han obtenido bits erróneos durante el tiempo de la simulación. Esto sugiere que el sistema de comunicación es robusto ante pequeños desbalances de amplitud, ya que los errores de bit son prácticamente nulos en este rango. Es a partir de este punto donde comienza a aumentar significativamente, marcando la transición entre un funcionamiento prácticamente libre de errores a un aumento notable en los errores de bit.

Los resultados obtenidos al aplicar un corrector de desbalance I/Q se pueden ver en la Figura 38.

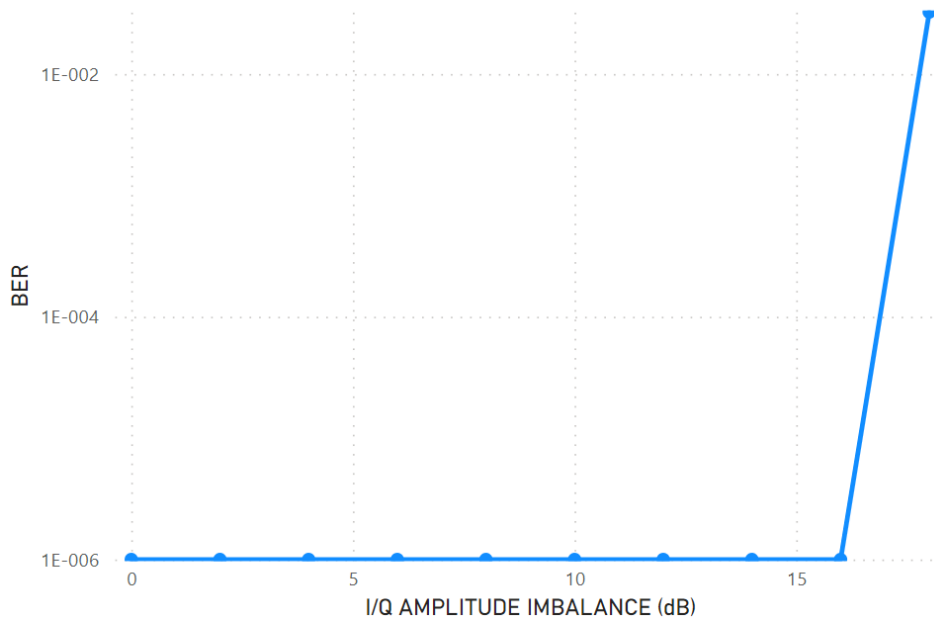


Figura 38: Comparación de la BER en función del Desbalance de Amplitud I/Q para la modulación QPSK 3/5 con corrector.

Se puede observar claramente que el punto de aumento de la BER se desplaza hasta los 16 dB. Esto significa que el corrector ha logrado mitigar el efecto del desequilibrio para una diferencia de amplitudes de las componentes I y Q mayor. Como resultado, los símbolos de la constelación para un desbalance de 16 dB se han restaurado a su forma original, permitiendo una recepción y decodificación precisa de los datos, independientemente del desequilibrio en las amplitudes.

Las constelaciones recibidas para 16dB, en los casos sin y con corrección de desbalance I/Q, se puede visualizar en las Figuras 39 y 41, respectivamente.

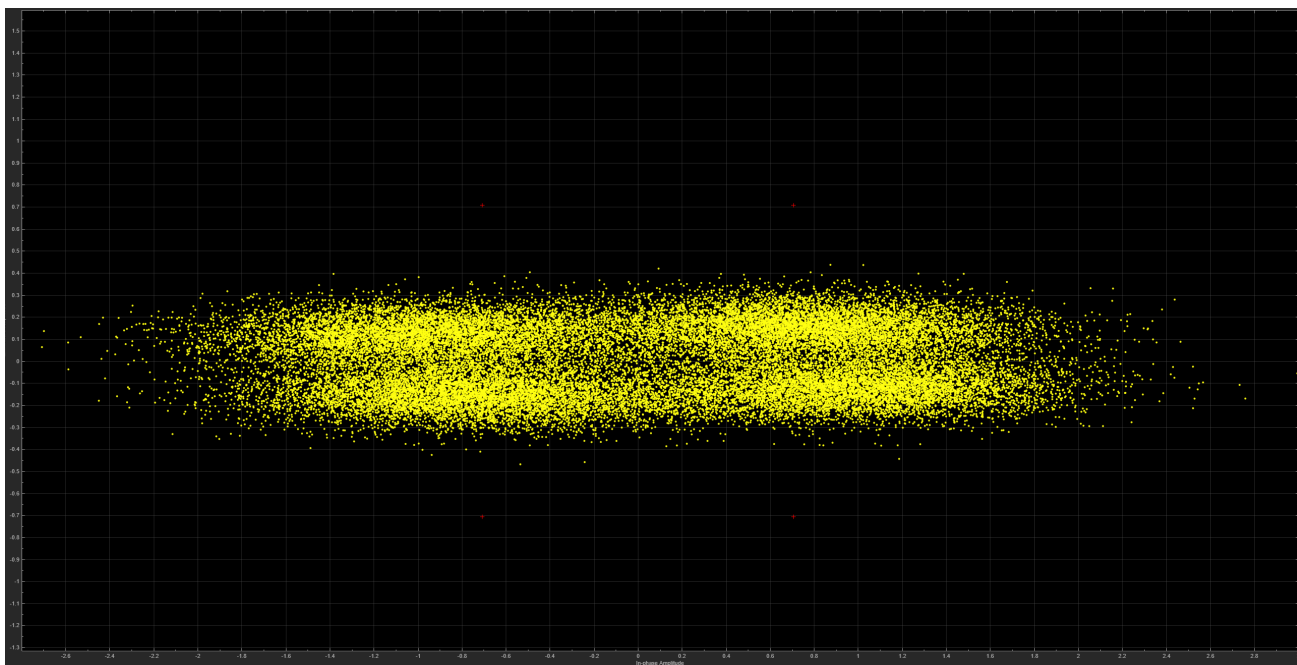


Figura 39: Constelación recibida sin corrección.

Los valores de EVM obtenidos para este caso son los mostrados en la Figura 40.

EVM / MER	Values
RMS EVM (%)	75.69
Peak EVM (%)	238.00
Avg EVM (dB)	-2.42
Peak EVM (dB)	7.53
Avg MER (dB)	2.42

Figura 40: Valores sin corrección.

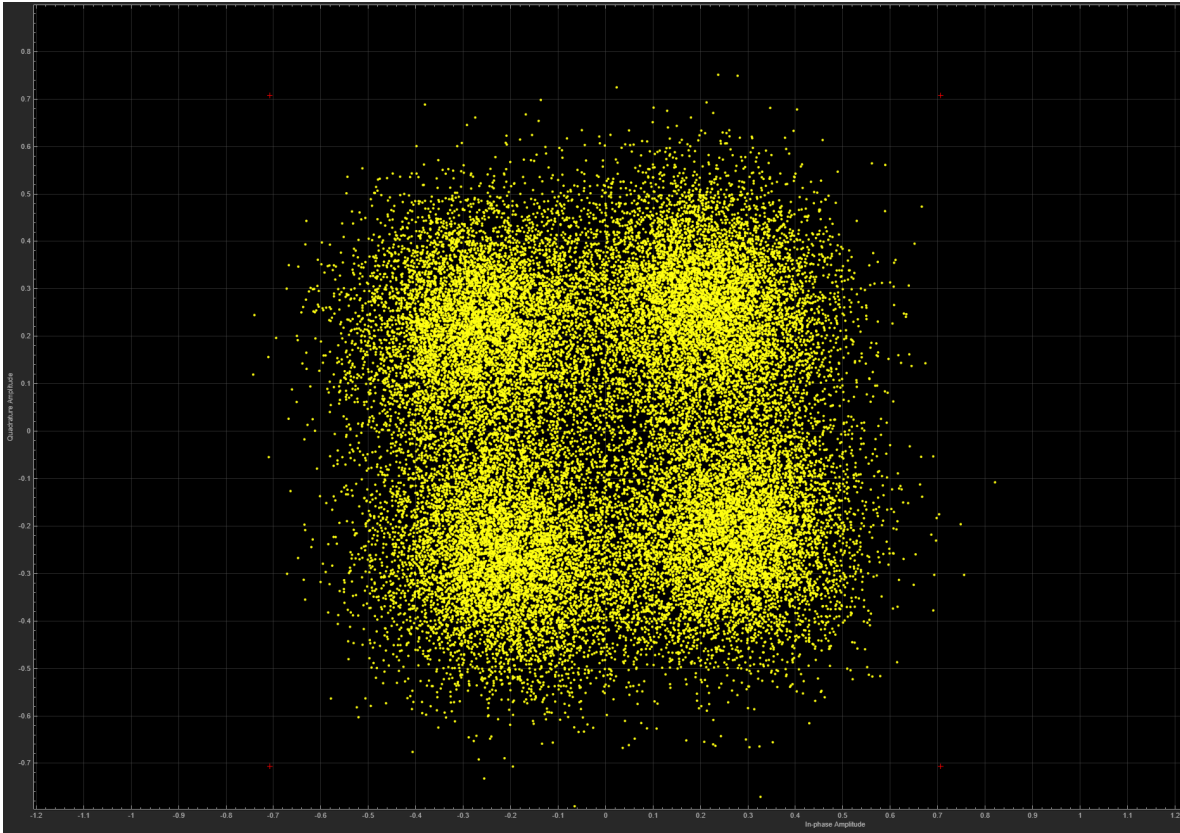


Figura 41: Constelación recibida con corrección.

Los valores de EVM obtenidos para este caso son los mostrados en la Figura 42.

EVM / MER	Values
RMS EVM (%)	68.59
Peak EVM (%)	99.62
Avg EVM (dB)	-3.27
Peak EVM (dB)	-0.03
Avg MER (dB)	3.27

Figura 42: Valores con corrección.

En la Figura 39 se muestra una constelación con una dispersión amplia y difusa, lo que indica un alto nivel de error o ruido. En la Figura 41, se observa que la constelación es mejor debido a la concentración y definición de la señal.

Esto se refleja en los valores de EVM (*Error Vector Magnitude*), que mide la diferencia entre los puntos ideales y los puntos recibidos en la constelación. En las imágenes podemos observar que su valor promedio (*Avg EVM*) disminuye de -2,42dB a -3,27dB, lo que significa que la calidad de la señal está mejorando. En otras palabras, los errores entre la señal transmitida y la señal recibida están disminuyendo, obteniendo una

comunicación más precisa y confiable. Un EVM más bajo puede traducirse en una tasa de error de bit más baja.

También se refleja en los valores de MER (*Modulation Error Ratio*), que es la relación entre la potencia promedio de la señal ideal y la potencia del error. En las imágenes podemos observar que su valor promedio (*Avg MER*) aumenta de 2,42dB a 3,27dB, lo que significa que la calidad de la señal está mejorando. En otras palabras, los errores entre la señal transmitida y la señal recibida están disminuyendo, obteniendo una comunicación más precisa y confiable. Un MER mayor puede traducirse en una tasa de error de bit más baja.

4.6.2. I/Q Phase Imbalance (deg)

Respecto los sistemas de comunicación digital, I/Q Phase Imbalance se refiere a la discrepancia entre las fases de las señales en fase (I) y en cuadratura (Q). Cuando este desbalance es cero, las fases de las señales I y Q son iguales. Sin embargo, en situaciones reales, tal como ocurría en el desbalance por amplitud, debido a imperfecciones en el hardware o en el canal de comunicación (interferencias electromagnéticas o condiciones ambientales), aparece un desbalance. En los ejes I y Q se proyectan las señales sobre señales base que no son ortogonales.

Para analizar el comportamiento del corrector de desbalance, se han simulado comunicaciones QPSK 3/5 para distintos valores de desbalance de fase. El resultado puede verse en la Figura 43.

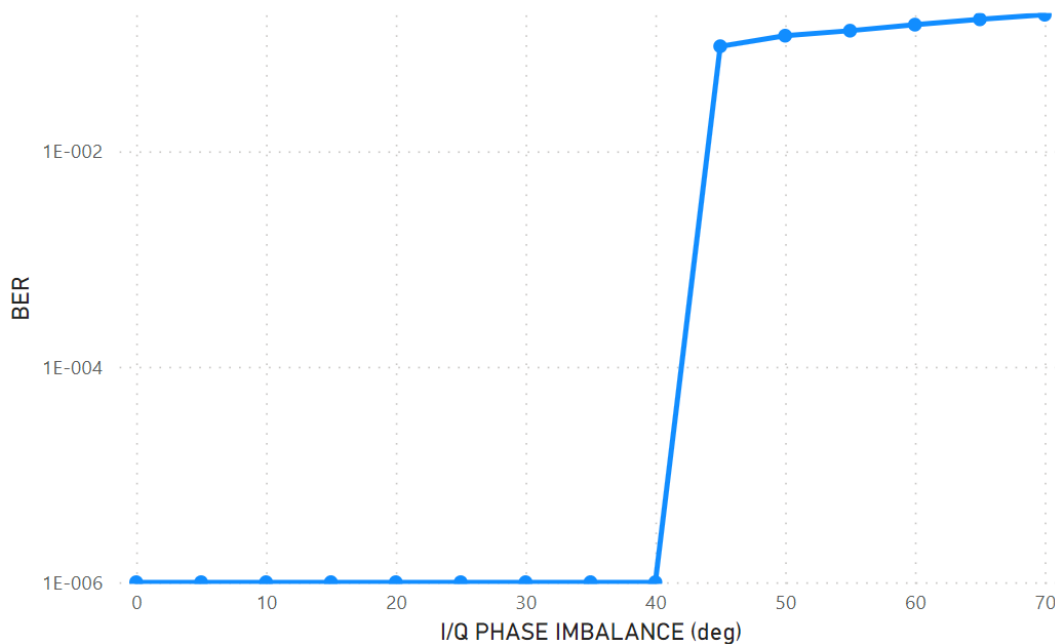


Figura 43: Comparación de la BER en función del Desbalance de fase I/Q para la modulación QPSK 3/5 sin corrector.

Se puede observar que no se han recibido bits erróneos, para el tiempo y número de bits simulados, para desigualdades de fase inferiores a 45 grados. Esto sugiere que el sistema puede tolerar cierto grado de desigualdad en fase sin introducir errores de bit significativos. Sin embargo, a partir de 45 grados de desigualdad en fase, la BER comienza a aumentar de forma significativa, siendo este valor un punto crítico, que debe ser controlado para garantizar una transmisión de datos confiable.

Para comprobar cómo afecta el corrector de desbalance se han realizado simulaciones bajo las mismas condiciones, pero con éste activado. El resultado se puede ver la Figura 44.

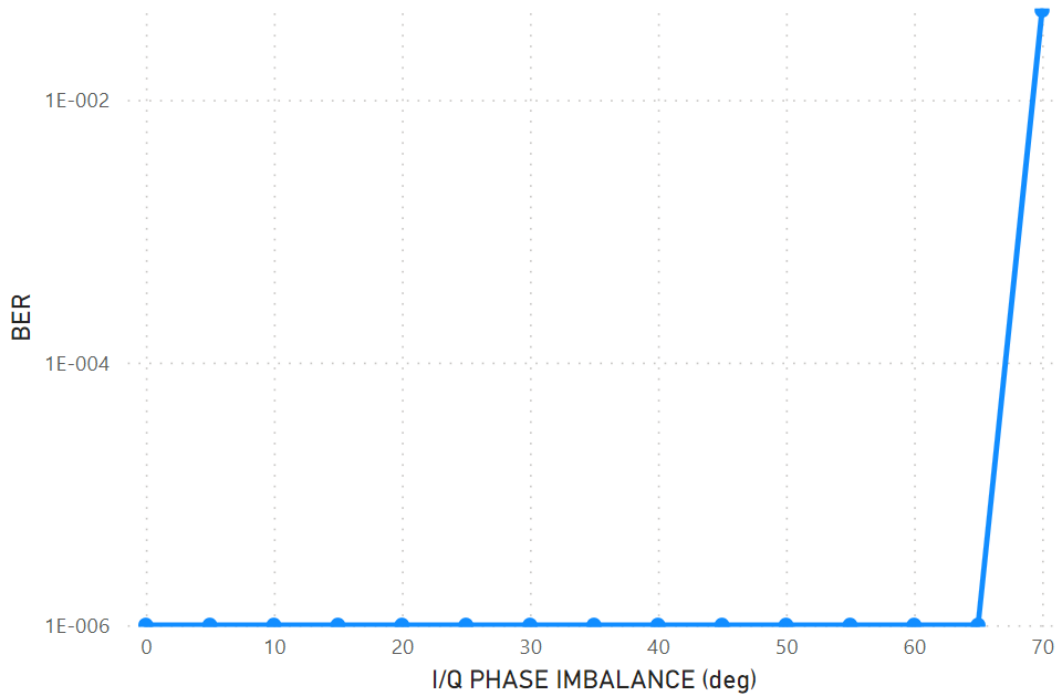


Figura 44: Comparación de la BER en función del Desbalance de fase I/Q para la modulación QPSK 3/5 con corrector.

En esta segunda gráfica, donde se ha aplicado un corrector de desequilibrio I/Q, no se reciben bits erróneos durante el tiempo simulado para todos los valores hasta 65 grados. Esto sugiere que el corrector de desequilibrio I/Q está funcionando efectivamente al eliminarlo en la señal antes de la demodulación. El corrector ha ajustado las componentes de la señal de manera que las distorsiones introducidas se han eliminado completamente. Esto es esencial para sistemas de comunicación, especialmente en entornos donde las condiciones de transmisión no son ideales y pueden introducir desequilibrios en la señal.

Todo ello se puede observar claramente en las Figuras 45 y 47, que representan las constelaciones recibidas para un desbalance I/Q de fase de 45 grados, sin y con corrector respectivamente.

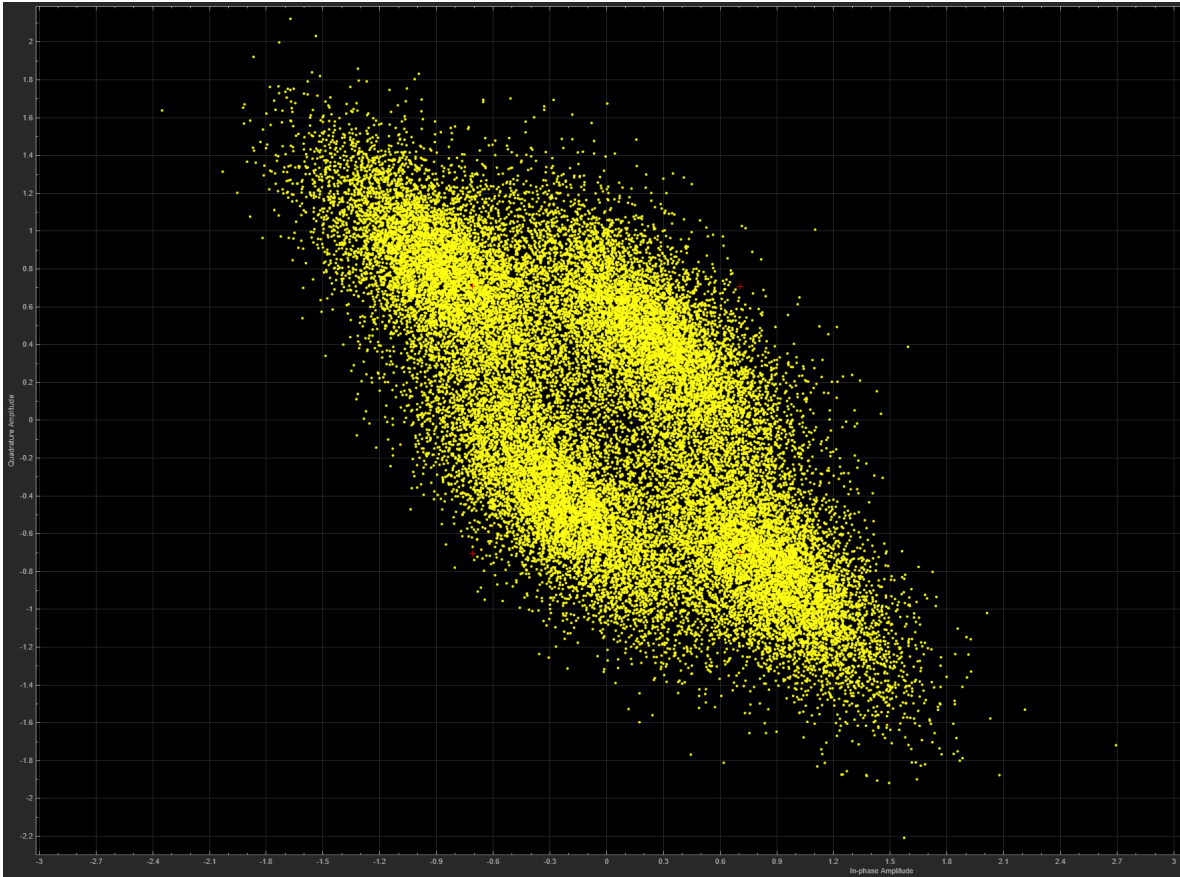


Figura 45: Constelación recibida sin corrección.

Los valores de EVM obtenidos para este caso son los mostrados en la Figura 46.

EVM / MER	Values
RMS EVM (%)	54.66
Peak EVM (%)	223.18
Avg EVM (dB)	-5.25
Peak EVM (dB)	6.97
Avg MER (dB)	5.25

Figura 46: Constelación recibida sin corrección.

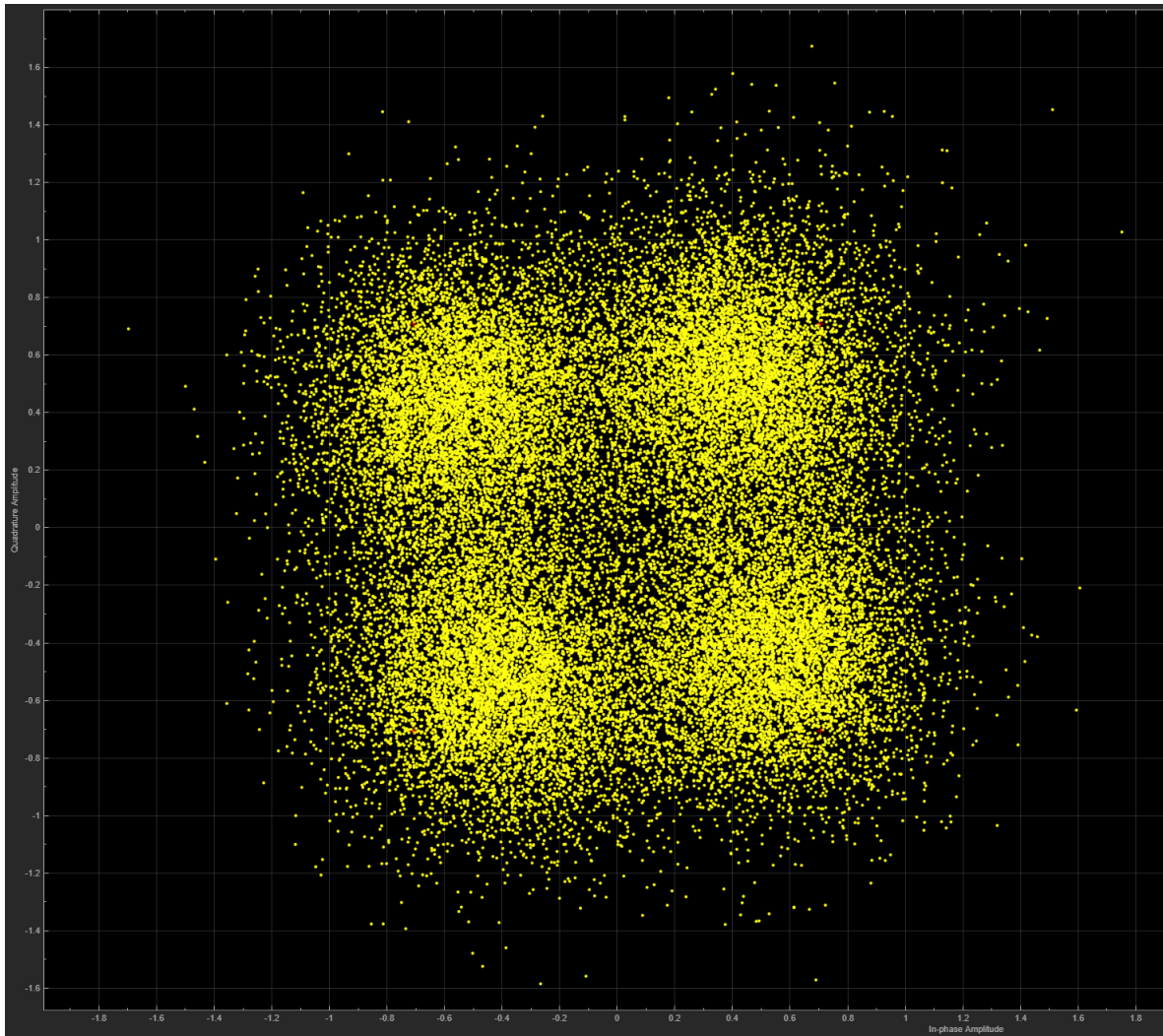


Figura 47: Constelación recibida con corrección.

Los valores de EVM obtenidos para este caso son los mostrados en la Figura 48.

EVM / MER	Values
RMS EVM (%)	48.54
Peak EVM (%)	130.44
Avg EVM (dB)	-6.28
Peak EVM (dB)	2.31
Avg MER (dB)	6.28

Figura 48: Constelación recibida con corrección.

Lo comentado anteriormente se refleja en los valores promedio de EVM, donde disminuye de -5,25dB a -6,28dB. Lo mismo ocurre observando los valores promedio de MER, donde aumenta de 5,25dB a 6,28dB.

También hay que tener en cuenta que, cuando las señales I y Q no están separadas exactamente 90 grados, la constelación se vuelve inclinada o trapezoidal.

4.6.3. In-Phase DC Offset (%)

Otro de los problemas que afectan a la transmisión es el desplazamiento en la componente de fase de la señal modulada (*In-Phase DC Offset*). Un desplazamiento en fase puede ser causado por varias condiciones en un sistema de comunicación, como desequilibrios en los componentes del transmisor o del receptor. En un sistema xPSK, las señales se representan como puntos en un diagrama de constelación y cualquier desplazamiento en una de las componentes (en este caso, la componente en fase) puede llevar a errores de decodificación.

Para ver el comportamiento del corrector de fase, se han realizado simulaciones usando QPSK 3/5, variando este parámetro. El resultado puede verse en la Figura 49.

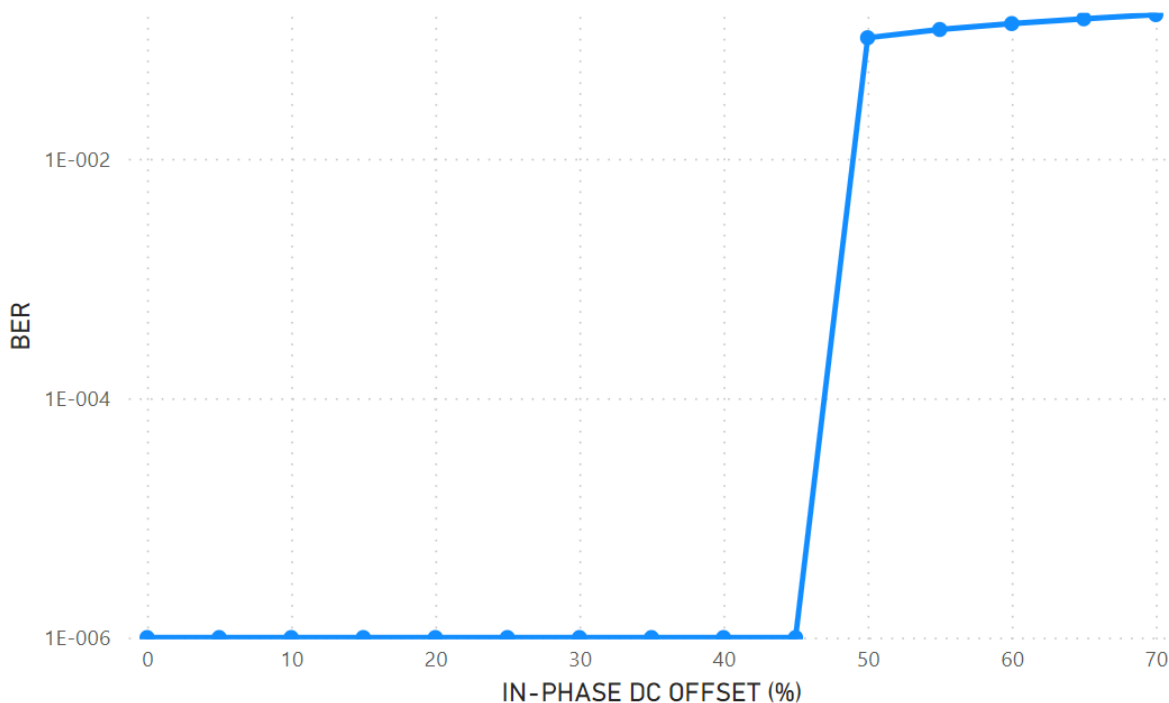


Figura 49: Comparación de la BER en función del desplazamiento en la componente de fase de la señal modulada para la modulación QPSK 3/5 sin corrector.

Se puede observar que cuando el *In-Phase DC Offset* está por debajo del 50%, los símbolos pueden ser demodulados con precisión y no se han obtenido errores para el tiempo y número de bits simulados. Por el contrario, cuando el *In-Phase DC Offset* supera el 50%, la señal se desplaza lo suficiente como para que los símbolos puedan ser mal interpretados durante la demodulación, lo que conduce a errores de bit. Esto se refleja en el aumento de la BER a partir del 50% de *In-Phase DC Offset*, debido a

que el receptor no puede distinguir correctamente entre las diferentes fases de la señal debido al desplazamiento excesivo.

Repetidas las simulaciones anteriores, aplicando el corrector correspondiente, no se ha conseguido obtener ningún bit erróneo.

Tras aplicar un corrector de DC offset, es decir implementando técnicas para eliminar o reducir significativamente el efecto del offset en la señal, no se han recibido bits erróneos para todos los valores simulados de *In-Phase DC Offset* (hasta 70%). Esto indica que, después de aplicar la corrección, la señal de salida está libre de errores de bit causados por el offset en la componente en fase.

Las gráficas de la constelación recibida para un valor de *In-Phase DC Offset* de 50%, sin y con corrector, donde se observa la corrección realizada, se pueden ver en las Figuras 50 y 52.

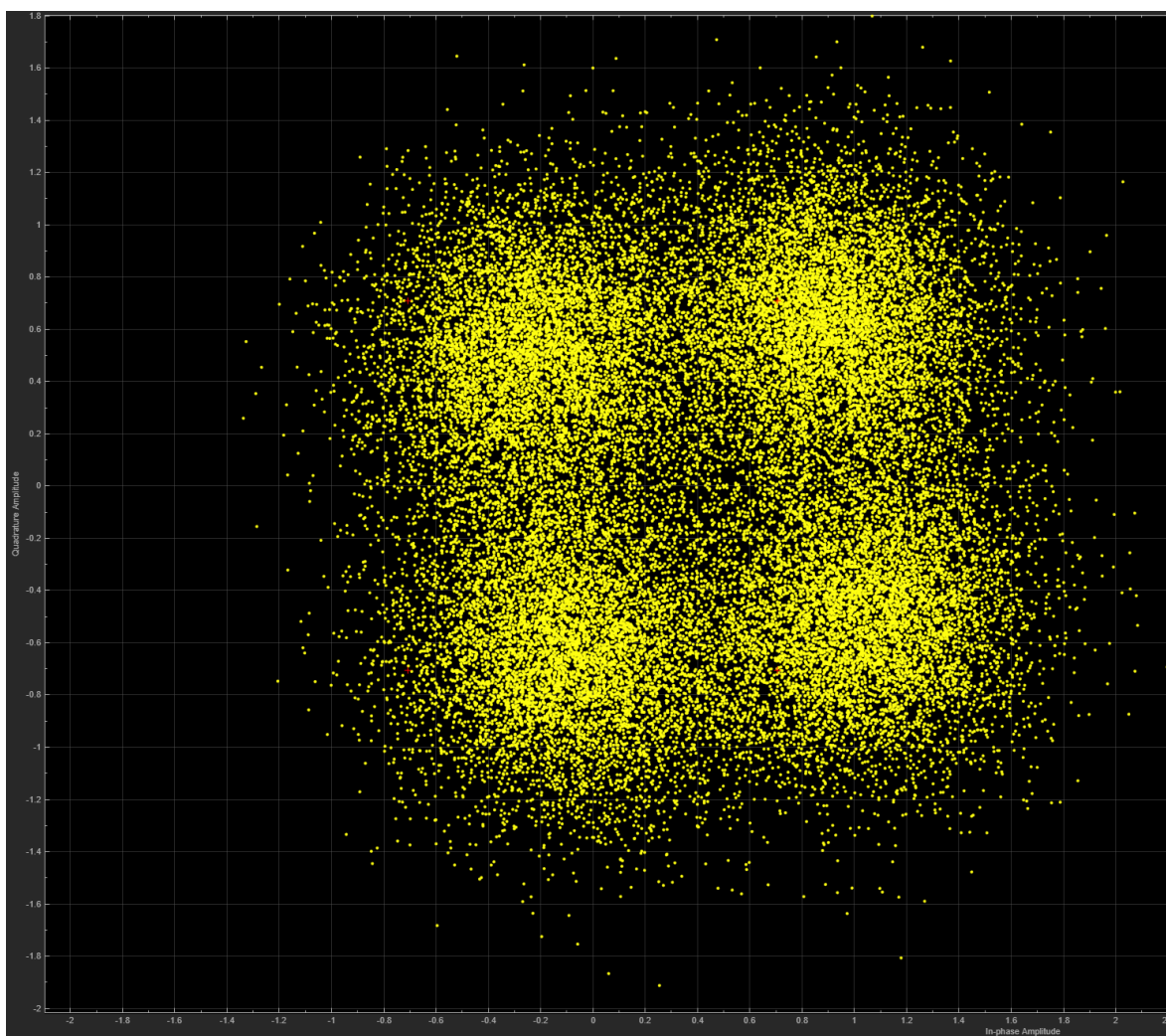


Figura 50: Constelación recibida sin corrección.

Los valores de EVM obtenidos para este caso son los mostrados en la Figura 51.

EVM / MER	Values
RMS EVM (%)	55.30
Peak EVM (%)	167.80
Avg EVM (dB)	-5.15
Peak EVM (dB)	4.50
Avg MER (dB)	5.15

Figura 51: Constelación recibida sin corrección.

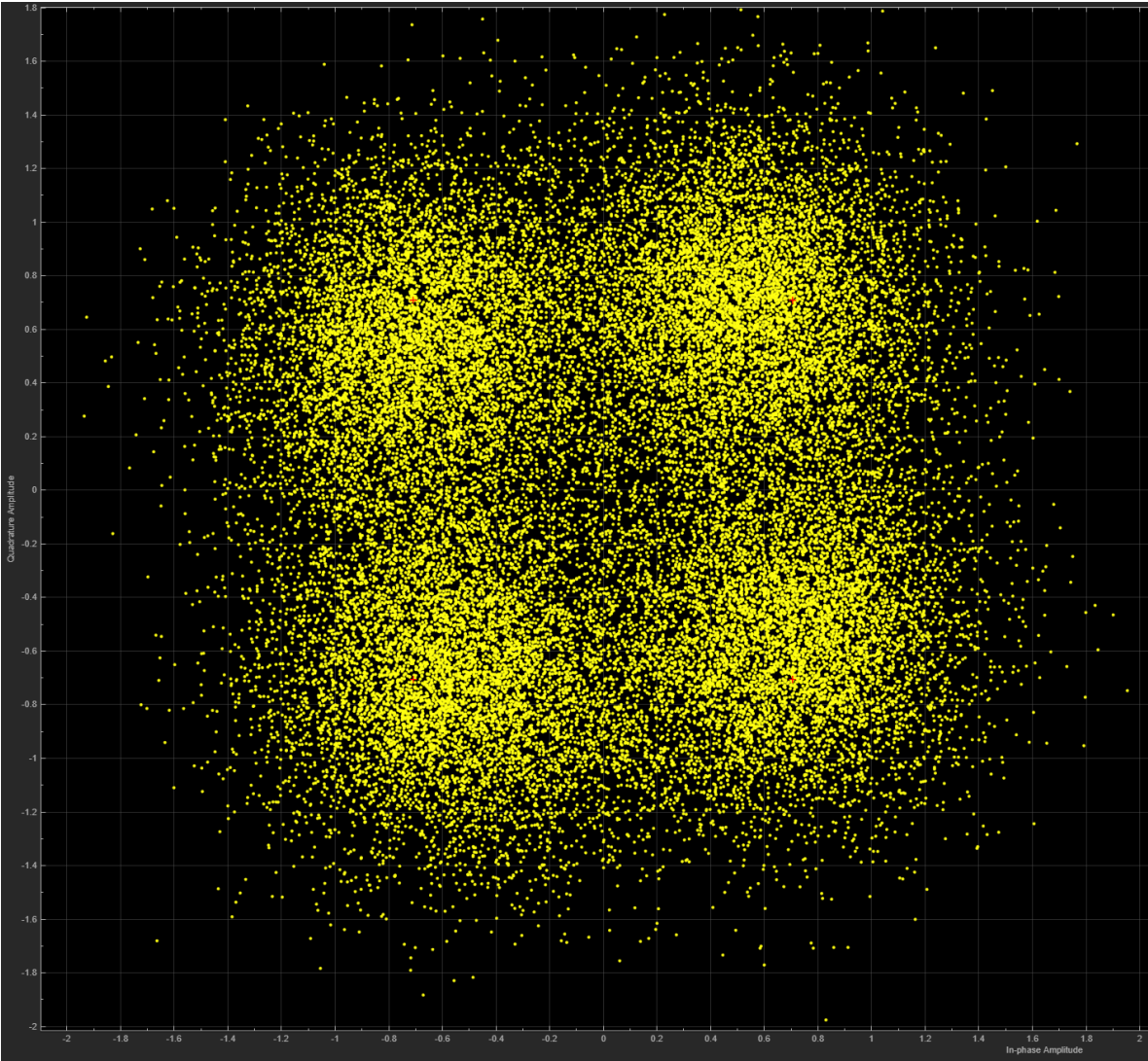


Figura 52: Constelación recibida con corrección.

Los valores de EVM obtenidos para este caso son los mostrados en la Figura 53.

EVM / MER	Values
RMS EVM (%)	55.30
Peak EVM (%)	167.80
Avg EVM (dB)	-5.15
Peak EVM (dB)	4.50
Avg MER (dB)	5.15

Figura 53: Constelación recibida sin corrección.

Lo comentado anteriormente se refleja en los valores promedio de EVM, donde disminuye de -5,16dB a -6,24dB. Lo mismo ocurre observando los valores promedio de MER, donde aumenta de 5,16dB a 6,24dB.

Además, se puede observar el desplazamiento hacia la derecha de la constelación en la primera figura provocado por el *In-Phase DC Offset* y su centrado en la segunda imagen debido al corrector de errores.

4.6.4. Doppler Error

El error Doppler se refiere al cambio en la frecuencia de la señal debido al movimiento relativo entre el transmisor (la estación terrestre) y el receptor (el satélite) en el enlace de comunicación. A medida que los objetos se mueven el uno con respecto al otro, la frecuencia de la señal puede aumentar o disminuir en función de la velocidad relativa y la distancia. Un error Doppler positivo significa un desplazamiento hacia frecuencias más altas, mientras que un error Doppler negativo implica un desplazamiento hacia frecuencias más bajas.

En el simulador hay implementado un mecanismo de producción y corrección de los errores generados por el efecto Doppler. Para analizar su comportamiento se ha utilizado la modulación QPSK con una tasa de codificación de canal de 3/5 y una altura del satélite de 20.000km, en un primer paso sin utilizar ningún método de corrección, variando la frecuencia del efecto Doppler, siendo el resultado el que se puede ver en la Figura 54.

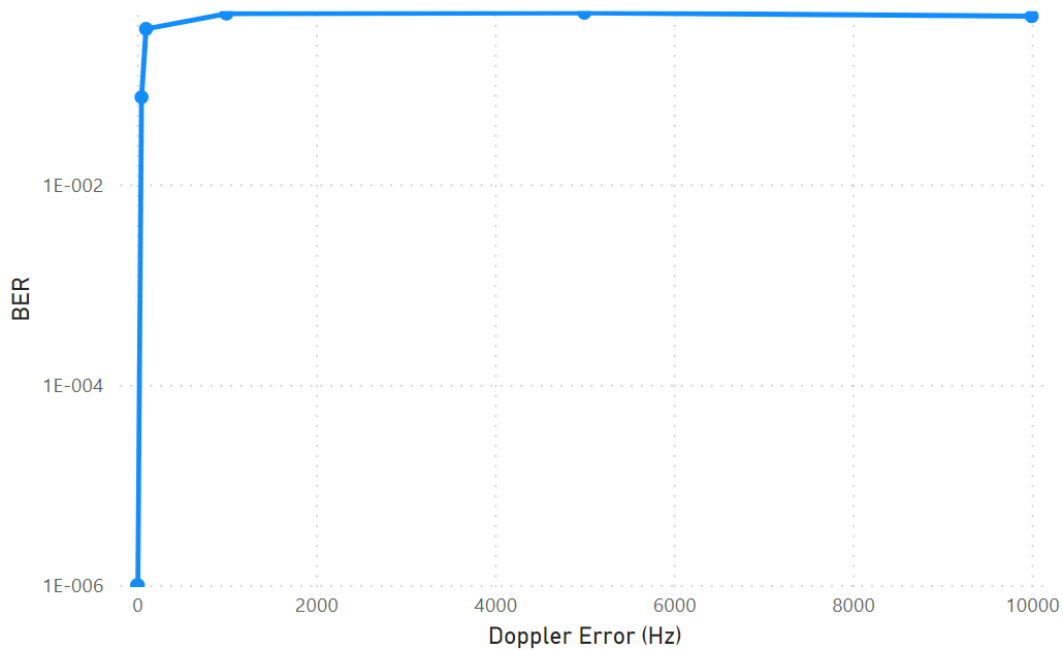


Figura 54: Comparación de la BER en función del Error Doppler para la modulación QPSK 3/5 sin corrector.

Se observa que, a partir de un error Doppler de aproximadamente 50 Hz, la BER comienza a ser elevada, específicamente alrededor de 0,07. Esto indica que, a medida que el error Doppler aumenta, la calidad de la señal se deteriora y se producen errores en la transmisión de datos.

Se han repetido las simulaciones, aplicando el corrector del efecto Doppler y no se han obtenido bits erróneos para ningún valor. El corrector funciona de forma efectiva, hasta el máximo valor de efecto Doppler simulado (10 KHz), mitigando los efectos adversos del error en el sistema de comunicación y compensando con éxito las variaciones de frecuencia causadas por el movimiento relativo, asegurando que la señal se demodula correctamente y sin errores.

4.7. Discusión

En este capítulo, a lo largo de las distintas simulaciones realizadas mediante el entorno de simulación de Matlab (Simulink), se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- Cuando se ha variado el tipo de modulación y codificación, se han visto los casos más eficientes así como los más susceptibles al ruido. La elección del esquema de modulación debe basarse en las condiciones específicas del canal de comunicación. Para aquellos casos en los que el canal es ruidoso o propenso a errores, son preferibles esquemas de baja tasa de codificación para garantizar una comunicación confiable, a costa de una menor velocidad de transmisión. Por el contrario, en ca-

nales con una SNR suficientemente alta, los esquemas de alta tasa de codificación ofrecen una mayor velocidad de transmisión con una tasa de error controlada.

- Variando el orden del filtro Chebyshev, se ha podido observar la mejora de la tasa de error al utilizar dicho filtro, sobre todo si se ajusta a su valor óptimo, donde el rizado de la banda de paso y la pendiente del filtro mejoran sensiblemente los valores de BER.
- En las simulaciones realizadas en función del factor de retroceso, se ha demostrado que el aumento de éste conduce a una señal de menor potencia, lo que disminuye la relación señal a ruido y aumenta la sensibilidad al nivel de ruido presente.
- Analizando el impacto de la altitud del satélite en la calidad de la comunicación se observa que la modulación 8PSK es mucho más sensible a ésta que QPSK. Se pueden igualar resultados aumentando el tamaño de las antenas. En altitudes más bajas, se podría utilizar 8PSK o QPSK indistintamente, aunque hay que tener en cuenta la eficiencia espectral de ambas. En altitudes mayores, se deberá sopesar los inconvenientes que pueda tener el utilizar 8PSK, para tener una calidad de comunicación similar, ya que necesitará un tamaño de antena mayor que QPSK para la misma calidad de comunicación.
- En las simulaciones realizadas variando las frecuencias de los enlaces, no se ha podido demostrar el efecto negativo del aumento de la atenuación con el aumento de la frecuencia, pero sí el efecto negativo que puede tener el tamaño de la antena. El tamaño de la antena transmisora del satélite es un parámetro fundamental sobre todo en frecuencias bajas, donde la ganancia de la antena disminuye considerablemente y provoca el aumento de la BER.
- Para las diversas distorsiones de la señal que se han simulado, se ha comprobado que las herramientas para mitigar o corregir dichas distorsiones han funcionado correctamente dentro de los márgenes y hasta donde se puede caracterizar la BER con fiabilidad.

En resumen, el diseño de una comunicación satelital es un proceso complejo que requiere considerar varios parámetros críticos para garantizar una transmisión de datos eficiente y confiable. Cada uno de estos parámetros puede afectar significativamente la calidad y la eficiencia de la comunicación, por lo que deben ser cuidadosamente considerados y optimizados durante el proceso de diseño.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha pretendido que, de una forma somera, podamos tener una visión global de las características y problemas de una comunicación satelital desde el punto de vista de la calidad del enlace.

Las simulaciones son una herramienta esencial en el campo de las comunicaciones satelitales, ya que permite prever y prepararse para una amplia gama de escenarios. Nos proporcionan una visión de cómo funcionaría nuestro sistema en el mundo real permitiéndonos identificar y solucionar problemas y optimizar el rendimiento del sistema. Se han realizado variando aquellos parámetros que se han considerado más críticos y que estuvieran soportados por la herramienta utilizada.

Se ha utilizado una herramienta existente con las ventajas e inconvenientes que ello comporta, es decir se ahorra mucho tiempo, esfuerzo y recursos, además de ser más estable y confiable, aunque, por otro lado, el emplear un simulador ya creado obliga a utilizar los parámetros de los que dispone, no pudiendo personalizarse y adaptarse a las necesidades propias fácilmente. Otra de las ventajas del uso de Matlab (SimuLink) es su uso bajo licencia proporcionada por la Universidad, evitando problemas de propiedad intelectual.

Para un trabajo futuro, podría ser interesante la utilización de otro simulador o bien mejorar el existente, incluso se podría optar a crear uno nuevo que se adapte perfectamente a nuestros objetivos.

Se han simulado comunicaciones de 0.025s de duración, lo que significa que se han generado un orden de magnitud de 10^6 bits en cada simulación. No todas han sido presentadas en este trabajo, ya que muchas de ellas han servido para afinar los rangos de los valores de los parámetros utilizados, o bien porque el resultado obtenido no era significativo. Aún así, este breve periodo de tiempo simulado nos ha podido dar una idea del comportamiento de la señal, aunque sería interesante en posteriores estudios realizarlo con un periodo de tiempo mayor, es decir aumentar el número de bits simulados, para confirmar los datos obtenidos en este trabajo.

La BER ha sido la variable fundamental utilizada en las simulaciones, si bien sería interesante tomar otras variables para ver el comportamiento de la señal bajo la variación de otros parámetros.

En conclusión, este trabajo no deja de ser un primer paso para un análisis más profundo de un entorno amplio y extenso como el de las comunicaciones a través de satélites, donde las distancias, las variaciones de las condiciones del medio de transmisión o las limitaciones propias de los satélites son un reto para conseguir que la comunicación extremo a extremo sea fructuosa.

6. Bibliografía

- [1] Roddy, Dennis. Satellite communications. 4th ed., McGraw-Hill, 2006.
- [2] Misra, S., and Enright, M. J. (2016). Satellite communication systems: design principles and challenges. John Wiley and Sons.
- [3] Rodríguez, J., and Alonso, J. I. (2017). Análisis comparativo de las bandas de frecuencia Ka, Ku y C para sistemas satelitales de comunicaciones en banda ancha. *Revista Politécnica*, 38(3), 39-47.
- [4] Pischella, Myleene, and Didier Le Ruyet. Digital Communications 2: Digital Modulations. 1st edition., 2015.
- [5] ETSI TR 102 376-1 V1.2.1 (2015-11) : Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2.
- [6] ATM Networks: Concepts, Protocols, Applications”por Rainer Handel, Manfred N. Huber, and Stefan Schroder.
- [7] B. P. A. Mahatmanto and C. Apriono, ”Gain Performance Analysis of A Parabolic Reflector Fed with A Rectangular Microstrip Array Antenna,”2020 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT), Bali, Indonesia, 2020, pp. 142-145, doi: 10.1109/IAICT50021.2020.9172035.
- [8] Boneh, D., Shoup, V. (2003). A graduate course in applied cryptography. Retrieved from <https://crypto.stanford.edu/dabo/cryptobook/>
- [9] ”Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology”de Gerard Maral y Michel Bousquet, publicado por Wiley en 2010.
- [10] MORELLO, ALBERTO, AND VITTORIA MIGNONE. “DVB-S2X: The New Extensions to the Second Generation DVB Satellite Standard DVB-S2.” *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 34: 323-325., vol. 34, no. 3, 2016, doi:10.1002/sat.1167.
- [11] <https://n9.cl/mathworks> [Último acceso: 5/11/2023]
- [12] MORELLO, A. , AND V. MIGNONE. “DVB-S2: The Second Generation Standard for Satellite Broad-Band Services.” , *Proceedings of the IEEE* 94, no. 1 (2006): 210–27. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.861013>.
- [13] A. TADA, M. UMEHIRA, X. WANG y S. Takeda, ”Linearizador HPA basado en DPD utilizando un piloto de estimación de punto de operación en banda para aplicaciones de dispositivos móviles”, 2020 14^a Conferencia Internacional sobre

- Sistemas de Procesamiento y Comunicación de Señales (ICSPCS), Adelaida, SA, Australia, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICSPCS50536.2020.9310045.
- [14] S. L. Vesely and A. A. Vesely, "Relativity and the Doppler effect," 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS), St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 1089-1095, doi: 10.1109/PIERS.2017.8261908.
- [15] S. Bakshi et al., "Design and Comparison Between IIR Butterworth and Chebyshev Digital Filters Using Matlab," 2019 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS), Greater Noida, India, 2019, pp. 439-446, doi: 10.1109/ICCCIS48478.2019.8974554.
- [16] H. Guo, Z. Li, A. Miao, X. Wang and Z. Li, "An Automatic Gain Control Amplifier with Linear-in-dB Gain in 22nm CMOS," 2021 6th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM), Nanjing, China, 2021, pp. 272-275, doi: 10.1109/ICICM54364.2021.9660341.
- [17] N. Hou, J. Hu, D. Mou, Y. Zhang, Y. W. Li and R. W. De Doncker, "A Simple DC-Offset Eliminating Method of the Series-Inductance Current for the DAB DC-DC Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 4, pp. 4224-4228, April 2023, doi: 10.1109/TPEL.2022.3231816.
- [18] X. Fan, M. Slamani, L. Song, R. Srinivasamurthy and J. Ferrario, "A Real Time FPGA-based IQ Imbalance Measurement and Calibration System for High Volume Production Testing," 2023 IEEE 32nd Microelectronics Design & Test Symposium (MDTS), Albany, NY, USA, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/MDTS58049.2023.10168151.
- [19] S. Jamil, M. Usman, H. Atiq and R. Ramzan, "28-32 GHz Wideband LNA for 5G Applications," 2021 1st International Conference on Microwave, Antennas & Circuits (ICMAC), Islamabad, Pakistan, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICMAC54080.2021.9678221.
- [20] ESA - Types of orbits - European Space Agency [Online]. Disponible: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits. [Último acceso: 5/01/2024].
- [21] <https://es.mathworks.com/help/satcom/ug/dvbs2-bent-pipe-simulation-with-rf-impairments-and-corrections.html> [Último acceso: 21/02/2023]
- [22] Wicker, S. B. (1995). Reed-Solomon codes and their applications. IEEE Press.
- [23] Lin, S., Costello, D. J. (2004). Error control coding: fundamentals and applications. Pearson Education.
- [24] <https://spectrum.ieee.org/sputnik-at-60> [Último acceso: 5/01/2024]
- [25] G. Fodor, M. Katz, D. Marpe, and T. Wiegand, "Modulation and coding schemes for DVB-S2," IEEE Communications Magazine, Dec. 2006.
- [26] <https://es.mathworks.com/help/comm/ref/iqimbal.html> [Último acceso: 5/01/2024]

- [27] <https://acesse.dev/FrecuencyBands> [Último acceso: 5/01/2024]
- [28] <https://l1nq.com/OrbitaSatelitales> [Último acceso: 5/01/2024]
- [29] <https://acesse.dev/Criptografia> [Último acceso: 5/01/2024]
- [30] <https://encr.pw/Cifrado> [Último acceso: 5/01/2024]
- [31] <https://w3.ual.es/~vruiz/Docencia/Apuntes/Transmission/06-Multiplexacion/index.html> [Último acceso: 5/01/2024]
- [32] <https://www.telefonicaserviciosaudiovisuales.com/servicios/transmision/telepuerto/> [Último acceso: 5/01/2024]
- [33] <https://a1255681.sites.myregisteredsite.com/materias/atm/multiplexacion.htm> [Último acceso: 5/01/2024]

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá