



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: “ANÁLISIS DE LOS EFECTOS OCASIONADOS AL
USAR EL MODELO DE RAPP PARA UN AMPLIFICADOR DE
POTENCIA, EN UNA TRANSMISIÓN OFDM CON PICOS DE
POTENCIA ELEVADA”**

AUTOR: ALVEAR RODRÍGUEZ, PATRICIO DANIEL

DIRECTOR: Dr. ESPINOSA, NIKOLAI

SANGOLQUÍ

2017



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR

Certifico que el trabajo de titulación, “**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS OCASIONADOS AL USAR EL MODELO DE RAPP PARA UN AMPLIFICADOR DE POTENCIA, EN UNA TRANSMISIÓN OFDM CON PICOS DE POTENCIA**” realizado por el señor **PATRICIO DANIEL ALVEAR RODRÍGUEZ**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **PATRICIO DANIEL ALVEAR RODRÍGUEZ** para que lo sustente públicamente.

SANGOLQUÍ, Noviembre del 2017

Atentamente,



Dr. Nikolai Espinosa



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

OFICIO DE AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **PATRICIO DANIEL ALVEAR RODRÍGUEZ**, con cédula de identidad N° 1720949609, declaro que este trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS OCASIONADOS AL USAR EL MODELO DE RAPP PARA UN AMPLIFICADOR DE POTENCIA, EN UNA TRANSMISIÓN OFDM CON PICOS DE POTENCIA ELEVADA**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

SANGOLQUÍ, Noviembre del 2017

PATRICIO DANIEL ALVEAR RODRÍGUEZ

C.C.: 1720949609



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

OFICIO DE AUTORIZACIÓN

Yo, **PATRICIO DANIEL ALVEAR RODRÍGUEZ**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS OCASIONADOS AL USAR EL MODELO DE RAPP PARA UN AMPLIFICADOR DE POTENCIA, EN UNA TRANSMISIÓN OFDM CON PICOS DE POTENCIA ELEVADA**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

SANGOLQUÍ, Octubre del 2017

PATRICIO DANIEL ALVEAR RODRÍGUEZ

C.C.: 1720949609

DEDICATORIA

Con todo mi amor dedico el presente trabajo a Dios, por darme la oportunidad de vivir en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mi madre Carola, por darme la vida, que es la persona que siempre me ha guiado por el buen camino, me enseñaste cuan valiosa es la vida por eso y muchas cosas todo esto te lo debo a ti. A mi padre Patricio quien es y será un ejemplo a seguir en toda mi vida.

Mi hermana Gaby, por estar conmigo, apoyarme siempre y tomarme como ejemplo muchas veces en tu vida, te quiero mucho.

Mi abuelito Julio, mis abuelitas Sara y Tena, por quererme y apoyarme siempre. Todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer en primer lugar a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por haberme dado la oportunidad de estudiar y ser un profesional. También me gustaría agradecer a mi Tutor de Tesis Dr. Nikolai Espinosa, ya que con su dedicación paciencia y profesionalismo ha logrado que pueda culminar mis estudios con éxito.

Son bastantes las personas que formaron parte de este camino a la vida profesional a las que agradezco su amistad, consejos y apoyo. La gran mayoría siguen aquí conmigo las otras están en mis recuerdos y en mi corazón.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	6
1.3 Alcance	9
1.4 Objetivos	10
1.4.1 Objetivo general	10
1.4.2 Objetivos Específicos	10
CAPÍTULO II	11
MARCO TEÓRICO	11
2.1 Funcionamiento de OFDM	11
2.2 Modulación tipo monoportadora y subportadora	12
2.3 Ortogonalidad de la modulación OFDM	15
2.4 Sistema de Transmisión OFDM	17
2.5 Propagación de la señal por trayectorias múltiples.....	19
2.6 Prefijo cíclico	23
2.7 Sistema de recepción OFDM	24
2.8 Sistema integrado de transmisión/recepción OFDM.....	25
2.9 Técnicas de modulación digital	26
2.9.1 Modulación M-PSK	26
2.9.2 Modulación M-QAM	29
2.10 Ventajas y desventajas de OFDM	30
2.10.1 Ventajas	30

	viii
2.10.2 Desventajas	31
CAPÍTULO III	33
AMPLIFICADORES DE POTENCIA	33
3.1 Principios de funcionamiento del amplificador	33
3.2 Tipos de amplificadores	34
3.3 Amplificadores de potencia	35
3.4 Características y propiedades de los amplificadores de potencia....	36
3.4.1 Ganancia en un amplificador de potencia	36
3.4.2 Uniformidad de ganancia en un amplificador de potencia	37
3.4.3 Linealidad de un amplificador de potencia.....	38
3.4.4 Eficiencia en un amplificador de potencia	38
3.4.5 Ancho de banda de un amplificador de potencia	39
3.4.6 Input back-off IBO en un amplificador de potencia	40
3.4.7 Conversión AM-AM y AM-PM en un amplificador de potencia.....	41
3.4.8 Relación de potencia pico a potencia media “PAPR”	42
3.5 Clases de los amplificadores de potencia	43
3.5.1 Amplificadores de potencia clase A.....	44
3.5.2 Amplificadores de potencia clase B.....	44
3.5.3 Amplificadores de potencia clase AB	46
3.5.4 Amplificadores de potencia clase C.....	47
3.5.5 Amplificadores de potencia clase D.....	47
3.5.6 Amplificadores de potencia clase E.....	48
3.5.7 Amplificadores de potencia Clase F	49
3.5.7 Amplificadores de potencia clase G y clase H.....	50
3.6 Modelo matemático Rapp para amplificadores de potencia de estado sólido	51
CAPÍTULO IV	53
IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN EL SISTEMA DE SIMULACIÓN ..	53
4.1 Totalidad de bloques a implementar.....	54
4.2 Implementación del transmisor/receptor OFDM y canal de ruido	56
4.2.1 Principal.m	56
4.2.2 Datos.m.....	58
4.2.3 Datos_generados.m.....	59

	ix
4.2.4 Grafica_BER.m	60
4.2.5 Graf_mod.m	60
4.2.6 Graf_diag_const.m	60
CAPÍTULO V	62
SIMULACIÓN EN MATLAB Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
5.1 Simulación OFDM usando modulación tipo 64-PSK y con IBO de 3db ..	63
5.2 Simulación OFDM usando modulación tipo 64-PSK y con IBO de 5db ..	66
5.3 Simulación OFDM usando modulación tipo 64-PSK y con IBO de 7db ..	68
5.4 Simulación OFDM usando modulación tipo 256-QAM e IBO de 3db.....	71
5.5 Simulación OFDM usando modulación tipo 256-QAM y con IBO de 5db.....	75
5.6 Simulación OFDM usando modulación tipo 256-QAM e IBO de 7db.....	78
CONCLUSIONES	81
RECOMENDACIONES.....	82
GLOSARIO DE TÉRMINOS	83
BIBLIOGRAFÍA.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Elementos de un sistema de comunicación	2
Figura 2 Diagrama de bloques de un sistema de comunicación digital	4
Figura 3 Diagrama de bloques simplificado de OFDM	7
Figura 4 Curva de operación de un amplificador real	8
Figura 5 Modulación multiportadora (conversión serial – paralelo con N canales)	12
Figura 6 Diferentes tipos de modulaciones utilizadas (monoportadoras y multiportadoras)	13
Figura 7 Representación del espectro de frecuencia modulaciones multiportadora y monoportadora	14
Figura 8 Comparación entre la modulación monoportadora y OFDM	15
Figura 9 OFDM en comparación con una modulación tipo multiportadora convencional (Por ejemplo FDM)	16
Figura 10 Ortogonalidad de OFDM vista en el espectro de frecuencias	17
Figura 11 Transmisor OFDM	18
Figura 12 Transmisor OFDM utilizando IFFT	19
Figura 13 Fenómeno de trayectorias múltiples de la señal	21
Figura 14 Afectación del siguiente símbolo por retraso de la señal por la aparición múltiples trayectorias	22
Figura 15 Presencia de Offset en subportadora.....	22
Figura 16 Prefijo cíclico	23
Figura 17 Modelo del receptor OFDM en tiempo continuo	25
Figura 18 Diagrama de bloques de un sistema OFDM	26
Figura 19 Señales correspondientes a una modulación B-PSK	27
Figura 20 Diagramas de constelación para modulaciones M-PSK.....	28
Figura 21 Algunas señales de espacio para la modulación QAM.....	30
Figura 22 Amplificador de Potencia	34
Figura 23 Mejora de eficiencia en electrónica de potencia usando los dispositivos en su operación como conmutadores	36
Figura 24 Uniformidad de ganancia en un amplificador de potencia	37
Figura 25 Linealidad en un amplificador	38
Figura 26 Curva de ganancia contra la frecuencia en un amplificador	40

	xi
Figura 27 IBO en un amplificador de potencia	40
Figura 28 Conversión AM-AM y Conversión AM-PM en un amplificador de potencia	42
Figura 29 Amplificador de potencia clase A	44
Figura 30 Amplificador de potencia clase B	45
Figura 31 Amplificador de potencia clase AB (uno de los circuitos de salida)	46
Figura 32 Amplificador de potencia clase C	47
Figura 33 Diagrama de bloques funcional simplificado de un amplificador de potencia clase D	48
Figura 34 Circuito simplificado y diagrama en bloques de un amplificador de potencia clase E	49
Figura 35 Configuración de un circuito amplificador clase F con la circuitería compensadora en la salida	50
Figura 36 Amplificador clase G el cual usa dos fuentes de alimentación	51
Figura 37 Interfaz gráfica de Matlab®	54
Figura 38 Diagrama de bloque de sistema OFDM	55
Figura 39 Pantalla principal del programa de simulación	56
Figura 40 Mensaje para ingresar y mostrar datos utilizados, (64-PSK, IBO de 3db)	63
Figura 41 Mensaje de confirmación de realización de los cálculos	64
Figura 42 Espectro de frecuencia de señales de OFDM luego de haber sido amplificadas mediante modelo Rapp y amplificador ideal (64-PSK, IBO de 3db)	64
Figura 43 Diagrama de constelación para valores de $E_b/N_0=0$, $E_b/N_0=10$ y $E_b/N_0=20$, (64-PSK, IBO de 3db)	65
Figura 44 BER con respecto a la SNR, (64-PSK, IBO de 3db)	65
Figura 45 Mensaje para ingresar y mostrar datos utilizados, (64-PSK, IBO de 5db)	66
Figura 46 Espectro de frecuencia de señales de OFDM luego de haber sido amplificadas mediante modelo Rapp y amplificador ideal (64-PSK, IBO de 5db)	67

Figura 47 Diagrama de constelación para valores de $E_bN_0=0$, $E_bN_0=10$ y $E_bN_0=20$, (64-PSK, IBO de 5db)	67
Figura 48 BER con respecto a la SNR, (64-PSK, IBO de 5db)	68
Figura 49 Mensaje para ingresar y mostrar datos utilizados, (64-PSK, IBO de 7db).....	69
Figura 50 Espectro de frecuencia de señales de OFDM luego de haber sido amplificadas mediante modelo Rapp y amplificador ideal (64-PSK, IBO de 7db).....	70
Figura 51 Diagrama de constelación para valores de $E_bN_0=0$, $E_bN_0=10$ y $E_bN_0=20$, (64-PSK, IBO de 7db)	70
Figura 52 BER con respecto a la SNR, (64-PSK, IBO de 7db)	71
Figura 53 Mensaje para ingresar y mostrar datos utilizados, (256-QAM, IBO de 3db).....	72
Figura 54 Espectro de frecuencia de señales de OFDM luego de haber sido amplificadas mediante modelo Rapp y amplificador ideal (256-QAM, IBO de 3db)	73
Figura 55 Diagrama de constelación para valores de $E_bN_0=0$, $E_bN_0=10$ y $E_bN_0=20$, (256-QAM, IBO de 3db)	73
Figura 56 BER con respecto a la SNR, (256-QAM, IBO de 3db).....	74
Figura 57 Mensaje para ingresar y mostrar datos utilizados, (256-QAM, IBO de 5db).....	75
Figura 58 Espectro de frecuencia de señales de OFDM luego de haber sido amplificadas mediante modelo Rapp y amplificador ideal (256-QAM, IBO de 5db)	76
Figura 59 Diagrama de constelación para valores de $E_bN_0=0$, $E_bN_0=10$ y $E_bN_0=20$, (256-QAM, IBO de 5db)	76
Figura 60 BER con respecto a la SNR, (256-QAM, IBO de 5db).....	77
Figura 61 Mensaje para ingresar y mostrar datos utilizados, (256-QAM, IBO de 7db).....	78
Figura 62 Espectro de frecuencia de señales de OFDM luego de haber sido amplificadas mediante modelo Rapp y amplificador ideal (256-QAM, IBO de 7db)	79

Figura 63 Diagrama de constelación para valores de $E_bN_0=0$, $E_bN_0=10$ y $E_bN_0=20$, (256-QAM, IBO de 7db)	79
Figura 64 BER con respecto a la SNR, (256-QAM, IBO de 7db).....	80

RESUMEN

Este trabajo desarrolla la teoría y simulación de los efectos ocasionados al usar el modelo de Rapp para un amplificador de potencia, en una transmisión utilizando la multiplexación por división de frecuencia ortogonal OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con picos de potencia elevada. La OFDM es una técnica de modulación con múltiples portadoras ampliamente usada en telecomunicaciones debido a su gran eficiencia en el uso de la banda de frecuencias, sin embargo por ser una técnica multiportadora tiene el problema de producir elevados picos de potencia instantánea en comparación a la potencia promedio de la señal. Este fenómeno es definido mediante la expresión “Relación entre la potencia pico con respecto a la potencia promedio” PAPR (Peak-to-Average Power Ratio). Por tener la señal OFDM un alto PAPR, al pasar por el amplificador de potencia, se llega a la zona de saturación del mismo (zona no lineal) provocando distorsión en la señal original con la consiguiente pérdida de datos y ocasionando un aumento en la tasa de error de bit BER (Bit Error Rate). Para determinar los efectos del alto PAPR se simula a través del programa Matlab®, todo el sistema OFDM, incluyendo el ruido del canal de transmisión por medio del “Ruido blanco gausseano aditivo” AWGN (Additive White Gaussian Noise). Esta simulación se realiza modificando los valores de IBO (Input Back-Off) y alternando las técnicas de modulación: Modulación por desplazamiento de fase PSK (Phase-shift keying) y Modulación de amplitud en cuadratura QAM (Quadrature Amplitude Modulation).

PALABRAS CLAVES:

- **MODELO RAPP**
- **OFDM**
- **MODULACIÓN**
- **PAPR**
- **BER**

ABSTRACT

This work develops the theory and simulation of the effects caused when using the Rapp model for a power amplifier, in a transmission using Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) with high power peaks. OFDM is a multi-carrier modulation technique widely used in telecommunications due to its great efficiency in the use of frequency band, however as a multi-carrier technique it has the problem of producing high peaks of instantaneous power related to the power average of the signal. This phenomenon is defined by the term "Peak-to-Average Power Ratio" (PAPR). By having the OFDM signal a high PAPR, when passing through the power amplifier, it reaches the saturation zone of this (non-linear zone) causing distortion in the original signal with the consequent losses of data and causing an increase in the Bit error rate (BER). To determine the effects of the high PAPR, the entire OFDM system, it is simulated through the Matlab®. This simulation includes channel noise, by using the "Additive White Gaussian Noise" (AWGN). This simulation is performed by modifying the IBO (Input Back-Off) values and alternating modulation techniques: Phase-shift keying (PSK) and Quadrature Amplitude Modulation (QAM).

KEY WORD:

- **RAPP MODEL**
- **OFDM**
- **MODULATION**
- **PAPR**
- **BER**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El Presente Trabajo de Titulación está basado en el análisis de los efectos ocasionados al usar el modelo de Rapp¹ para un amplificador de potencia, en una transmisión que utiliza la Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con picos de potencia elevada mediante simulaciones en Matlab®.

Para esto se menciona la necesidad de establecer las comunicaciones, los antecedentes de sistemas de transmisión, la evolución de los sistemas de comunicación, las técnicas de modulación incluyendo OFDM y el diagrama en bloque de la modulación en los sistemas de comunicación digital.

Asimismo se indica la importancia (Justificación) de haber seleccionado este tema, la importancia de los amplificadores de potencia dentro de la modulación OFDM, el modelo Rapp que simula el comportamiento de un amplificador de potencia y su desempeño dentro de un sistema OFDM.

Por último en el presente capítulo se hace énfasis al alcance y los objetivos del presente trabajo.

1.1 Antecedentes

La humanidad, desde sus orígenes siempre ha tenido la necesidad de comunicarse con sus pares. Los elementos de un sistema de comunicación se presentan en la Figura 1.

¹ Modelo denominado por su autor Dr. Ing. Christoph Rapp, quien en octubre de 1991, publicó el artículo "*Efectos de la no linealidad de los amplificadores de alta potencia en la señal modulada tipo 4-DPSK/OFDM de un sistema de transmisión digital de sonido*" (Rapp, 1991). Para ese entonces era investigador en el Centro aeroespacial de Alemania. Actualmente es profesor de la Universidad de Munich de ciencias aplicadas.



Figura 1 Elementos de un sistema de comunicación

El medio o canal de comunicación inicialmente empleado fue la voz, luego mediante de esquemas pictóricos y, si se trataba a distancia, se utilizaban señales de humo. A medida que se requería comunicar más información, se necesitaba que al menos una de las personas se desplace a un punto de encuentro con la otra. Esta interacción podía complicarse dependiendo de la distancia a recorrer y la trayectoria ya que era preciso contar con vías apropiadas y contar con un mecanismo de transmisión eficiente para cumplir una de las premisas básicas de la comunicación: que sea rápida y eficaz.

En el Ecuador, en el libro “Historia de las telecomunicaciones en el Ecuador” (Gomezjurado Zevallos (Coordinador), Núñez Sánchez, Cordero Íñiguez, & Uyaguari Uyaguari, Enero, 2014), se menciona una de las primeras formas de comunicaciones a distancia: *“En nuestro país, la historia de las comunicaciones a distancia tuvo su primer gran logro en el establecimiento del sistema de “chasquis” o mensajeros personales que actuaron bajo un sistemas de postas, sistema utilizado por los incas para administrar con eficiencia su enorme imperio, que abarcaba toda la región andina, desde el chileno río Maule y la Patagonia argentina hasta la región sureña de la actual Colombia.”*

Con el tiempo se demostró que el uso de mensajero es poco eficiente pues los mensajes podían perderse, podían ser interceptados, el mensajero podía fallecer en el camino o se podrían generar retrasos que al llegar el mensaje al receptor, la información no era útil por ser inoportuna.

A mediados del siglo XIX gracias al trabajo del físico inglés, James Clerk Maxwell, comenzó la posibilidad de realizar comunicaciones electrónicas. Las investigaciones matemáticas de Maxwell indicaron que la electricidad y

la luz viajan en forma de ondas electromagnéticas, y por lo tanto, están relacionadas una con otra (Duran, 2016).

El desarrollo de las Telecomunicaciones comenzó en 1844, cuando Samuel Morse puso en marcha el primer sistema telegráfico confiable.

En 1876, el inventor canadiense Alexander Graham Bell y su asistente, Thomas A. Watson (también inventor muy conocido), transmitieron exitosamente una conversación humana a través de un sistema telefónico funcional usando cables metálicos como medio de transmisión (Telégrafo). Por cierto, este tipo de transmisión es similar al sistema de comunicación mediante la Multiplexación por división de frecuencias ortogonales OFDM actual. Por medio del telégrafo, se transmitía señales a través de un canal de ancho de banda relativamente grande, utilizando una frecuencia de portadora distinta para cada señal.

Posteriormente, en 1894, el científico italiano Guglielmo Marconi, logró efectuar las primeras comunicaciones electrónicas inalámbricas por medio de señales de radio a tres cuartos de milla por la atmósfera de la Tierra atravesando la propiedad de su padre, continuando sus ensayos hasta que en 1899 envió el primer mensaje inalámbrico por el Canal de la Mancha desde Francia a Dover, Inglaterra.

En la continuación de sus trabajos de investigación, el 12 de Diciembre de 1901 Marconi estableció la primera –comunicación transoceánica entre Cornualles en Gran Bretaña y Terranova, en Canadá. La frecuencia utilizada fue 820 KHz (366 m). La potencia del transmisor eran 15 kW. La antena transmisora era un monopolo (antena vertical) en abanico, soportado por dos mástiles de 48 m separados 60 m. La antena receptora fue un hilo metálico, suspendido de una cometa (València, 2004).

El uso de las técnicas de modulación para comunicaciones comenzó en 1920, cuando las estaciones de radio AM (Amplitud Modulada) WWJ en Detroit, Michigan y, KDKA en Pittsburgh, Pennsylvania, comenzaron sus emisiones comerciales.

En 1932, ya se había perfeccionado el sistema de radar en el NRL (Naval Research Laboratory), y se podían detectar aviones a una distancia de 80 kilómetros del transmisor. Las primeras experiencias con un radar pulsado

en EEUU se realizaron en el NRL, en Abril de 1936, con un sistema a la frecuencia de 28.3 MHz y un ancho de pulso de 5 microsegundos. Al cabo de unos meses el alcance se aumentó en 40 Km. Pronto se llegó a la conclusión de que era necesario subir en frecuencia, especialmente para los sistemas embarcados. Los primeros sistemas a 200 MHz se empezaron a desarrollar en 1936. Con una potencia de 6 kW se alcanzaba una distancia de 50 millas. El sistema se denominó CXAM (València, 2004).

En 1933, el mayor Edwin Howard Armstrong inventó la frecuencia modulada (FM), y la emisión comercial de las señales FM comenzó en 1936.

A partir del año 1948, con la invención del transistor bipolar de unión, se dio un impulso en general al desarrollo de circuitería en general utilizando componentes electrónicos.

En 1949 Se inventan las primeras tarjetas de circuitos impresos con el fin facilitar la localización de los componentes y disminuir los costos de fabricación de los equipos electrónicos. Esto también tuvo un impacto positivo en las comunicaciones, en especial en el desarrollo de las técnicas de comunicaciones digitales.

Con las comunicaciones digitales, aunque se añaden más elementos al presentado en la Figura 1, se incrementa la confiabilidad y velocidad del sistema. En la Figura 2, se presentan estos elementos (Proakis & Salehi, 2008).

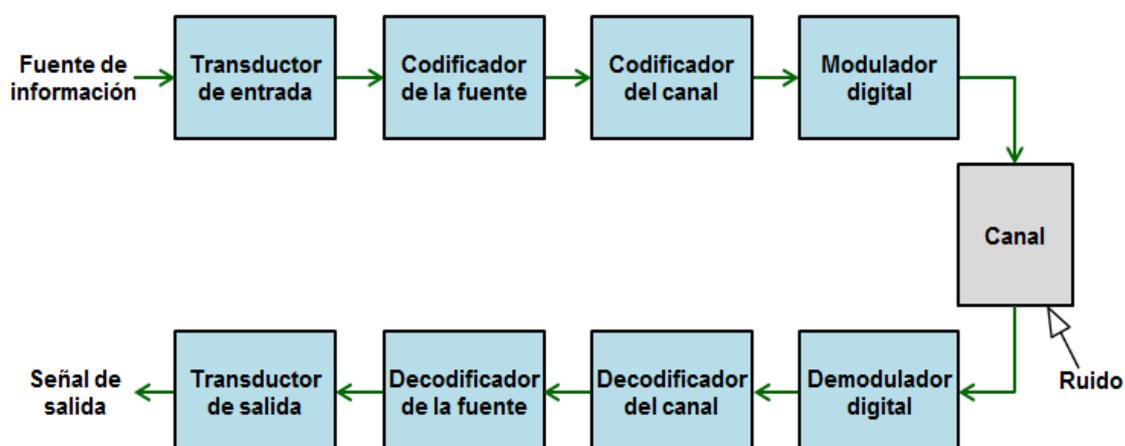


Figura 2 Diagrama de bloques de un sistema de comunicación digital

Fuente: (Proakis & Salehi, 2008)

En esta evolución de los sistemas de comunicaciones digitales se ha desarrollado una gran cantidad de técnicas de modulación que utilizan ondas portadoras ya sea con modulación de Señales Continuas, en la cual la portadora es una señal sinusoidal, o por modulación de Impulsos, en la cual la portadora es un tren de impulsos (Briceño J. E., Abril, 2005).

Estas técnicas de modulación incluyen:

- Modulación por desplazamiento de fase PSK (Phase-shift keying), con sus variantes: binario PSK (BPSK), de cuadratura PSK (QPSK), octal (8PSK), hexadecimal (16PSK), Diferencial PSK (DPSK).
- Modulación por desplazamiento de frecuencia FSK (Frequency-shift keying).
- Modulación por desplazamiento de amplitud ASK (Amplitude-shift keying).
- Modulación de amplitud en cuadratura QAM (Quadrature amplitude modulation). Con su variante M-QAM, donde M es el número de estados de modulación: 4, 16, 64, 256.
- Modulación con Codificación Reticulada TCM (Trellis Coded Modulation).
- Espectro ensanchado por salto de frecuencia FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum).
- Acceso múltiple por división de código CDMA (Code Division Multiple Access).
- Espectro ensanchado por secuencia directa DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum).
- Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

1.2 Justificación

Las telecomunicaciones desempeñan un papel primordial en la sociedad actual y gracias a los avances tecnológicos han permitido realizar múltiples actividades en diferentes áreas que han contribuido a mejorar la calidad de vida.

A medida que se produce el avance tecnológico en las telecomunicaciones se van satisfaciendo las necesidades que surgen de distintas características: Seguridad en la información, interconexión a nivel global, revolución tecnológica, funcionalidad de diversos medios, control total de la información, importancia en la vida cotidiana, etc.

Para mencionar algunas aplicaciones importantes, el Ingeniero Luis Horacio Agudelo Ríos, Vicedecano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar "NuevaGranada" y Miembro de la Sociedad Colombiana de Ingeniería (Agudelo Rios, 2001), indica *“Gracias a su efectividad las operaciones quirúrgicas guiadas a grandes distancias por galenos especializados, mediante el uso de la teledirección a viva voz o el video con contenidos de exactas condiciones científicas, están permitiendo la salvación de vidas, casi perdidas, si no fuese por el avanzado empleo de la técnica de las comunicaciones. Hoy, la lectura e información de las condiciones climáticas y el comportamiento de la actividad atmosférica en el tiempo y su influencia en todas las latitudes, pueden conocerse con anticipación a los grandes desastres de la naturaleza. La conducción de las guerras, sin el empleo de señales satelitales y la utilización de sofisticadas redes de comunicación, retardan su desarrollo y trastornan los resultados de los planes estratégicos. Las comunicaciones, siempre serán básicas en los procesos universales de desarrollo, en especial para logros técnico científicos, que impulsan la debida aplicación de la ciencia en beneficio de la humanidad”*.

Dentro de las herramientas actuales con que contamos para el establecimiento de las telecomunicaciones está la Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), la cual es una técnica de comunicaciones que divide un canal,

de frecuencia en un número determinado de bandas de frecuencia espaciadas con el mismo ancho, donde en cada banda se transmite una subportadora que a su vez transporta una porción de la información del usuario. Como característica principal cada subportadora es ortogonal al resto.

OFDM es el método de modulación más empleado en la actualidad en sistemas inalámbricos. Se emplea en WiFi (Wi-Fi™), en los sistemas de interoperabilidad mundial para acceso por microondas WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), en el estándar de telefonía móvil de cuarta generación LTE (Long Term Evolution) 4G y en los sistemas de difusión de televisión digital DVBT, entre otros. Inclusive, las redes 5G usarán OFDM. La interfaz aérea será diseñada para una latencia menor y mayor flexibilidad que en el caso de LTE (Segan, 2016).

El diagrama de bloques de OFDM contiene algunas características al diagrama de bloques de un sistema de comunicación digital, presentado en la Figura 2. Sin embargo, al utilizarse en transmisiones inalámbricas, requiere el uso de amplificadores de potencia para poder cubrir las grandes distancias entre el emisor y el receptor. Un diagrama de bloques simplificado² se muestra en la Figura 3.

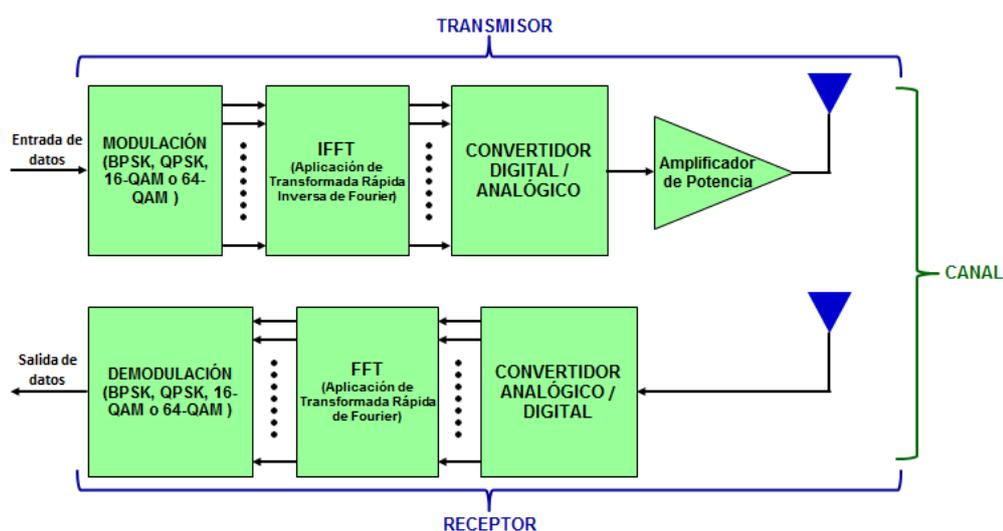


Figura 3 Diagrama de bloques simplificado de OFDM

² El diagrama de bloques completo y la explicación de los elementos se realiza en el Capítulo 2.

La importancia de realizar el modelo del sistema OFDM y dentro de él, la inclusión del modelo Rapp para la simulación del amplificador de potencia, radica en que los amplificadores reales presentan un comportamiento de no linealidad y presentan una zona de saturación en la cual ya no se produce amplificación de la señal. La Figura 4, muestra la curva de operación donde se presenta la potencia de salida del amplificador con relación a la potencia de la señal de entrada.

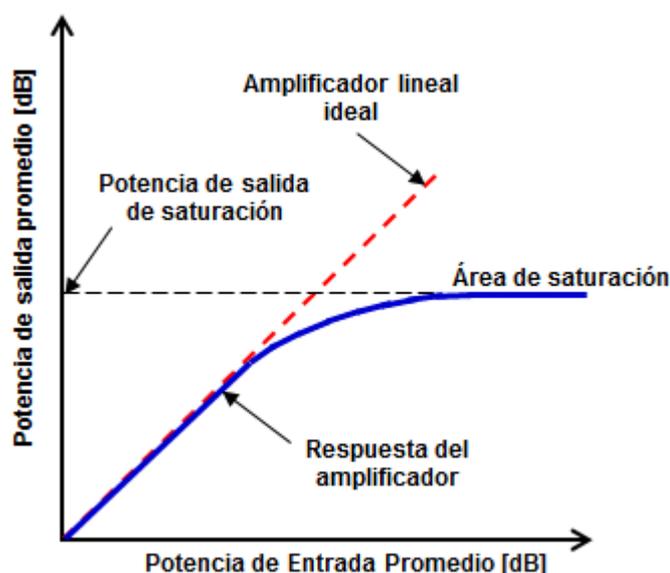


Figura 4 Curva de operación de un amplificador real

Esto puede ser un inconveniente para poder garantizar que los datos recibidos correspondan fielmente a los datos enviados, ya que una de las características de los sistemas OFDM es la generación de picos de potencia en el proceso de modulación, con lo que se puede llegar a la zona de saturación del amplificador y la consiguiente pérdida de datos. Por eso la importancia de realizar este estudio, simulación y el análisis correspondiente.

1.3 Alcance

En este trabajo de titulación se tiene previsto investigar el principio de funcionamiento del sistema OFDM, evaluar cómo afecta el entorno a la operación de OFDM, determinar cada uno de los bloques que lo contienen, describir los tipos de amplificadores de potencia y los parámetros principales de su operación.

También se prevé realizar el modelo de todo el sistema OFDM a través de la herramienta Matlab® y simular el amplificador de potencia mediante el modelo Rapp, determinando los posible errores generados en la transmisión, comparando con los datos originales enviados y con el funcionamiento de un amplificador lineal ideal.

Para ello por medio de Matlab® se verificará que la transmisión OFDM y el amplificador de potencia funcionen correctamente por separado, para posteriormente unir estos dos programas para observar la degradación que produce utilizar un amplificador de potencia en una transmisión OFDM.

Se tomará en consideración el número de símbolos OFDM, tipo de modulación, nivel de modulación, número de subportadoras y el IBO (Input Back-off). Con estos parámetros, se calculará el número de datos a usar en la transmisión OFDM.

Para el análisis de los resultados se usará la densidad del espectro de potencia PSD (Power Spectral Density) a la salida del amplificador de alta potencia HPA (High Power Amplifier) y se medirá la tasa de error binario BER (Bit Error Rate) en la recepción OFDM. Estas dos gráficas servirán para observar la cantidad de distorsión que produce el modelo de Rapp en una transmisión OFDM.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo general*

Analizar los efectos producidos en una transmisión OFDM con elevada relación entre la potencia pico con respecto a la potencia promedio PAPR (Peak to Average Power Ratio) al pasar por el Modelo de Rapp determinado para un amplificador de potencia, mediante simulaciones en Matlab®.

1.4.2 *Objetivos Específicos*

- Explicar la técnica de transmisión multiportadora, OFDM.
- Identificar los distintos elementos utilizados en OFDM.
- Describir la afectación del entorno al sistema OFDM.
- Mencionar los tipos de amplificadores de potencia con sus clases.
- Relacionar el problema de un alto PAPR de la señal en los sistemas OFDM.
- Describir el Modelo de Rapp, que simula el comportamiento de un amplificador de potencia no lineal.
- Implementar en Matlab® tanto el transmisor como el receptor de un sistema OFDM.
- Implementar en Matlab® el Modelo de Rapp para el amplificador de potencia.
- Integrar en Matlab® el transmisor OFDM con el Modelo de Rapp
- Simular el sistema OFDM y el HPA para obtener resultados en términos de PSD y BER.
- Analizar los resultados obtenidos de las simulaciones a través de conclusiones coherentes.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

OFDM es una técnica de modulación para señales digitales en la cual una única corriente de datos, se distribuye por medio de varios canales paralelos de banda estrecha modulados llamados subportadoras (Gharaibeh, 2012). Es decir, es un tipo de modulación multiportadora ya que cada canal trabaja a diferentes frecuencias. La diferencia de OFDM con otros tipos de modulación multiportadora radica en el hecho que las subportadoras son multiplexadas ortogonalmente.

En este capítulo se explicará los conceptos fundamentales de OFDM, sus principios de funcionamiento, la modulación tipo monoportadora y multiportadora con los conceptos de la transmisión tipo multiportadora, la propiedad ortogonal de las subportadoras OFDM, el transmisor OFDM, los efectos de la propagación de la señal por trayectorias múltiples, la necesidad de uso del prefijo cíclico, el receptor OFDM, las propiedades y características de OFDM, la modulación por desplazamiento de fase (Phase-Shift Keying) M-PSK, la modulación de amplitud en cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation) M-QAM y las ventajas y desventajas del sistema OFDM.

2.1 Funcionamiento de OFDM

OFDM es un método de transmisión/recepción vía digital en la cual se multiplexan los datos (recibidos inicialmente vía serial con una relativa tasa alta de datos) en subportadoras de distintas frecuencias representando canales paralelos, con una más baja tasa de datos. Dado este principio de funcionamiento que la hace definir como una técnica de transmisión multiportadora.

La Figura 5 ilustra a modo de ejemplo como se realiza la modulación multiportadora con N sub-canales se presenta (Dhakai, 2013). Aquí los símbolos de datos recibidos vía serial son convertidos a paralelo y

posteriormente modulados en cada una de las subportadoras, convirtiéndose en símbolos de datos paralelos.

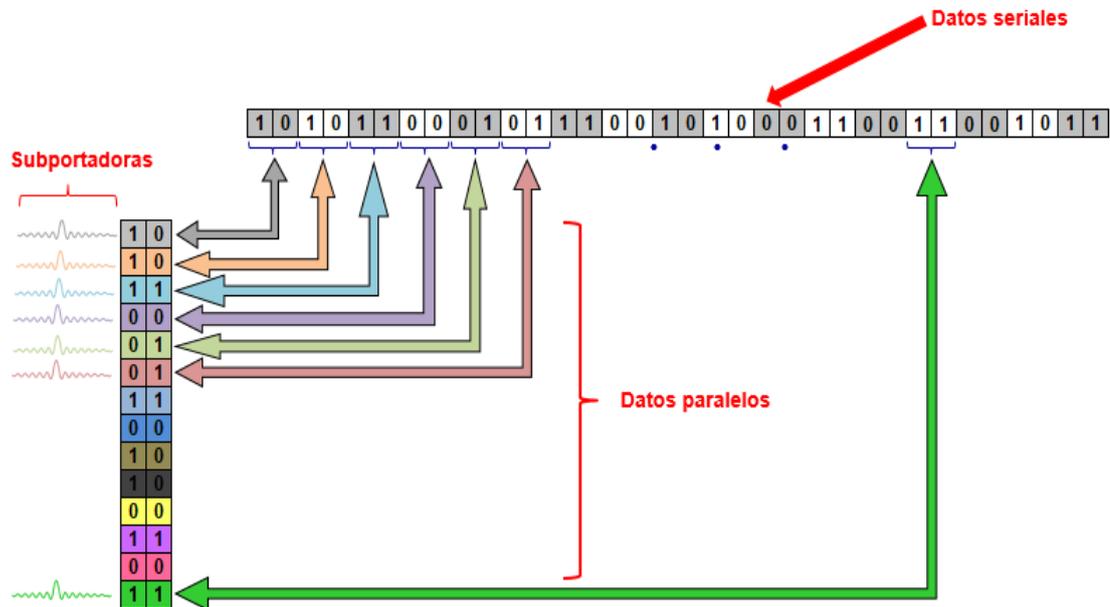


Figura 5 Modulación multiportadora (conversión serial – paralelo con N canales)

Fuente: (Dhakal, 2013)

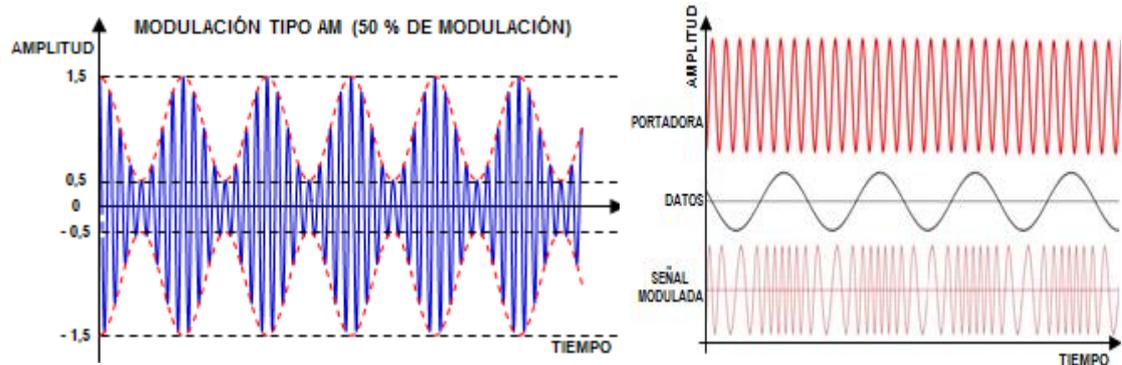
2.2 Modulación tipo monoportadora y subportadora

Las técnicas tradicionales de modulación utilizan una sola frecuencia para la portadora. Esto en contraste con OFDM la cual utiliza varias subportadoras en su proceso de modulación digital.

La figura 6 presenta la diferencia fundamental entre estos dos distintos tipos de técnicas, donde la modulación monoportadora da tratamiento a los datos de forma serial, mientras que la modulación multiportadora utiliza una combinación entre el envío/ recepción de datos vía serial en conjunto con la transmisión de datos en paralelo.

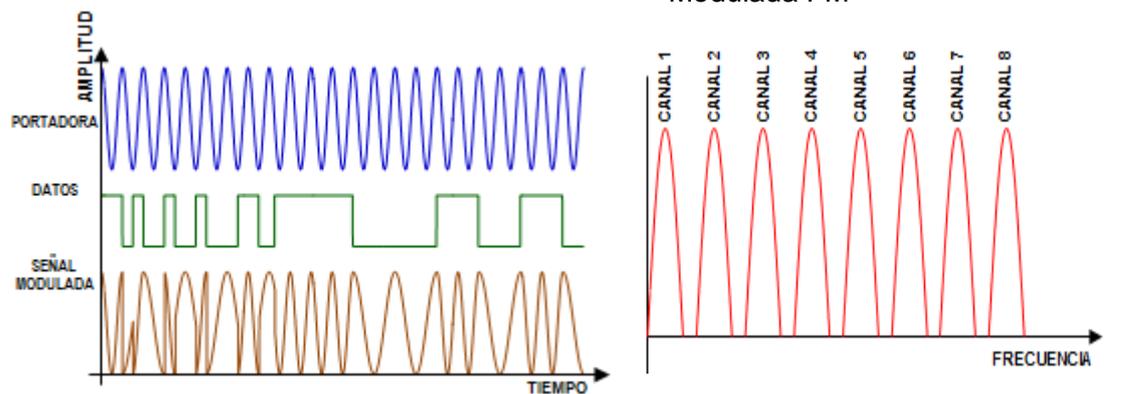
Los diagramas a, b y c, son representaciones de modulación tipo monoportadora con el comportamiento de la señal en el tiempo. En las modulaciones en amplitud modulada AM y en frecuencia modulada FM (diagramas a y b) se tiene una única portadora y la modulación es de tipo

analógica. En el diagrama a) se modula la amplitud de los datos recibidos mientras que en b) se modula su frecuencia.



a) Modulación de Amplitud Modulada AM

b) Modulación de Frecuencia Modulada FM



c) Modulación por desplazamiento de frecuencia FSK (Frequency Shift Keying)

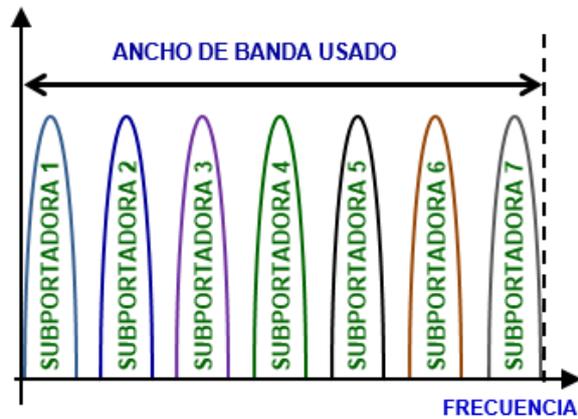
d) Modulación con técnica de multiplexación

Figura 6 Diferentes tipos de modulaciones utilizadas (monoportadoras y multiplexadoras)

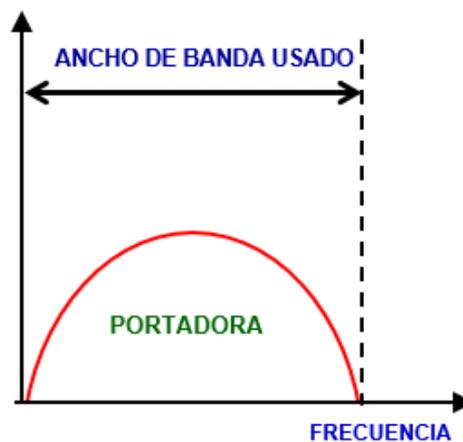
En el diagrama c), también se representa el comportamiento en el tiempo de una modulación monoportadora por conmutación de frecuencia FSK (Frequency Shift Keying), pero aquí se trata de una modulación tipo discreta o digital.

En el diagrama d) de la Figura 6, se tiene el espectro de frecuencia donde se observa la generación de ocho (8) canales (en este ejemplo), canales (subportadoras) donde se efectuará la modulación para realizar la transmisión de datos. Este es el principio de modulación multiplexadora.

En la Figura 7 se puede observar la diferencia en el espectro de frecuencia de cómo se emplea el ancho de banda entre estos dos tipos de modulaciones.



a) Modulación multiportadora



b) Modulación Monoportadora

Figura 7 Representación del espectro de frecuencia modulaciones multiportadora y monoportadora

Con la modulación monoportadora los bits de datos se modulan y los pulsos se transmiten vía serial de manera secuencial en el tiempo. En el caso de OFDM, los bloques de bits de datos se modulan en subportadoras a través de la banda de frecuencia (Perahia & Stacey, 2008) o ancho de banda. La Figura 8 muestra una representación de estas dos modulaciones con el comportamiento de los datos en frecuencia con respecto al tiempo.

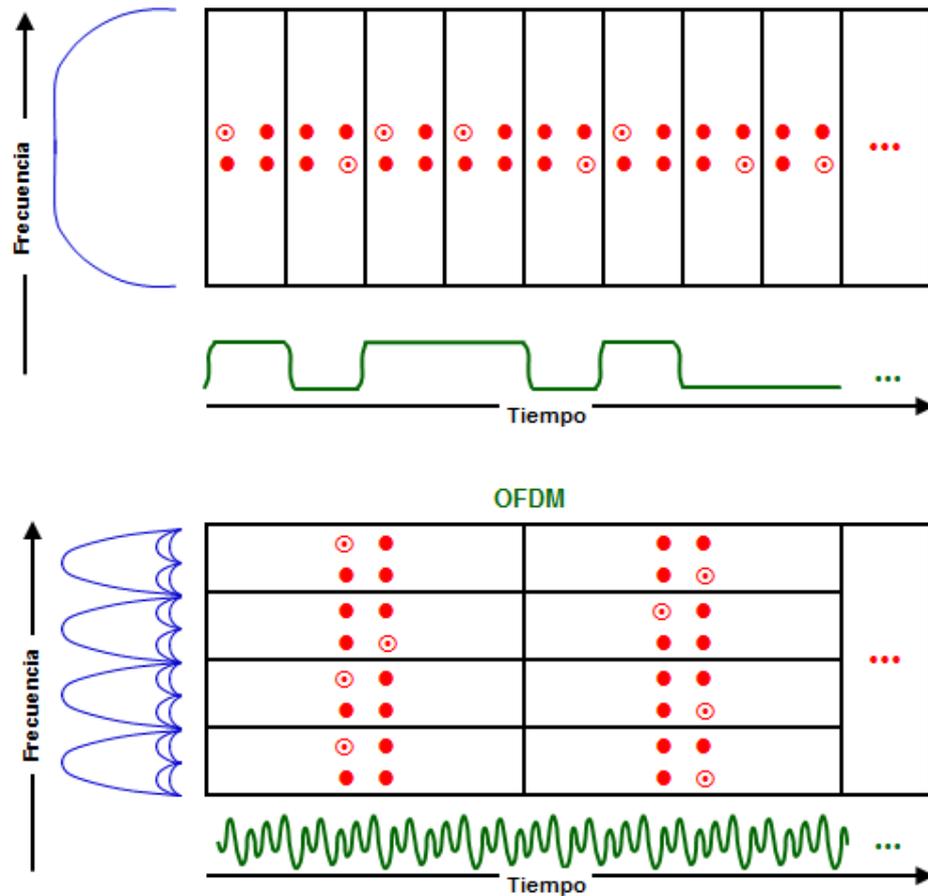


Figura 8 Comparación entre la modulación monoportadora y OFDM

Fuente: (Perahia & Stacey, 2008)

2.3 Ortogonalidad de la modulación OFDM

En la aplicación de los sistemas de modulación multiportadora, se puede utilizar distintas tecnologías tales como OFDM, la Multiplexación generalizada por división de frecuencia GFDM (Generalised Frequency Division Multiplexing) y la Modulación multiportadora de banco de filtro FBMC (Filter Bank Multi Carrier) (Poole, 2017).

Sin embargo una de las ventajas de la modulación OFDM sobre las otras técnicas es la aplicación de la ortogonalidad en su funcionamiento. Esto permite un mejor aprovechamiento del ancho de banda, comparado con las otras modulaciones multiportadoras, tal como se puede apreciar en la Figura 9 (RF Wireless World, 2017)

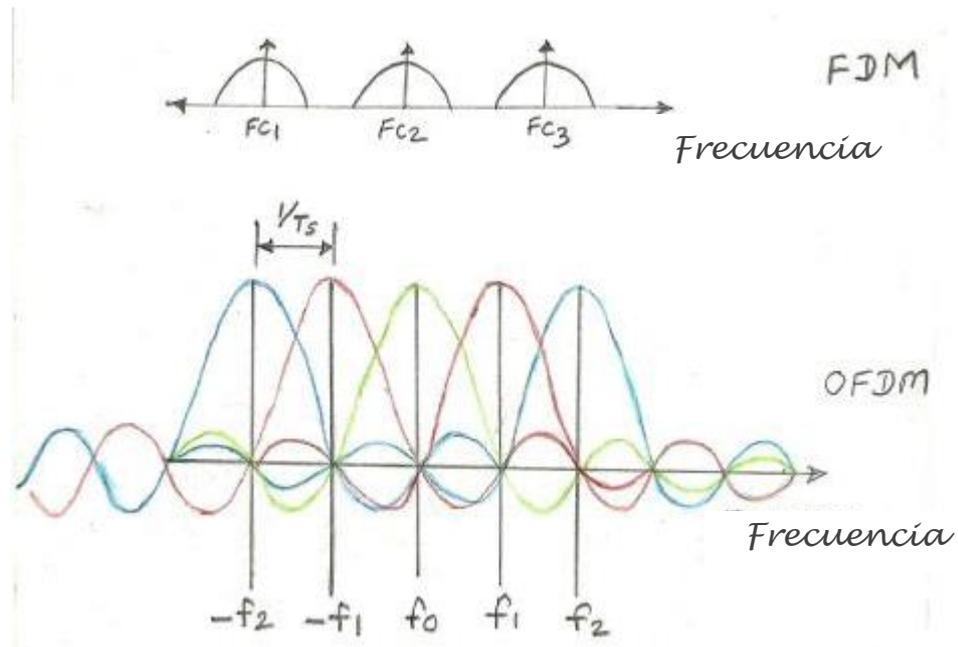


Figura 9 OFDM en comparación con una modulación tipo multiportadora convencional (Por ejemplo FDM)

Fuente: (RF Wireless World, 2017)

De acuerdo a la Figura 9 se observa que se puede utilizar un número mayor de subportadoras en OFDM que FDM para un mismo ancho de banda. Esto corrobora su mejor uso espectral por la posibilidad de poder “sobreponer” los canales entre sí.

Esta superposición o solapamiento entre cada subportadora sólo puede ser exitoso (no haya combinación de datos entre subportadoras contiguas) sólo si se mantenga la ortogonalidad entre las subportadoras.

Dos funciones diferentes de cero $f(x)$ y $h(x)$ se dicen que son ortogonales cuando en un período de tiempo el producto interno entre estas es igual a cero “0”, siendo $a \leq x \leq b$ (Dawkins, July 2017):

$$\int_a^b f(x)h(x)dx = 0 \quad (2.1)$$

Por ejemplo, para un espectro de frecuencia de ocho (8) subportadoras de un sistema OFDM, en la Figura 10, se puede apreciar su ortogonalidad

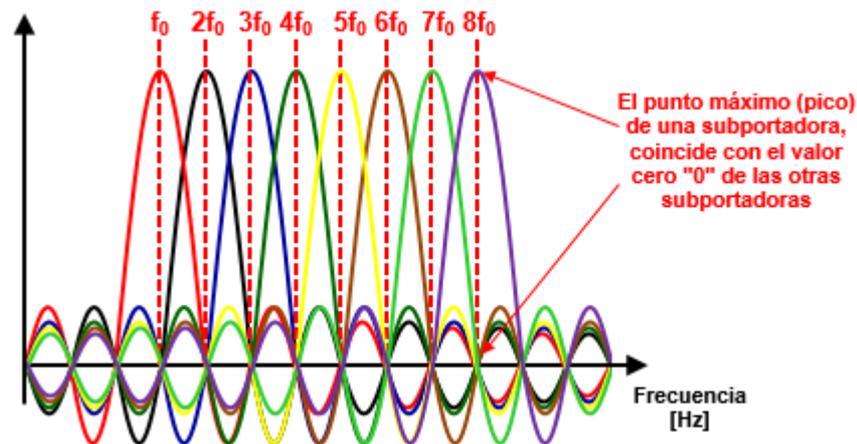


Figura 10 Ortogonalidad de OFDM vista en el espectro de frecuencias

2.4 Sistema de Transmisión OFDM

La técnica de modulación multiportadora OFDM multiplexa los paquetes de datos recibidos, conformando en pequeños grupos de datos que son transmitidos en cada una de las subportadoras que están distribuidas ortogonalmente en el ancho de banda usado.

En la Figura 11 puede observarse el sistema de transmisión donde se pretende enviar los siguientes bits de datos: $D = \{d_0, d_1, d_2, \dots, d_{N-1}\}$. El transmisor OFDM está compuesto por N subportadoras con frecuencias ortogonales entre ellas, desde la subportadora 0 hasta la subportadora $N - 1$. Por otra parte OFDM requiere el empleo de alguna otra técnica de modulación tipo digital para los datos. Estas pueden ser: modulación binaria por desplazamiento de fase BPSK (Binary Phase Shift Keying), modulación en cuadratura por desplazamiento de fase QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying), modulación de amplitud en cuadratura QAM (Quadrature Amplitude Modulation), o cualquier otra.

Los datos (D) se transforman primero desde datos seriales a un flujo de datos paralelos dependiendo del número de subportadoras (N) Esos datos paralelos son modulados digitalmente (BPSK, QPSK, QAM, etc.) produciendo las distintas señales de salida moduladas: $S_0, S_1, S_2, \dots, S_{N-1}$ (Esta acción se realiza por medio de un mapeador de la constelación).

Luego que los bits de datos se transforman con el formato de modulación adecuado, estos se “montan” (se superponen) en cada subportadora con frecuencias ortogonales necesarias para realizar la transmisión OFDM. Para realizar esto inicialmente se requeriría N osciladores sinusoidales paralelos que estén sintonizados a N frecuencias ortogonales ($f_0, f_1, f_2, \dots, f_{N-1}$). Las señales superpuestas $k_0, k_1, k_2, \dots, k_{N-1}$ al final se suman para producir la señal OFDM que se va a transmitir (Viswanathan, 2011).

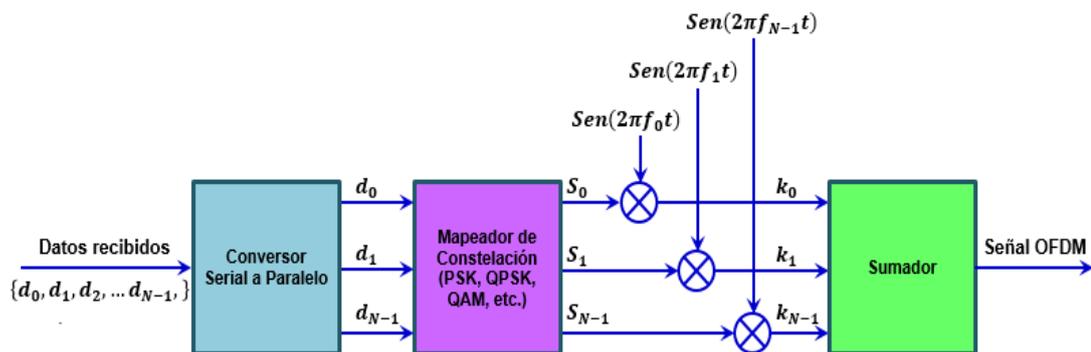


Figura 11 Transmisor OFDM

Fuente: (Viswanathan, 2011).

De esta manera la señal OFDM se expresa de la manera siguiente (ver ecuación 2.2):

$$\text{Señal OFDM} = \sum_{n=0}^{N-1} S_n(t) \text{sen}(2\pi f_n t) \quad (2.2)$$

Donde: $S_n(t)$ = Símbolos mapeados a la constelación escogida (BPSK, QPSK, QAM, etc.).

f_n = Frecuencia ortogonal.

N = Número de subportadoras.

Este esquema de transmisor OFDM presenta la desventaja que requiere de N osciladores para producir las subportadoras de señales sinusoidales ortogonales.

Sin embargo, tomando en cuenta la estructura de la ecuación 2.2, se puede reordenar la misma para expresarla como un proceso de

Transformada rápida de Fourier inversa IFFT (Inverse Fast Fourier Transform).

En esencia la transformada de Fourier establece que una señal puede ser representada como la suma de una serie de sinusoides. Este proceso convierte la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

En el caso de la transformada rápida de Fourier inversa el proceso de conversión es desde el dominio de frecuencia al dominio de tiempo (Viswanathan, 2011), como se indica en la ecuación 2.3:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \operatorname{cos}\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (2.3)$$

Siendo: $x(n)$ = Transformada rápida de Fourier inversa.

De esta manera se puede utilizar la IFFT en la transmisión OFDM (eliminando los multiplicadores sinusoidales no requeridos) y así evitar el uso de una cantidad de circuitería compleja para los osciladores individuales de cada subportadora. Con esta herramienta de uso de IFFT, el transmisor OFDM queda simplificado en la Figura 12:



Figura 12 Transmisor OFDM utilizando IFFT

2.5 Propagación de la señal por trayectorias múltiples

Antes de continuar con la descripción del sistema OFDM (descripción del receptor OFDM), es importante mencionar algunas características inherentes al proceso de transmisión inalámbrica de las señales. Esto porque debido a ello, es necesario incluir dentro del proceso de transmisión algunas herramientas que permiten subsanar algunas dificultades presentadas.

La señal transmitida desde la antena de un dispositivo transmisor, conformada por una secuencia de símbolos, tiene múltiples caminos posibles para llegar hasta la antena del dispositivo receptor debido a la presencia de obstáculos, paredes, árboles, nubes, aviones o el mismo suelo, en los que rebota la señal. Para cada uno de estos trayectos posibles la señal recorrerá una distancia diferente, por lo que la señal procedente de diferentes trayectos llegará a la antena receptora en diferentes instantes de tiempo. Este fenómeno es denominado propagación de la señal por trayectorias múltiples.

Este efecto es causado por diferentes causas entre las que están (Pérez Fontán & Mariño Espiñeira, 2008):

- Reflexión. Ocurre cuando la señal encuentra una superficie que es larga comparado con la longitud de onda de la señal.
- Difracción. Ocurre en los lados de un cuerpo impenetrable que es muy grande en comparación a la longitud de onda de la onda de la señal.
- Dispersión (Scattering, en inglés). Sucede cuando la señal tropieza en un cuerpo cuyo tamaño está en el orden o es menor que la longitud de onda de la señal.

Como consecuencia de estos problemas se produce un “desvanecimiento de la señal” (fading) ya que la señal puede alcanzar el receptor por medio de diferentes rutas, tal como es mostrado en forma gráfica en la Figura 12.

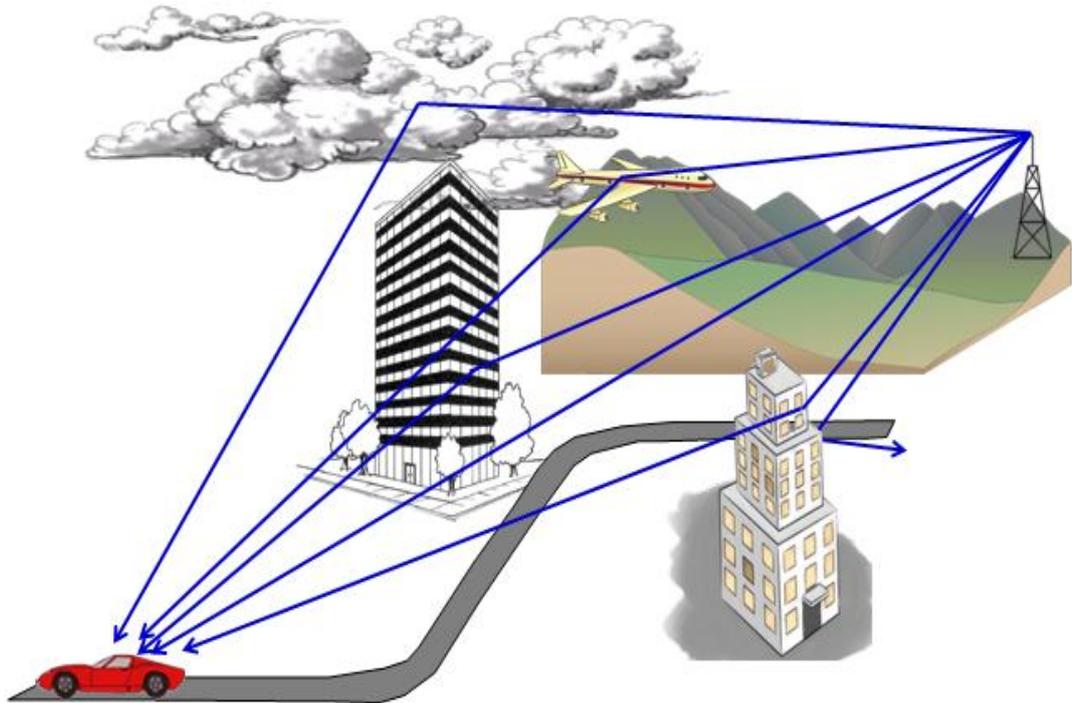


Figura 13 Fenómeno de trayectorias múltiples de la señal

Fuente: (World, 2012)

Al presentarse estas múltiples rutas las señales (réplicas desfasadas de la señal original) se produce un comportamiento temporal irregular del canal de comunicación y no se tiene la respuesta ideal, traduciéndose en una respuesta larga de dicho canal (en ocasiones indefinidas).

Sin embargo, el principal problema de estos retardos es la generación de la Interferencia entre Símbolos ISI, "Inter Symbol Interference", en donde ocurre un solapamiento de datos entre símbolos adyacentes (Fazel & Kaiser, 2008).

La Figura 13, presenta en qué consiste la Interferencia entre símbolos ISI (World, 2012), donde se expone la interferencia ocurrida cuando se genera un retraso en la señal recibida de $1/8$ de la longitud del símbolo, debido a los efectos de trayectorias múltiples de la señal o efecto multitrayectoria.

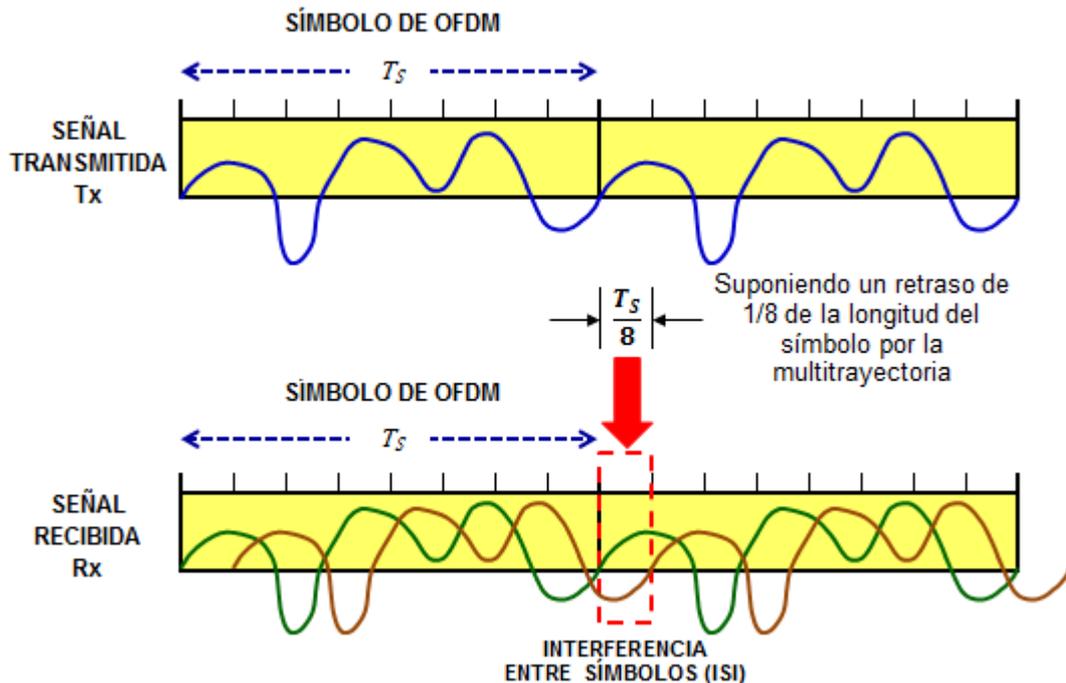
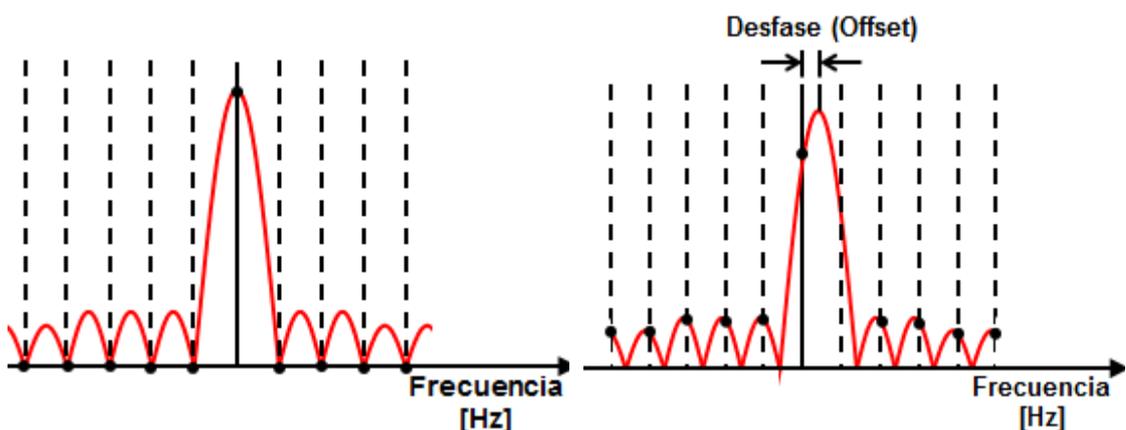


Figura 14 Afectación del siguiente símbolo por retraso de la señal por la aparición múltiples trayectorias

Otro problema importante que puede causar estos retrasos es el conocido como interferencia interportadora ICI, "Intercarrier Interference". Esto sucede cuando se pierde la ortogonalidad que existe entre las subportadoras.

La Figura 14, muestra la aparición de un desfase entre subportadoras por retraso en la señal (conocido también como frequency offset).



- a) Comportamiento normal en espectro de frecuencia en b) Desplazamiento (Offset) por retraso en señal

Figura 15 Presencia de Offset en subportadora

2.6 Prefijo cíclico

De acuerdo a lo descrito en la sección anterior, por el fenómeno de trayectorias múltiples de la señal o multicamino, se puede recibir señales duplicadas retrasadas de las señales transmitidas obteniéndose lo que se conoce como el efecto “Interferencia entre Símbolos” ISI. Aquí ocurre un mezclado de datos entre el símbolo predecesor y el símbolo posterior.

Para evitar estas interferencias y poder proteger la integridad de los datos recibidos, se añade el prefijo cíclico, tal como se muestra en la Figura 16:

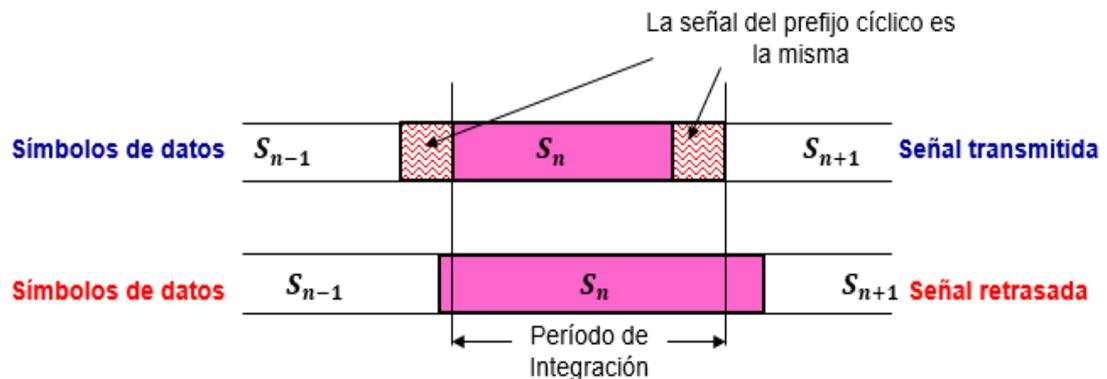


Figura 16 Prefijo cíclico

Por medio de la inclusión del prefijo cíclico la duración de tiempo del símbolo de datos se incrementa de tal manera que sea mayor al período de tiempo que emplea el receptor en la integración de los datos. Con esto, la señal modulada por OFDM completa también incrementa su longitud en el tiempo. Como todas las subportadoras presentan un comportamiento cíclico el segmento de datos que se incluye al inicio de cada símbolo para conformar el prefijo cíclico, es completamente similar al segmento de datos al final de cada símbolo.

Así, si la señal sufre un retardo en su trayecto menor al prefijo cíclico, durante el proceso de integración en el receptor se conoce que provienen del mismo símbolo y por tanto no hay interferencia en los datos. De esta manera el ISI o el ICI tendrán lugar solamente si el retardo relativo excede la duración del prefijo cíclico (Pérez Vega, 2004).

2.7 Sistema de recepción OFDM

Al llegar al sistema de recepción OFDM, la señal se recibe conjuntamente con el ruido recogido del canal de transmisión y los desvanecimientos de la señal por los multicaminos.

En el receptor inicialmente la señal debe pasarse por un filtro pasa bajo, para eliminar aquellos componentes de alta frecuencia y ruido que no son inherentes a la señal de origen.

Posteriormente la señal OFDM se convierte nuevamente a discreta por medio de un convertidor analógico-digital.

Luego la señal se lleva a símbolos paralelos para recuperar la misma estructura que tenía previo a la transmisión desde el lugar de origen de los datos. Es aquí donde se extrae el prefijo cíclico que fue introducido en el proceso de transmisión y se sincroniza en frecuencia a través de un oscilador local. Esta sincronización se realiza para que las distorsiones en frecuencia y fase de las portadoras (producidos por el ruido del canal y el efecto de multitrayectoria) sean corregidas.

Es en este entonces cuando se aplica a la señal la transformada rápida de Fourier directa, de modo de llevar los datos a símbolos paralelo puros sin la presencia de las subportadoras. Aquí se procede a demapearlos (emplear demodulación digital que fue aplicada en la transmisión: BPSK, QPSK, QAM, etc.) para finalmente poder llevar los datos a tipo serial en un convertidor paralelo/serial y ser recibidos por el cliente.

En la Figura 17 está la representación en bloque del sistema de recepción OFDM.

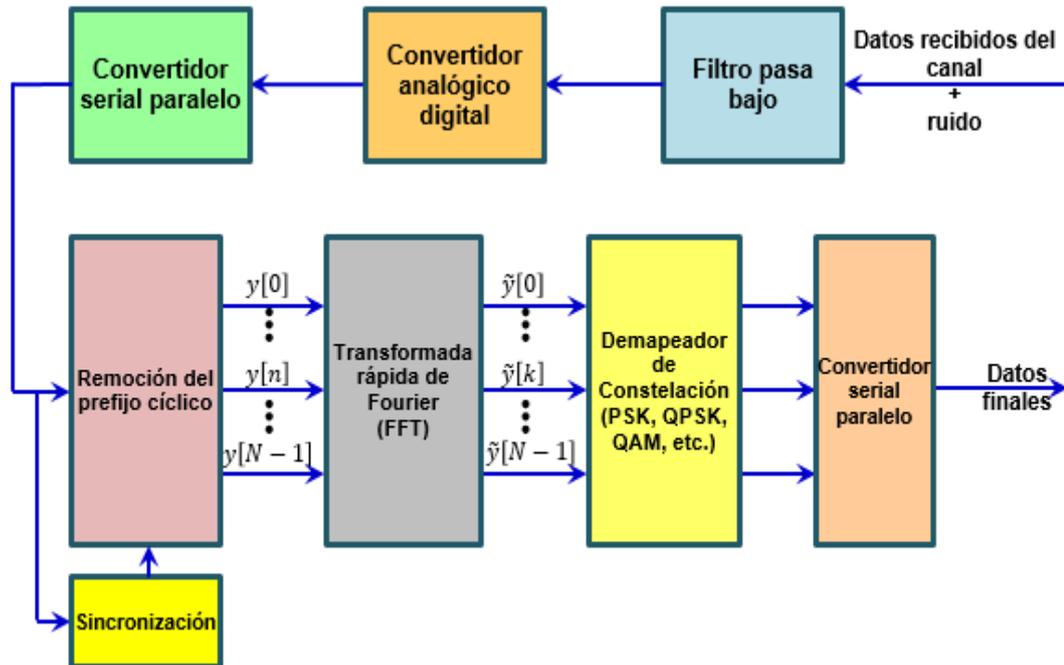


Figura 17 Modelo del receptor OFDM en tiempo continuo

2.8 Sistema integrado de transmisión/recepción OFDM

Una vez descrito por separado el receptor OFDM, el transmisor OFDM y presentado los elementos adicionales requeridos en la modulación OFDM para superar el obstáculo de los inconvenientes presentados por el fenómeno de múltiples trayectorias, en la Figura 18 se observa un sistema de comunicación OFDM donde el transmisor y el receptor están conectados a través del canal de comunicación (Goldsmith, 2005) y (Paredes, 2014).

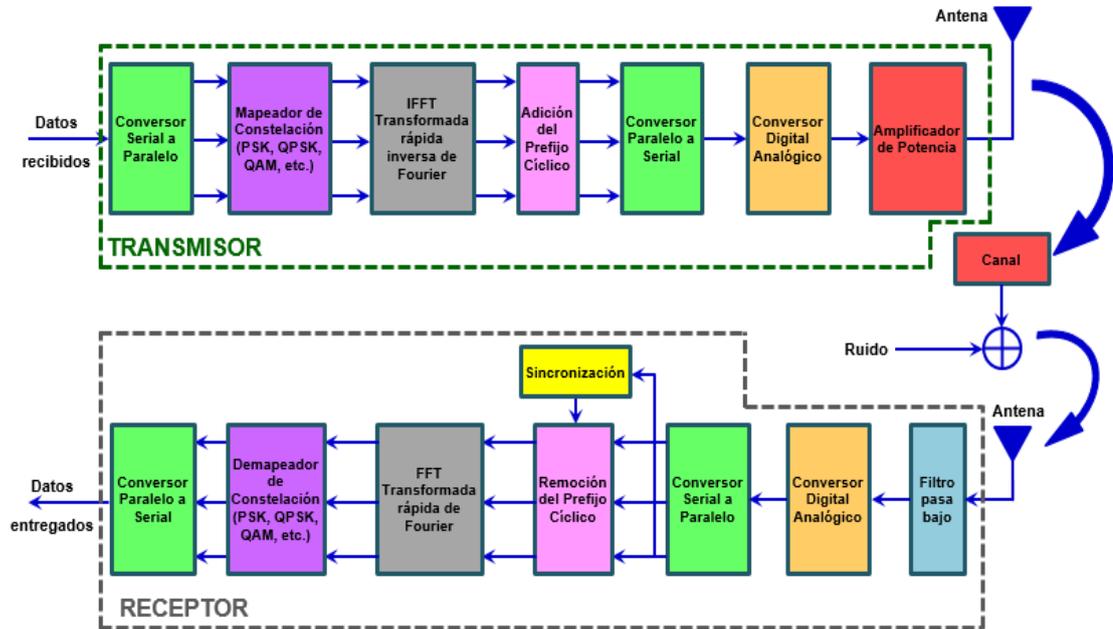


Figura 18 Diagrama de bloques de un sistema OFDM

Fuente: (Goldsmith, 2005)

De acuerdo a lo anterior, se ha visto la necesidad de utilizar alguna técnica de modulación digital en cada subportadora (BPSK, QPSK, QAM, etc.), por lo que a continuación se explican el principio de funcionamiento de estas técnicas.

2.9 Técnicas de modulación digital

2.9.1 Modulación M-PSK

La modulación por desplazamiento de fase PSK (phase-shift keying) es un tipo de modulación digital angular de amplitud constante en la cual la señal de entrada es una señal digital binaria se puede obtener una cantidad limitada de fases de salida.

En su modo más simple la modulación M-PSK adopta sólo dos valores de desplazamiento de fase: 0 y 180° , por lo que se denomina modulación por desplazamiento de fase binaria B-PSK (Binary phase-shift keying).

La señal B-PSK se rige bajo la expresión indicada en la ecuación 2.4 (Briceño J. E., 2012).

$$X_{PSK}(t) = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos(2\pi f_c t - \phi_i) \cdot \prod\left(\frac{t - T_b}{T_b}\right) \quad (2.4)$$

Donde: A = Amplitud de la señal portadora.
 f_c = Frecuencia de la señal portadora.
 T_b = Período de la señal portadora.
 $\phi_i = \begin{cases} 0 & \text{Si se ha transmitido un "1"} \\ \pi & \text{Si se ha transmitido un "0"} \end{cases}$

Las señales portadora, los datos binarios y la señal modulada correspondientes a una modulación B-PSK, pueden apreciarse en la Figura 19:

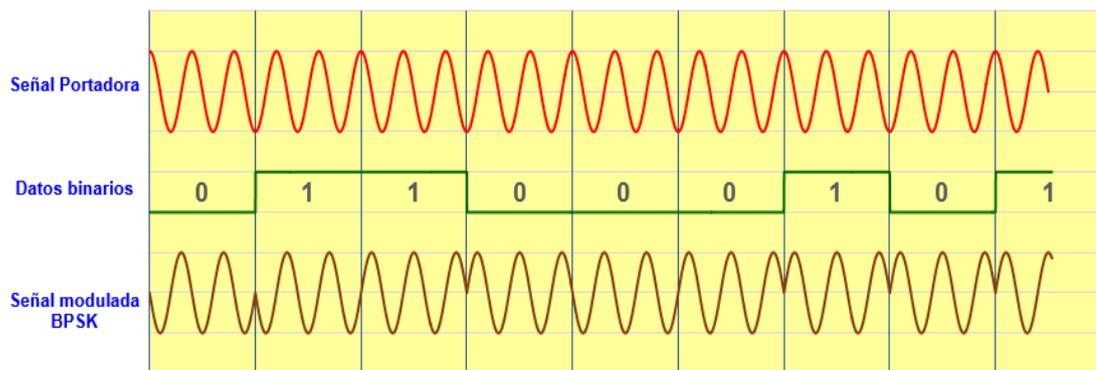


Figura 19 Señales correspondientes a una modulación B-PSK

Fuente: (Briceño J. E., 2012)

La codificación binaria en PSK funciona excelente en sistemas de transmisión de datos a baja velocidad, cuya frecuencia de señalización está acotada alrededor del ancho de banda del canal de transmisión.

No obstante, en canales de transmisión donde el ruido lo permita, se pudiese transmitir M valores de amplitud, frecuencia o fase de una portadora sinusoidal. De esta manera se pudiera enviar mayor cantidad de datos por segundo y por ende el rendimiento del canal se ve incrementado (Briceño J. E., Abril, 2005).

En la modulación MPSK (Multi-PSK) la fase de la señal portadora puede tomar M valores posibles de fase modificados mediante la expresión 2.5 (Equipo administrador de Textos Científicos, 2005).

$$\theta = \frac{2\pi}{M} \quad (2.5)$$

Donde: M = Niveles de amplitud de la señal portadora.

Este es un caso se trata de una modulación tipo multinivel. Aquí la señal portadora podrá tener asignación de M valores de amplitud dependiendo de los datos a transmitir.

En la Figura 20 se muestra distintos diagramas de constelación para algunas modulaciones M-PSK

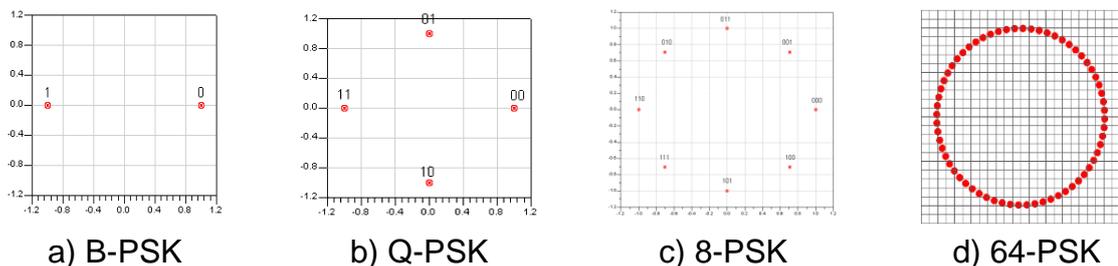


Figura 20 Diagramas de constelación para modulaciones M-PSK

Fuente: (Briceño J. E., Abril, 2005)

2.9.2 Modulación M-QAM

La modulación de amplitud en cuadratura QAM (Quadrature Amplitude Modulation), es una técnica de transmisión digital en donde los datos están modulados, tanto en amplitud como en fase de la señal portadora.

La modulación se logra utilizando dos señales portadoras, desfasadas 90° ellas. Con ello se tiene dos (2) canales ortogonales entre sí, transmitidos utilizando el mismo ancho de banda, mejorando el rendimiento.

La forma de onda de la modulación M-QAM puede ser expresada como se indica en la ecuación 2.6 (Proakis & Salehi, 2008):

$$S_m(t) = A_{mi}g(t) \cos(2\pi f_c t) - A_{mq}g(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (2.6)$$

Siendo:

- $m = 1, 2, \dots, M$
- A_{mi} = Amplitud de la portadora i .
- A_{mq} = Amplitud de la portadora q .
- f_c = Frecuencia de las señales portadoras.

La ecuación 2.6 puede ser reorganizada, tal como se observa en la ecuación 2.7, en la cual se puede distinguir la modulación combinada tanto en amplitud como es fase:

$$S_m(t) = r_m \cos(2\pi f_c t + \theta_m) \quad (2.7)$$

Donde:

$$r_m = \sqrt{A_{mi}^2 + A_{mq}^2}$$

$$\theta_m = \tan^{-1} \left(\frac{A_{mq}}{A_{mi}} \right)$$

En la Figura 21 se presenta distintos diagramas de constelación para algunas modulaciones M-QAM.

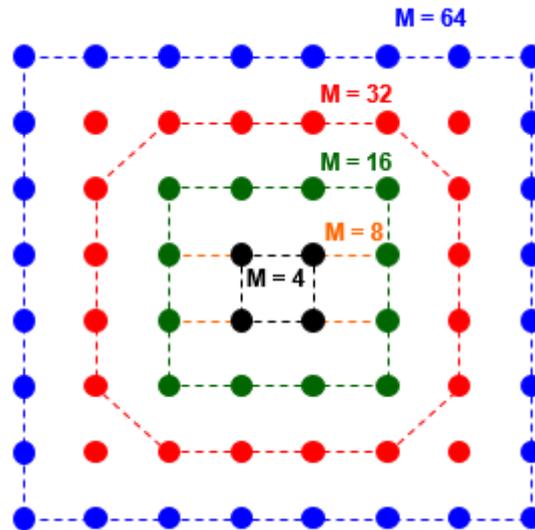


Figura 21 Algunas señales de espacio para la modulación QAM

2.10 Ventajas y desventajas de OFDM

Una vez visto los elementos que constituyen un sistema OFDM, su principio de funcionamiento y el entorno en el cual opera, es importante puntualizar las debilidades y fortalezas de este sistema.

2.10.1 Ventajas

OFDM como técnica de modulación para la transmisión y recepción de datos posee las siguientes ventajas (Hranac, 2012), (Kokane, 2015) y (Singh & Singh, 2015):

- Una gran cantidad de datos se pueden transmitir y recibir usando un simple ecualizador para detectar los datos.
- En el caso de transmisiones vía óptica, la ecualización se puede ajustar sin mayores complicaciones, para adaptarse a las condiciones severas del canal de comunicación.
- Los sistemas basados en OFDM exhiben una alta eficiencia espectral. Al usar múltiples subportadoras de banda estrecha de manera ortogonal superpuestas entre ellas, permite que el ancho de banda total utilizado se reduzca.

- El poder aplicar las operaciones de implementación eficiente de las Transformadas directa/inversa de Fourier discreta, permiten simplificar el diseño de la circuitería digital al no tener la necesidad de fabricar circuitos osciladores independientes en el transmisor, por cada subportadora y circuitos integradores en el receptor. La aplicación del IFFT y del FFT se realiza por medio de métodos computacionales.
- Baja sensibilidad a errores de sincronización.
- OFDM puede compensar las discapacidades lineales de los campos eléctricos haciendo más tolerable ante la dispersión por modo de polarización PMD (Polarisation Mode Dispersion).

2.10.2 Desventajas

No obstante, OFDM también tiene algunas desventajas (Parvez & Al Baki, 2010), (Singh & Singh, 2015) y (Hranac, 2012):

- Aunque se mencionó como una ventaja la baja sensibilidad a errores de sincronización, cuando se comparte la comunicación de las subportadoras entre diferentes transmisores vía OFDM, se dificulta la sincronización en la recepción de los datos.
- La relación entre la potencia pico a potencia media PAPR³ es elevada en sistemas OFDM. Los problemas de alto PAPR se presentan cuando hay importantes picos de la potencia instantánea en el dominio del tiempo. Por otro lado el PAPR es directamente proporcional a la cantidad de subportadoras utilizadas en OFDM. Así en los sistemas de transmisión con gran cantidad de subportadoras esto puede convertirse en un gran dolor de cabeza para el diseñador.

³ El concepto de PAPR y el problema de un alto PAPR en OFDM es tratado en el capítulo 3.

- OFDM tiene una mayor cantidad de componentes en su circuitería que los correspondientes a las comunicaciones por medio de una sola portadora.

CAPÍTULO III

AMPLIFICADORES DE POTENCIA

Los amplificadores de potencia están siempre en el bloque final de la cadena de transmisión de un sistema Transmisor-Receptor (Samal, Mahapatra, & Ram, 22-24 Feb. 2012). Ellos amplifican una señal con un nivel de potencia adecuada para su transmisión a través de una antena o algún otro medio de transmisión. Es por ello la importancia del funcionamiento de este dispositivo dentro del sistema OFDM.

En el presente capítulo se describirá los principios de funcionamiento del amplificador, los tipos de amplificadores, la definición de los amplificadores de potencia, las características y propiedades de los amplificadores de potencia, los parámetros input back-off IBO y output back-off OBO en un amplificador de potencia, el problema de tener una alta relación entre la potencia pico con respecto a la potencia promedio (Peak to Average Power Ratio) "PAPR", los amplificadores de potencia de estado sólido, los amplificadores de potencia de tubos de vacío, las clases de amplificadores de potencia y la descripción del modelo matemático Rapp para amplificadores de potencia.

3.1 Principios de funcionamiento del amplificador

El término amplificador es una palabra que, en su concepto amplio se refiere a, cualquier "Aparato que sirve para aumentar la amplitud o intensidad de un fenómeno físico".⁴ Esto es, un dispositivo que, mediante la utilización de energía, incrementa la amplitud de un medio que lo utiliza.

En términos eléctricos/electrónicos, un amplificador es un aparato que logra aumentar la corriente, el voltaje o la potencia de una señal. El uso de los amplificadores se requiere usualmente en comunicaciones inalámbricas,

⁴ Real Academia Española ©

en transmisión de datos y video, y en equipos de audio de todo tipo. Pueden ser de dos tipos: amplificadores de señal débil o amplificadores de potencia.

Para poder realizar esta amplificación, se requiere el uso de una fuente de alimentación, la cual debe suministrar la potencia requerida, tal como se muestra en la Figura 22.

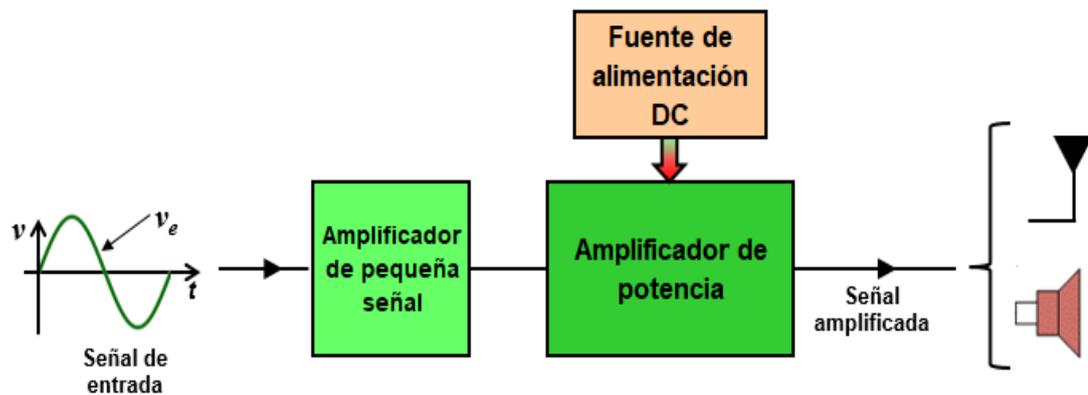


Figura 22 Amplificador de Potencia

3.2 Tipos de amplificadores

Existen diversos criterios de clasificación de los amplificadores (Brančik & Dostál, 2010): por la impedancia de carga (resistivos, capacitivos, inductivos, resonantes, de impedancia general), por el acoplamiento de las etapas (galvánicos, pasivos, activos, de corriente alterna, de corriente directa, correctivos), por la magnitud de la señal de entrada (de pequeña señal, de gran señal), por la frecuencia de operación (de corriente directa, de corriente alterna de muy alta frecuencia), por el ancho de banda en el cual opera (de ancho de banda angosta, sintonizado, de ancho de banda amplia), por el tipo de elementos que lo componen (de estado sólido, de tubos de vacío), por cómo están implementados (circuitos discretos, circuitos integrados, circuitos monolíticos, circuitos híbridos), etc.

3.3 Amplificadores de potencia

Un amplificador de potencia es un aparato en el cual se ha diseñado su etapa de salida para suministrar voltajes y/o corrientes de mayor amplitud para poder ser capaz de suministrar la potencia requerida por la carga (Drake Moyano, 2005).

Los amplificadores de potencia son principalmente utilizados en aplicaciones que requieren altas corrientes de conmutación como manejo de motores, como salida en sistemas de audio o en la transmisión de datos en sistemas de comunicaciones a grandes distancias, por lo que la eficiencia⁵ del uso de potencia es también otra necesidad en estos casos.

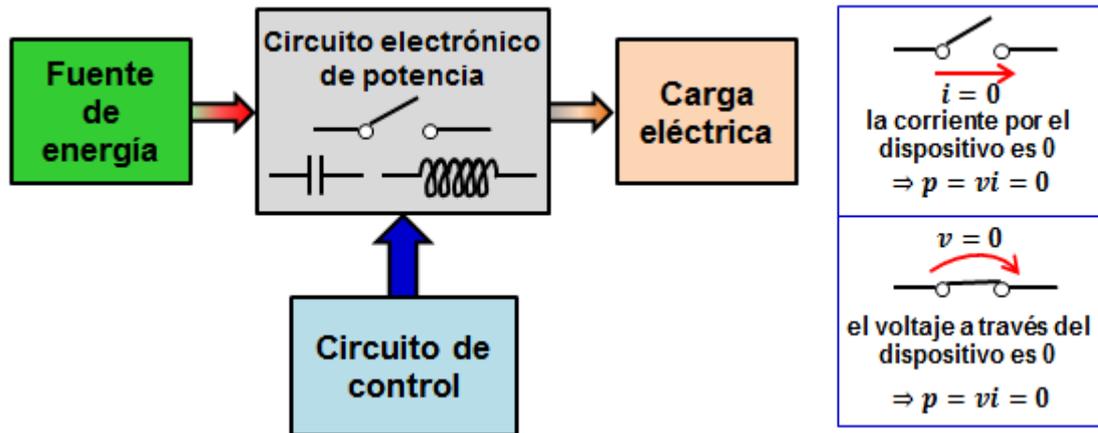
Aunque existen varias clases de amplificadores de potencia que funcionan en su zona lineal, también se encuentran una gran cantidad de diseño de amplificadores de potencia que operan por conmutación⁶ en la que la eficiencia es incrementada.

Sobre la base de la importancia de la eficiencia al utilizarse circuitos de potencia, Patrick Austin, Marie Breil y Jean-Louis Sánchez., en el capítulo 9 del libro "Power Electronics Semiconductor Devices" (editado por Robert Perret), indican que en la electrónica de potencia los componentes semiconductores pueden ser como unos conmutadores operando entre dos estados: abierto y cerrado (Perret, Robert;, 2009).

Al operar de ese modo la potencia que se disipa en la circuitería es muy pequeña, aumentando la eficiencia de estos circuitos, como puede verse en la Figura 23.

⁵ El parámetro eficiencia relaciona cuánta potencia de la fuente de alimentación es utilizada para ser entregada a la señal de salida y cuánta potencia se desperdicia, se disipada o se pierde en calor. Este parámetro será expuesto en la Sección 3.4.

⁶ Las clases de los amplificadores de potencia son descritas en la Sección 3.5.



a) Sistema de potencia electrónico básico

b) Reducción de pérdidas de potencia

Figura 23 Mejora de eficiencia en electrónica de potencia usando los dispositivos en su operación como conmutadores

3.4 Características y propiedades de los amplificadores de potencia

La escogencia del amplificador de potencia adecuado depende del sistema donde vaya a ser instalado, por lo que para su diseño es necesario conocer algunos parámetros, definiciones, características, propiedades y limitaciones inherentes de los amplificadores.

3.4.1 Ganancia en un amplificador de potencia

La ganancia de un amplificador de potencia se define como la división de la potencia de salida entre la potencia de entrada de la señal. Esta magnitud es comúnmente referida en decibelios dB (MITEQ, 2010) como se indica en la Fórmula 3.1:

$$G = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{OUT}}{P_{IN}}\right) \quad (3.1)$$

Siendo G : Ganancia
 P_{OUT} : Potencia de Salida
 P_{IN} : Potencia de Entrada

3.4.2 Uniformidad de ganancia en un amplificador de potencia

La uniformidad (o también puede ser usado el término horizontalidad) de ganancia (Gain flatness) describe la variación de la ganancia en un amplificador, sobre un rango de frecuencias de operación a una temperatura fija, dentro del rango de temperaturas de operación del amplificador (MITEQ, 2010). Como tal, no incluye la variación de la ganancia en función de la temperatura.

La uniformidad de ganancia de un amplificador se mide determinando la diferencia entre la ganancia mínima y la ganancia máxima registrada en el rango de frecuencia especificado. A menos que el amplificador esté especificado para funcionar en un rango de temperatura definido, esta medición se realiza a temperatura ambiente (23 °C). Si se especifica una rango de temperaturas, la medición también debe ser verificada en los extremos del rango (MITEQ, 2010).

La Figura 24 muestra la uniformidad de ganancia y cómo se calcula.



$$Uniformidad\ de\ ganancia = \pm \frac{(Gan.\ max - Gan.\ min)}{2}$$

Figura 24 Uniformidad de ganancia en un amplificador de potencia

3.4.3 Linealidad de un amplificador de potencia

La linealidad en un es una característica que refleja la "fidelidad" en el caso de amplificadores de audio o de telecomunicaciones. Esta característica se refiere a la función del amplificador para aumentar el nivel de potencia de una señal de entrada sin modificar el contenido de la señal. El término linealidad proviene de la relación lineal entre la potencia de entrada y la potencia de salida de un amplificador que, en un amplificador ideal, tendría una ganancia uniforme y constante (Browne, 2009).

En la Figura 25 se presenta la comparación entre amplificadores lineales y amplificadores no lineales

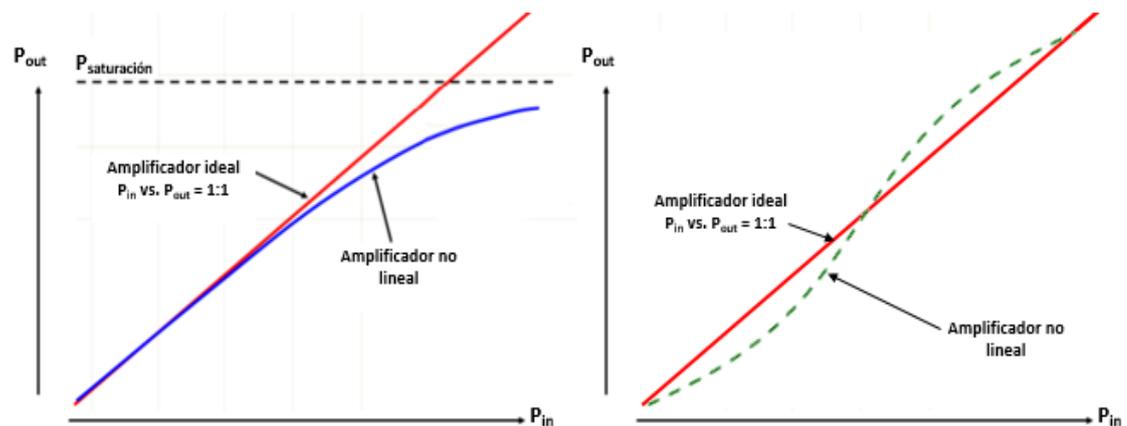


Figura 25 Linealidad en un amplificador

3.4.4 Eficiencia en un amplificador de potencia

La eficiencia, conjuntamente con la linealidad, es un factor crítico en el diseño del amplificador de potencia (Raab, y otros, March 2002). Por medio de este factor se determina cuánta potencia de la fuente de alimentación es utilizada para amplificar la señal de salida y cuánta potencia es desperdiciada, disipada o perdida en calor.

La eficiencia (η) expresa la relación entre la potencia de salida (P_{OUT}) y la potencia de la señal de entrada (P_{in}), como se muestra en la ecuación 3.2 (Raab, y otros, March 2002).

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{DC}} \quad (3.2)$$

Siendo η : Eficiencia [%]
 P_{OUT} : Potencia de salida [Vatios]
 P_{DC} : Potencia de la fuente de alimentación [Vatios]

También es común utilizar el parámetro PAE (Power Added Efficiency), en la cual de la potencia de salida del amplificador se sustrae la potencia de entrada, como puede verse en la expresión 3.3.

$$PAE = \frac{(P_{OUT} - P_{in})}{P_{DC}} \quad (3.3)$$

Donde PAE : Eficiencia de potencia añadida
 P_{OUT} : Potencia de salida
 P_{DC} : Potencia de la fuente de alimentación
 P_{IN} : Potencia de entrada

El PAE proporciona una indicación razonable del funcionamiento del amplificador cuando la ganancia es alta, sin embargo puede ser negativa para bajas ganancias.

3.4.5 Ancho de banda de un amplificador de potencia

Los amplificadores de potencia tienen un rango de operación de las frecuencias a las cuales pueden trabajar sin detrimento de la ganancia. Este parámetro se define como “ancho de banda” (ver Figura 26).

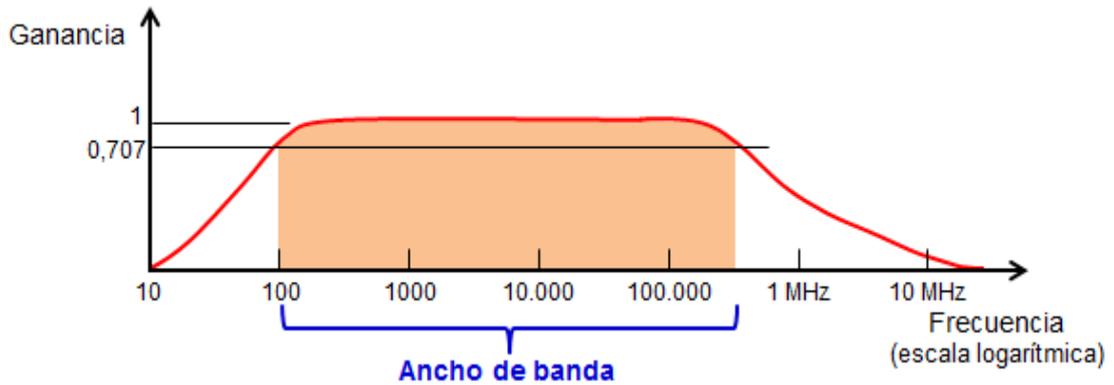


Figura 26 Curva de ganancia contra la frecuencia en un amplificador

Las frecuencias de las bandas definen un nivel donde la ganancia estará entre el 70.70% o su valor máximo (Boylestad & Nashelsky, 2009), o donde el valor de un cuadrado absoluto real es -3 dB de la ganancia máxima.

3.4.6 *Input back-off IBO en un amplificador de potencia*

Se conoce como input back-off IBO (una traducción pudiera ser “retroceso de la entrada”, sin embargo puede causar confusión, por lo que se tomará el nombre correspondiente en inglés) a la expresión que relaciona las potencia donde se presenta la saturación del amplificador $P_{in(Max)}$ y la potencia media de entrada $P_{in(Media)}$ (Díaz Pérez & Falcón Romero, 2008) tal como se indica en la Figura 27.

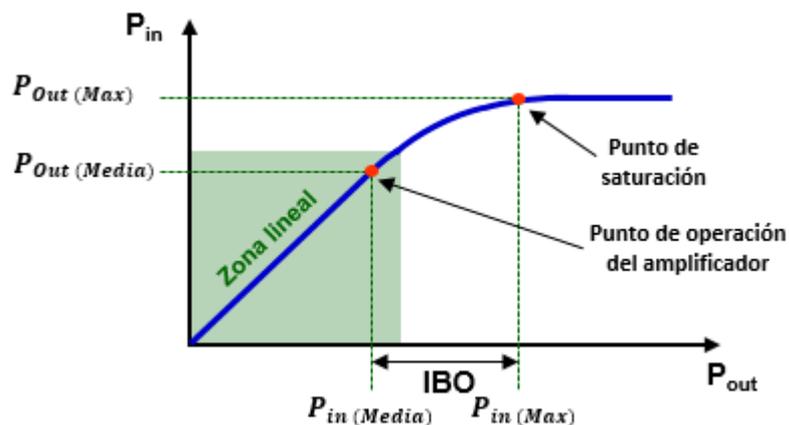


Figura 27 IBO en un amplificador de potencia

El parámetro IBO establece qué tan lejos de la zona de saturación está operando el amplificador de potencia. La relación del IBO se indica en la ecuación 3.4:

$$IBO = 10 \log \left(\frac{P_{in (Max)}}{P_{in (Media)}} \right) dB \quad (3.4)$$

3.4.7 Conversión AM-AM y AM-PM en un amplificador de potencia

En vista de no poder mantener la ganancia uniforme en todo su rango de trabajo, el amplificador real es un aparato no lineal. Esta no linealidad causa que la señal de salida presente distorsión. Las consecuencias de estas no linealidades pueden observarse en las distorsiones respectivas tanto en amplitud como en la fase de la señal original. La magnitud de estos efectos pueden ser determinados por medio de la conversión AM-AM y la conversión AM-PM del amplificador (Tena-Ramos, Patiño-Gómez, Ortega-González, Pardo-Martín, & Benavente-Peces, January 16th of 2015).

Por un lado, la Conversión AM-AM describe el efecto de la deformación de la amplitud de la señal, mientras que la Conversión AM-PM la correspondiente a la fase de la señal. Aquí, AM es “Amplitud Modulation” (modulación en amplitud) y PM se refiere a “Phase Modulation” (modulación en fase).

En la Figura 28 se puede apreciar la variación de la señal en la conversión AM-AM y conversión AM-PM en un amplificador no lineal (Bernal Oñate, Lara Cueva, & Guamán, october 2015, págs. 307-311).

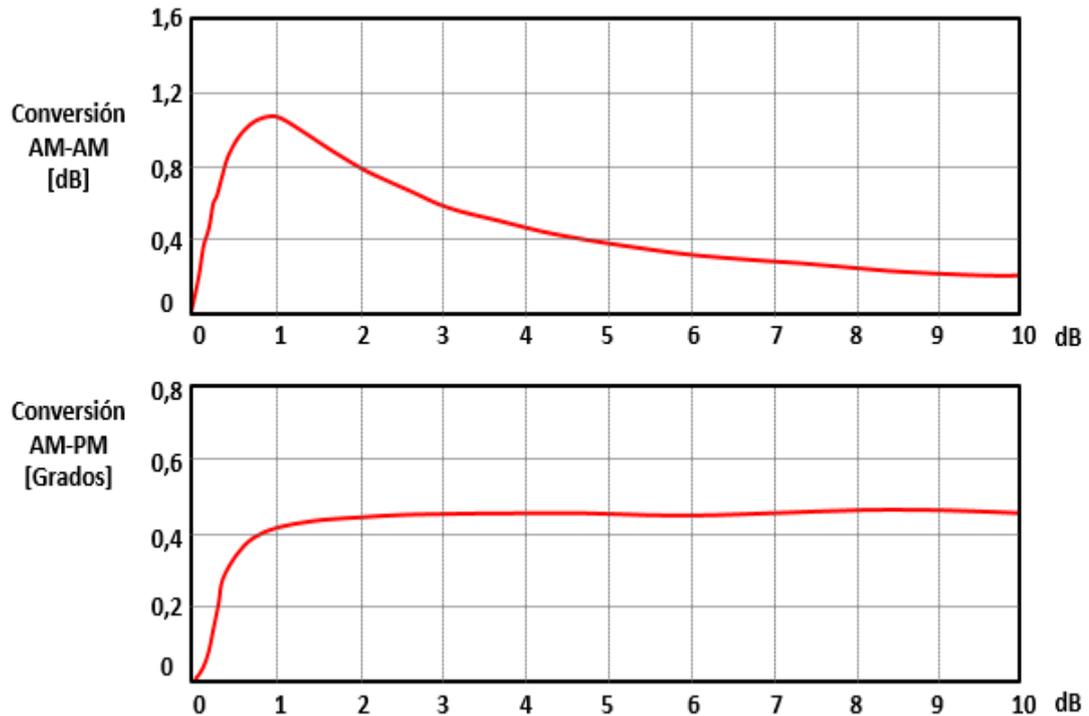


Figura 28 Conversión AM-AM y Conversión AM-PM en un amplificador de potencia

3.4.8 Relación de potencia pico a potencia media “PAPR”

Se conoce como PAPR (Peak-to-Average Power Ratio), como la relación de potencia pico a potencia media, de una señal en un amplificador de potencia. Es un parámetro que hay que tener muy presente en los sistemas de transmisión OFDM. Esto es porque cuando en la modulación OFDM se añade N subportadoras, la potencia pico es N veces la potencia promedio de cada subportadora (Molisch, 2011). Esto trae como consecuencia que los sistemas OFDM presenten un alto PAPR que obliga a llevar al amplificador de potencia a que trabaje con un alto IBO, resultando en un uso ineficiente del amplificador.

La PAPR de la señal en el dominio del tiempo $x(t)$ se define mediante la siguiente expresión:

$$PAPR\{x(t)\} = \frac{\max_{0 \leq t \leq T} |x(t)|^2}{E\{|x(t)|^2\}} \quad (3.6)$$

Siendo: $\max_{0 \leq t \leq T} |x(t)|^2$ la máxima potencia instantánea

$E\{|x(t)|^2\}$ la potencia promedio de la señal

Claramente, sería deseable tener los valores de potencia media y de potencia pico lo más próximos posible para maximizar la eficacia del amplificador de potencia (Salmanzadeh & Mozaffari Tazehkand, February, 2014). Sin embargo, como se ha expuesto los sistemas OFDM se caracterizan por tener un alto PAPR, es por ello la importancia de la realización de simulaciones de los amplificadores de potencia para determinar su comportamiento.

3.5 Clases de los amplificadores de potencia

Los amplificadores de potencia de estado sólido son categorizados por clases. Inicialmente fueron clasificados tomando en cuenta la polarización de los dispositivos del amplificador o las clases de ángulo de conducción. Así surgieron las clases A, B, AB y C las cuales aplican con operación analógica (Whitaker (Editor-in-Chief), J., 2005). Este grupo de amplificadores son amplificadores de alta linealidad, en los cuales se mantiene en la salida la misma forma de onda que la señal de entrada, pero amplificada.

Posteriormente fueron añadidos los amplificadores de conmutación con sus clases D, E, F, G, H, S, T, etc; en los cuales se usa circuitos digitales y técnicas de modulación por ancho de pulso. Este conjunto de amplificadores, en los cuales se incrementa la eficiencia del sistema y la potencia de salida, son amplificadores en los cuales se incrementa la no-linealidad.

En todo caso, en general, las clases de los amplificadores de estado sólido están relacionadas con el diseño de la circuitería interna del amplificador y con la operación de la etapa de salida del mismo.

A continuación se presenta la descripción de las clases más comunes.

3.5.1 Amplificadores de potencia clase A

En esta clase de amplificador de potencia, el punto de trabajo y la amplitud máxima de la señal de entrada son tales que la etapa de salida del amplificador operará en su región activa todo el tiempo. Esto implica que la corriente circulará por 360° del ciclo de la señal AC (Malvino & Bates, 2006).

Son amplificadores tipo single-ended (la señal es referenciada con respecto a tierra). La Figura 29 muestra la curva de operación para este tipo de amplificador.

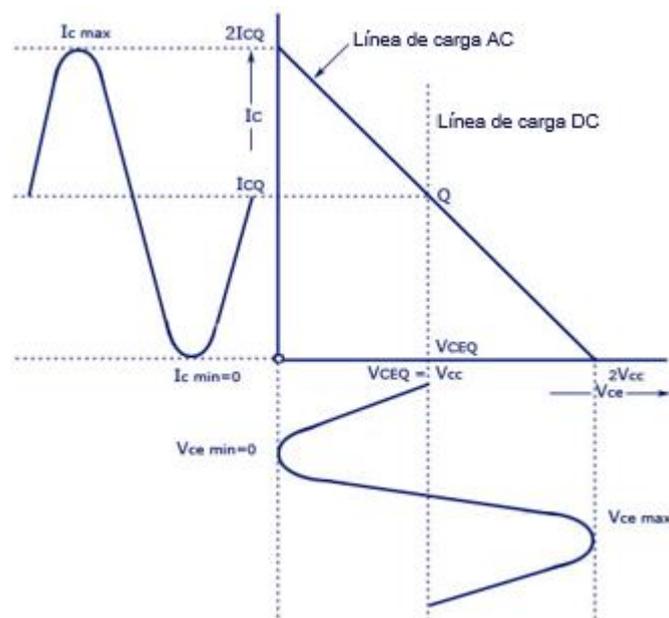


Figura 29 Amplificador de potencia clase A

Los amplificadores clase "A" presentan muy buena linealidad, sin embargo debido a que en su punto de operación hay siempre un consumo apreciable de potencia de los elementos de amplificación, resultan ineficientes y producen altas pérdidas con la consiguiente producción de calor.

3.5.2 Amplificadores de potencia clase B

En los amplificadores de potencia clase B, la etapa de salida está constituida por dos circuitos similares, los cuales amplifican la señal de

entrada, cada uno una razón de 50%, por lo que en ángulo de conducción en estos amplificadores es $\theta = 180^\circ$ (Malvino & Bates, 2006).

De esta manera, cuando uno de estos circuitos está en operación, el otro circuito permanece sin funcionamiento. Posteriormente, las señales de salida de cada uno de estos circuitos se suman, formando la señal de salida. Este diseño de la etapa de salida también es conocido como Push-Pull.

La curva de operación de uno de estos circuitos correspondientes a una de las etapas de salida para los amplificadores de potencia clase B se presenta en la Figura 30. En este caso el amplificador es un circuito Push-Pull realizado con transistores (AspenCore, Inc., Class B Amplifier, 2014):

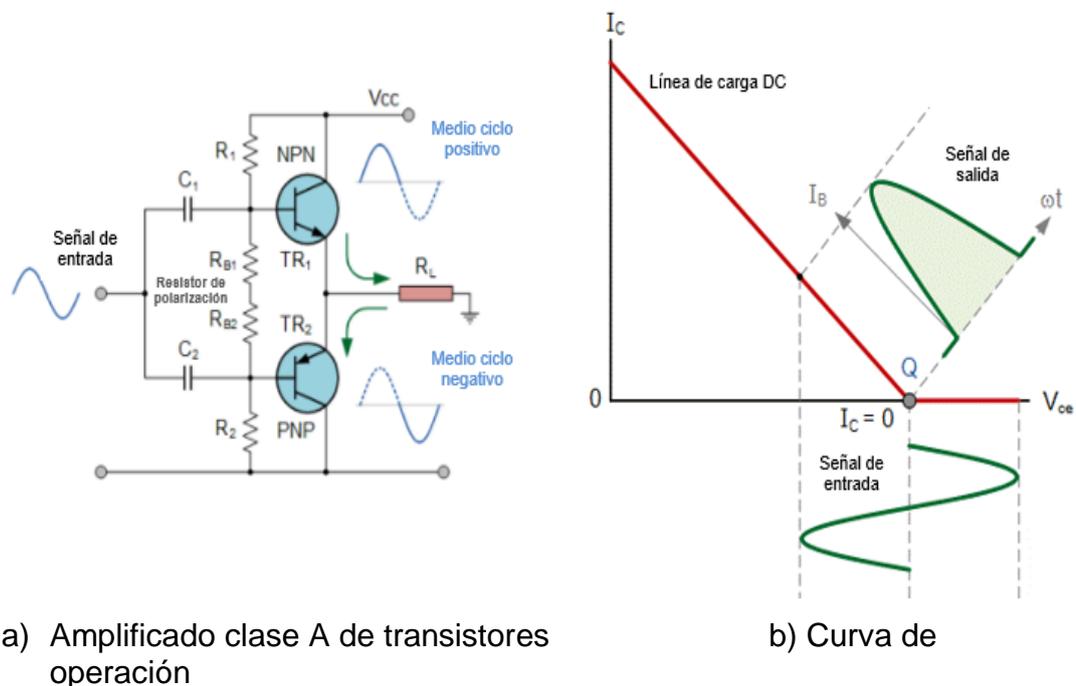


Figura 30 Amplificador de potencia clase B

Fuente: (AspenCore, Inc., Class B Amplifier, 2014)

Aunque la eficiencia de este tipo de amplificadores es sustancialmente mejor que con los amplificadores clase A, la señal de salida del amplificador presenta deformaciones en los puntos en los cuales la señal cruza por cero (Crossover Distortion).

3.5.3 Amplificadores de potencia clase AB

Tal como sugiere el nombre de esta clase, los amplificadores de potencia de clase AB es una combinación de los dos anteriores. Este tipo de amplificador se sobrepone a las distorsiones de la señal por cruce de cero, presentadas por el amplificador de potencia clase B (AspenCore, Inc.).

La Figura 31 presenta la curva de operación de este tipo de amplificador de potencia.

Para esta clase de amplificadores de potencia el voltaje de polarización y la amplitud máxima de la señal de entrada presentan valores en los cuales, la corriente de salida circula durante menos de un período y más de un semiperíodo de la señal de entrada. Es decir, el ángulo de conducción para este tipo de amplificador estará entre 180° y 360° , dependiendo del punto de operación.

Al igual que en los amplificadores clase B, la salida es compuesta por la suma de dos circuitos.

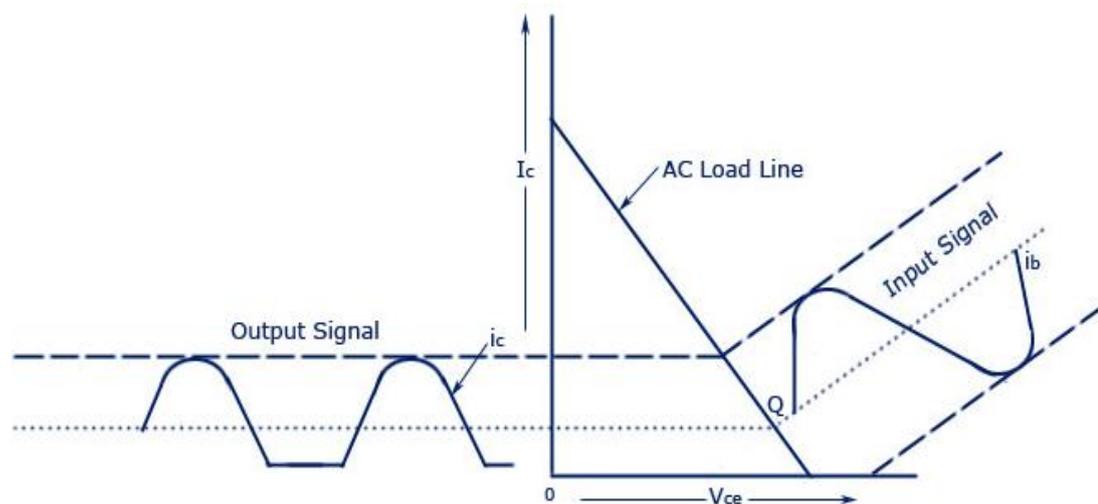


Figura 31 Amplificador de potencia clase AB (uno de los circuitos de salida)

Fuente: (AspenCore, Inc., Class B Amplifier, 2014)

3.5.4 Amplificadores de potencia clase C

El diseño de los amplificadores de potencia clase C hace que los circuitos de salida operen con un ángulo de operación menor que 180° de la señal de entrada. Adicionalmente este tipo de amplificadores utiliza un circuito resonante ajustado a la frecuencia de resonancia (AspenCore, Inc.).

Se utilizan estos tipos de amplificadores cuando se requiere una amplificación de potencia importante. Al tener un ángulo de conducción considerablemente menor a 180° básicamente se amplifica un pulso de la señal de entrada, lo que resulta en un circuito bastante no lineal. La parte restante de la señal amplificada se recupera con el circuito resonante. La Figura 32 muestra la curva de operación para este tipo de amplificador (Lombry, 2015).

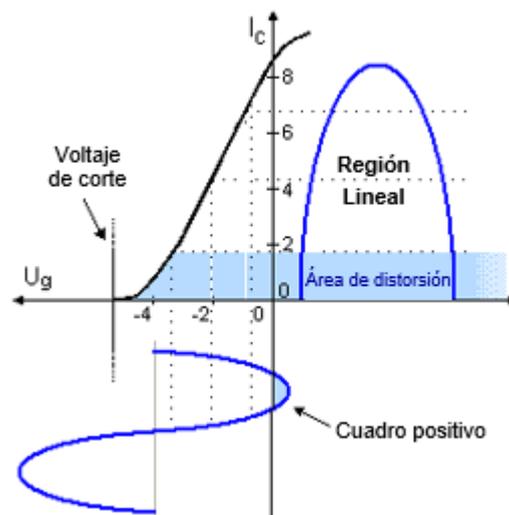


Figura 32 Amplificador de potencia clase C

Fuente: (Lombry, 2015)

3.5.5 Amplificadores de potencia clase D

A partir del amplificador de potencia clase D, comienza el grupo de amplificadores con circuitos conmutados utilizados para mejorar la eficiencia al regular la entrega de potencia, cuando utiliza los dispositivos electrónicos en su operación por medio de sus estados de corte y saturación.

En los amplificadores Clase D se emplean un par de dispositivos activos y un circuito de salida sintonizado (Pérez, Díaz, Giordana, & Ibáñez, 2016). La señal de entrada se transforma a una corriente de pulsos donde el valor promedio de la potencia de los pulsos es directamente proporcional a esta (modulación por ancho de pulso). Posteriormente, la forma de la señal puede ser recuperada mediante filtros pasa bajo pasivos para eliminar las armónicas resultantes.

El diagrama en bloque para el amplificador de potencia clase D se presenta en la Figura 33 (Maxim Integrated, 2007).

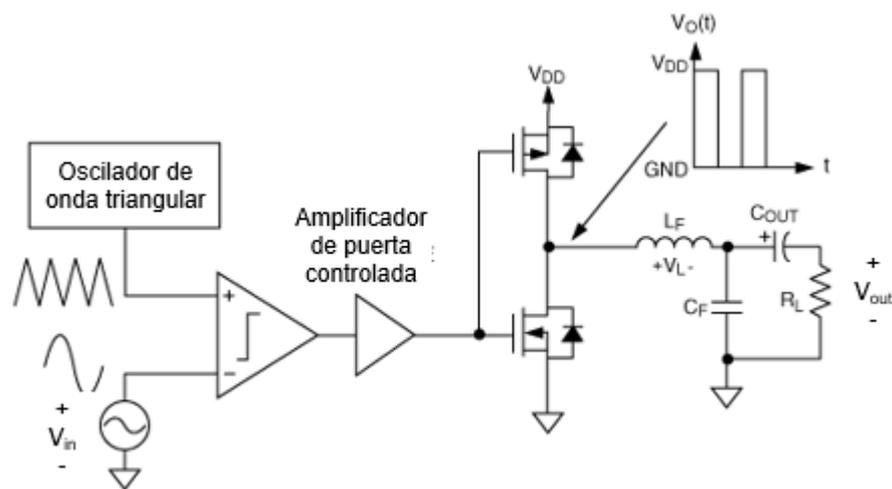


Figura 33 Diagrama de bloques funcional simplificado de un amplificador de potencia clase D

Fuente: (Maxim Integrated, 2007).

3.5.6 Amplificadores de potencia clase E

Los amplificadores de potencia clase E presentan circuitos inversores que utilizan un solo interruptor y adicionalmente realizan las conmutaciones en el interruptor a corriente o voltaje cero. Este diseño es muy eficiente y puede trabajar a frecuencias muy elevadas (Ponce Silva, 1999).

Estos amplificadores tienen una alta eficiencia cercana al 90%, su arquitectura es simple, logran una mayor transferencia de energía, no requieren el uso mezclador si se usa como modulador, lo que los hace

mejores como controladores de potencia para bobinas transmisoras (Hannan, Hussein, Mutashar, Samad, & Hussain, 2014, 14)

En la Figura 34, se muestra un circuito simplificado con el principio de esta clase de amplificador de potencia, con su diagrama de bloques. Aquí, el circuito de conmutación es simplificado al simplificar el dispositivo semiconductor como un interruptor “ S_1 ”.

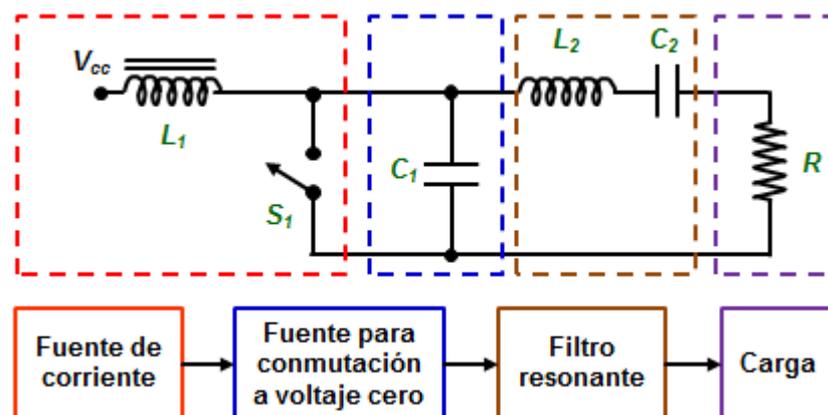


Figura 34 Circuito simplificado y diagrama en bloques de un amplificador de potencia clase E

3.5.7 Amplificadores de potencia Clase F

Los amplificadores de potencia clase F se utilizan para aumentar la eficiencia y la salida mediante el uso de resonadores armónicos para dar forma a la forma de onda de salida en una onda cuadrada. Los amplificadores de clase F tienen más del 90% de eficiencia si se usa la afinación infinita de armónicos (Agarwal, 2016).

Para poder controlar la generación de armónicos la señal de salida se pasa por una serie de circuitos resonantes como se indica en la Figura 35 (Junming, y otros, 20015):

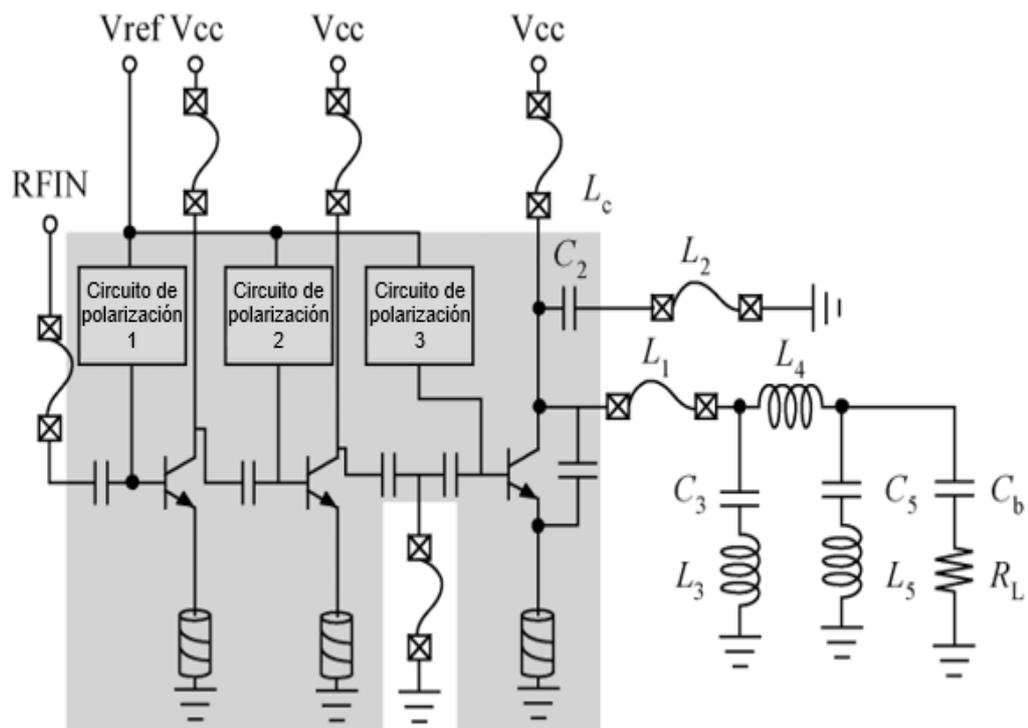


Figura 35 Configuración de un circuito amplificador clase F con la circuitería compensadora en la salida

Fuente: (Junming, y otros, 20015)

3.5.7 Amplificadores de potencia clase G y clase H

Los amplificadores clase G y la clase H fueron desarrollados para mejorar la eficiencia del diseño inicial del amplificador Clase AB. Ambos trabajan en la mejora del suministro de energía: Para una potencia de salida alta, se necesita una fuente de alimentación de alta tensión, para baja potencia, mantener este alto voltaje implica mayores pérdidas en la etapa de salida, por lo que se debería usar una fuente de alimentación menor. La Figura 36 muestra el principio de operación del amplificador clase G, con el uso de dos fuentes de alimentación (Wilson, 2013). Así, el amplificador usa una fuente de alimentación en la parte baja de potencia de la señal de salida (sección azul de la señal) mientras que la otra fuente se usa en la parte roja de la señal. Es posible que existan algunas distorsiones de la señal en el momento de la conmutación de las fuentes.

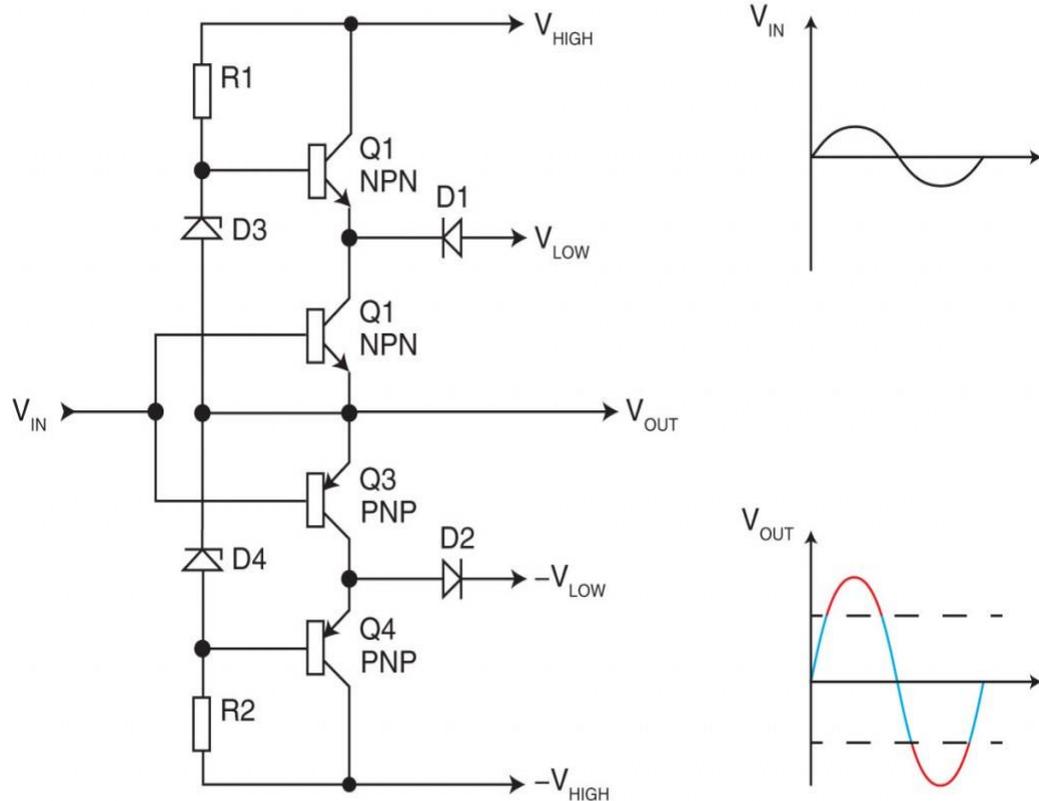


Figura 36 Amplificador clase G el cual usa dos fuentes de alimentación

En los amplificadores clase H se presenta un diseño mejorado de los amplificadores clase G, donde no hay conmutación para decidir cuál fuente de alimentación se usará, sino que se tiene una versión continua de la fuente de alimentación que suplirá el nivel óptimo de voltaje, dependiendo del nivel de tensión de la señal de entrada (Wicks, 2009).

3.6 Modelo matemático Rapp para amplificadores de potencia de estado sólido

Los modelos matemáticos para los amplificadores de potencia son muy útiles para realizar la evaluación del funcionamiento de todo el sistema de modulación, transmisión y recepción de señales mediante OFDM. Con estos modelos matemáticos se puede simular su operación, valores extremos, afectación del ambiente en el funcionamiento del sistema, inclusive posibles fallas en cualquier elemento. Con esto se puede hacer análisis que tan

robusto y confiable es el sistema de comunicación, se puede determinar el porcentaje de error en cuanto a los datos enviados/recibidos y nos ayuda a determinar cuáles técnicas o acciones preventivas se pueden aplicar para evitar los efectos indeseados.

En las secciones anteriores se presentó los distintos tipos, clasificaciones y clases de amplificadores de potencia.

La mayoría de los modelos matemáticos entonces han sido desarrollados sobre la base de esas clasificaciones y clases de amplificadores de potencia, especialmente tomando en cuenta la característica no lineal que presentan los mismos.

Sobre la base de los objetivos específicos presentados en el presente trabajo de titulación a continuación se describe el modelo matemático Rapp para los amplificadores de potencia.

El Dr. Ing. Christoph Rapp en octubre de 1991, desarrolló este modelo matemático para describir el comportamiento de los amplificadores de potencia de estado sólido, publicando sus investigaciones por medio del artículo “Efectos de la no linealidad de los amplificadores de alta potencia en la señal modulada tipo 4-DPSK/OFDM de un sistema de transmisión digital de sonido”,

Para este modelo no se toma en cuenta la conversión AM-PM. En este modelo se produce una transición suave de la envolvente modulada hacia el nivel de saturación.

La conversión AM-AM viene dada por (Rapp, 1991):

$$g[A] = v \frac{A}{\left[1 + \left[\left(\frac{vA}{A_0}\right)^2\right]^P\right]^{\left(\frac{1}{2P}\right)}} \quad (3.7)$$

Con $P > 0$, $A_0 \geq 0$, $v \geq 0$

Siendo P : Factor de suavizado

v : Ganancia de pequeña señal

A_0 : Voltaje de saturación del amplificador de potencia

A : Señal de entrada en función del tiempo

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN EL SISTEMA DE SIMULACIÓN

Una vez haber determinado todos los componentes pertenecientes al sistema OFDM, se requiere realizar su implementación en un software de simulación. Para ello se ha seleccionado el programa Matlab®.

MATLAB (MATrix LABoratory) es un programa informático de propósito especial, optimizado para realizar cálculos científicos y de ingeniería. Al principio Matlab® se diseñó para realizar matemáticas matriciales, pero a través de los años, se convirtió en un sistema informático flexible capaz de resolver esencialmente cualquier problema técnico (Chapman, 2013).

Matlab® es un entorno de computación técnica que permite la ejecución de cálculos numéricos y simbólicos de manera precisa y veloz. A la vez el programa posee características gráficas y de visualización avanzadas adecuadas para las investigaciones científicas y de ingeniería. Matlab® es su entorno interactivo para el análisis y para el modelado implementa más de 500 funciones para el trabajo en distintos campos de la ciencia (Pérez López, 2002).

Las características de Matlab® se agrupan en más de 35 toolboxes y paquetes de bloques (para Simulink), clasificados en las siguientes clases: **Matlab** (Parallel Computing, Math, Statistics, and Optimization, Control Systems, Signal Processing and Communications, Image Processing and Computer Vision, Test and Measurement, Computational Finance, Computational Biology, Code Generation and Verification, Application Deployment, Database Connectivity and Reporting, Matlab® Report Generator) y **Simulink** (Event-Based Modeling, Physical Modeling, Control Systems, Signal Processing and Communications, Code Generation, Real-Time Simulation and Testing, Verification, Validation, and Test, Simulation Graphics and Reporting).

Aunque el diseño y posición de las ventanas en Matlab® son configurables por el usuario, en la Figura 40 se presenta una interfaz gráfica típica de Matlab®, en donde se resalta las diferentes ventanas que lo componen.

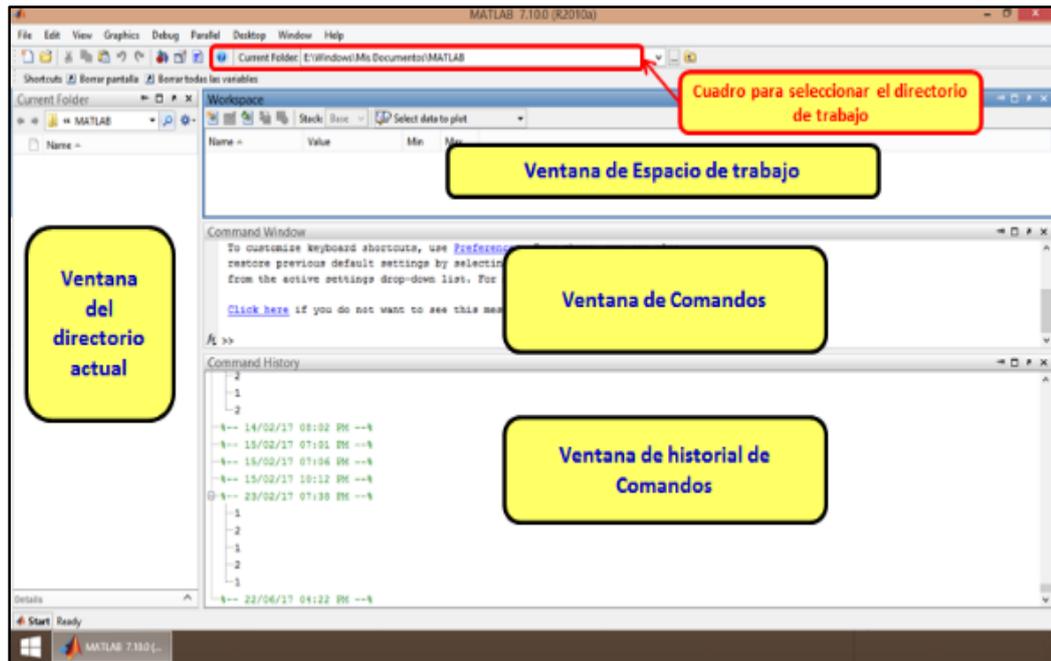


Figura 37 Interfaz gráfica de Matlab®

En este capítulo se presenta los bloques a implementar en el sistema de Matlab®, las interfaces gráficas y los comandos claves para la programación de cada elemento.

4.1 Totalidad de bloques a implementar

El programa consta inicialmente de un transmisor y receptor conectados a través de un canal con ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN), donde la señal transmitida es amplificada a través del modelo de Rapp, siguiendo el diagrama de bloques de la Figura 41.

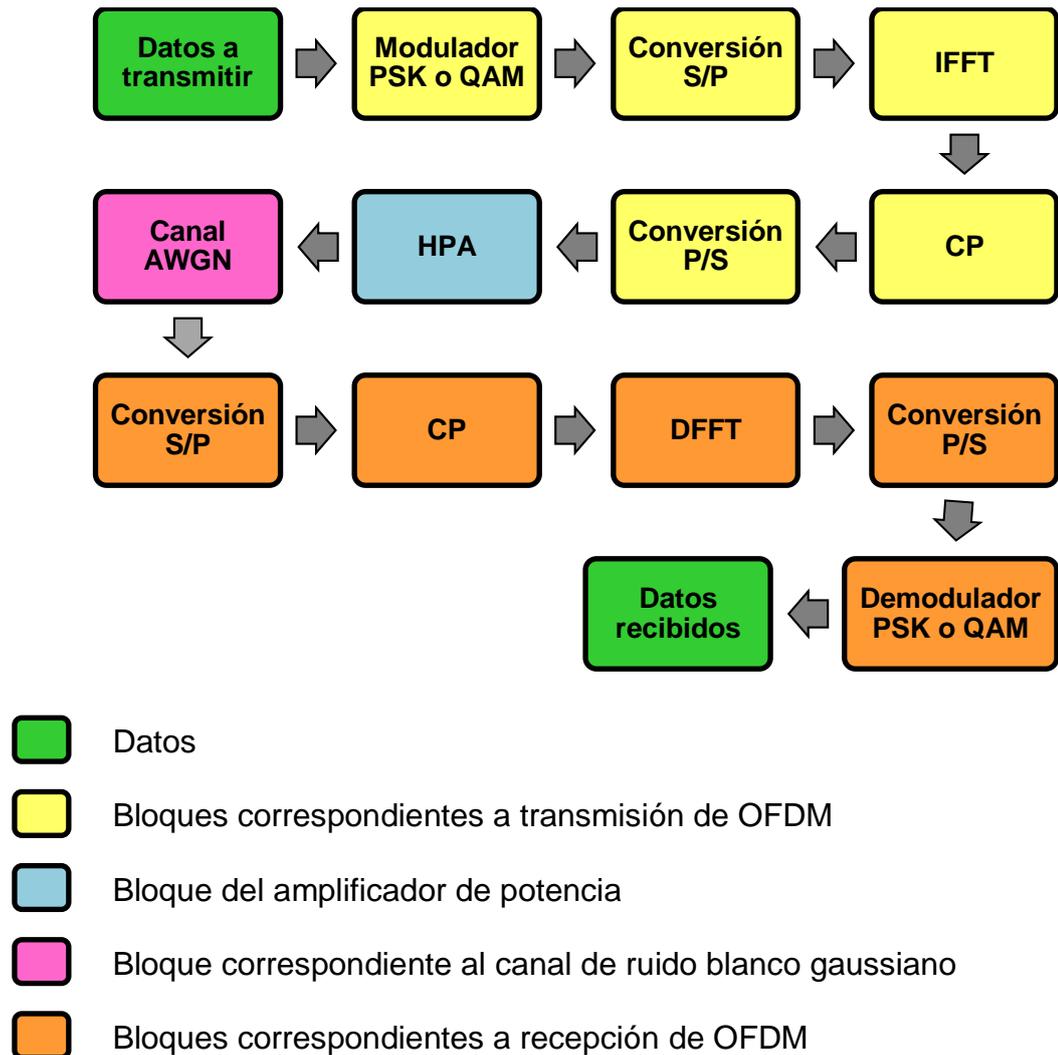


Figura 38 Diagrama de bloque de sistema OFDM

El desarrollo del código en Matlab® está compuesto por un programa principal que realiza el llamado de varias funciones, para que la simulación del sistema OFDM se realice de forma estructurada y modular. En este mismo programa principal, se realizó el diseño de dos menús de opciones para introducir los parámetros de configuración a utilizar en la simulación: el tipo de modulación y el IBO a utilizar en el amplificador. El programa se realizó, de modo que fuera amigable al usuario final y sin muchas complicaciones en orden de ejecutar el programa de manera exitosa.

4.2 Implementación del transmisor/receptor OFDM y canal de ruido

4.2.1 *Principal.m*

El programa comienza con la presentación de la pantalla principal:

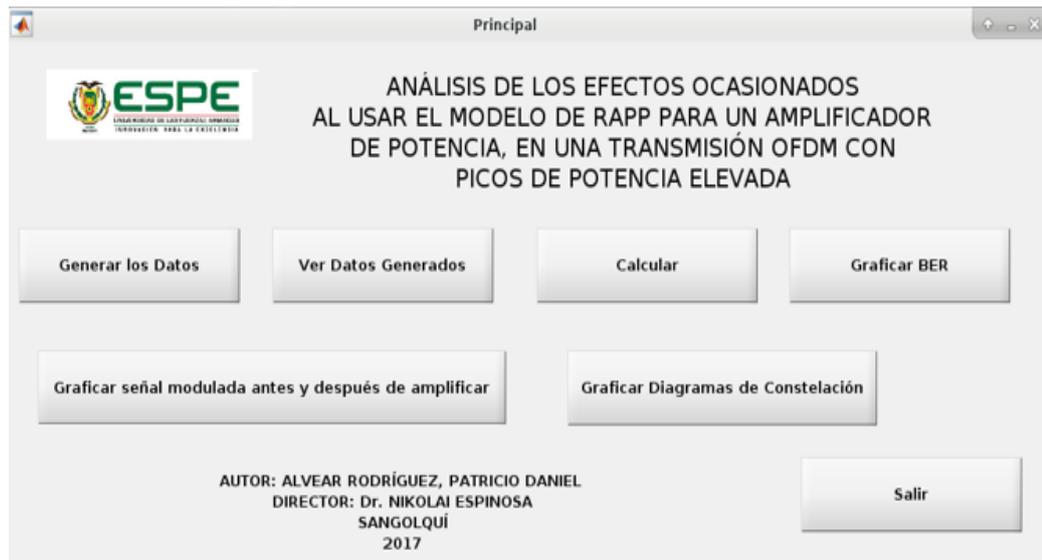


Figura 39 Pantalla principal del programa de simulación

En el código de Matlab se comienza con la inicialización de los valores de la interfaz gráfica.

Posteriormente se hace un llamado a la función del callback del button1 “*Generar los Datos*”. El programa entra en esta función en el momento que se hace click en el botón. Lo primero que se realiza es cerrar la interfaz gráfica actual, luego borrar los archivos .mat que contienen los datos para graficar el BER y graficar la modulación. Finalmente, abre la interfaz gráfica de “datos” donde posteriormente se pedirán los datos a introducir.

En el caso del botón 2 “*Ver Datos Generados*”, el programa entra en esta función en el momento que se hace click en el botón. Aquí simplemente, se cierra la interfaz gráfica principal y luego se abre la interfaz gráfica para ver los datos generados.

La función del botón 3 “*Salir*”, permite borrar todos los archivos .mat que contienen los datos para graficar el BER y cerrar la interfaz gráfica.

El botón 4 tiene asignado el procedimiento "Calcular". Lo primero que realiza es verificar que se hayan generado los datos. De no ser así, muestra un mensaje de error solicitando el ingreso de datos. Si los datos han sido ingresados El programa procede de la siguiente manera:

- Carga el archivo .mat que contiene los datos generados anteriormente.
- Inicializa las variables "w" y "s". La variable "w" se utilizará para los bucles y la variable "s" es la suavidad que se utilizará para el modelo de Rapp que será de un valor de 2.
- Inicializa las variables para el BER teórico y BER lineal, el prefijo cíclico en $\frac{1}{4}$, la relación energía por bit / densidad espectral de potencia de ruido (E_b/n_0) y la ganancia del modelo de Rapp en 1.
- Crea una variable llamada "*mensaje sin cambiar*" y luego al mensaje generado se le hace un "reshape" para que quede en forma de vector.
- Verifica el M, si M tiene un valor de 64 se establecen los parámetros de modulación como PSK sino de QAM (de acuerdo a los datos generados). Luego se realiza la modulación y se utiliza una variable auxiliar llamada "aux_mod_tx"
- Devuelve el mensaje (ya modulado) en forma de matriz y comienza a rellenar de ceros para que la gráfica para mostrar la señal modulada sea amigable y tenga buena presentación. Luego, se hacen uso de varias variables auxiliares para aplicar la IFFT a la señal.
- Añade el prefijo cíclico al mensaje.
- Utiliza las variables auxiliares que se tenían antes de demodular, con el fin de pasarlas por un bucle que recorrerá todos los símbolos OFDM, para de esta manera amplificar la señal usando el modelo de Rapp. En este modelo, se aplica la fórmula explicada anteriormente. Se utiliza el comando "abs" para obtener el módulo de la señal y el comando "angle" para obtener el ángulo de la señal.
- Realiza un ciclo usando la variable "w" para demodular el mensaje (ya amplificado) a través de un canal con ruido blanco gaussiano

añadido. Con el fin de realizar el cálculo del BER con la señal ya amplificada. Igualmente las guarda en variables auxiliares cuando la relación señal a ruido es igual a 0, 10 y 20.

- Restablece el valor de la señal sin cambiar a la variable “senal” haciendo uso del auxiliar “aux_senal_sincambiar”, se guardan las variables que se necesitan para las otras interfaces en archivos .mat y se muestra un mensaje que ya los cálculos han sido realizados.

La función del callback del botón 5 “*Graficar VER*” verifica inicialmente que existe el archivo .mat que contiene las variables necesarias para graficar el BER.

En caso de que no exista muestra un mensaje diciendo “Por favor realice los cálculos”. En caso de que exista, cierra la interfaz gráfica y abre la interfaz gráfica que mostrará el BER en gráficas.

En el botón 6 “*Graficar señal modulada antes y después de amplificar*”, se verifica que exista el archivo .mat que contiene las variables necesarias para graficar la señal antes y después de amplificar. En caso de que no exista muestra un mensaje diciendo “Por favor realice los cálculos”. En caso de que exista, cierra la interfaz gráfica y abre la interfaz gráfica que mostrará la señal antes y después de amplificar en gráficas.

En el caso del botón 7 “*Graficar Diagramas de constelación*”, se cierra la interfaz gráfica y abre la interfaz gráfica que mostrará los diagramas de constelación.

Finalmente, viene una función para mostrar el logo de la universidad y un eje de coordenadas. Lo que se hace es leer la imagen usando el comando “imread” y luego presentar la imagen usando el comando “imshow”.

4.2.2 *Datos.m*

El módulo comienza inicializando los valores de la interfaz gráfica en Matlab.

El Botón 1 “Guardar” verifica si se ingresó un IBO previamente. En caso de no haberse ingresado muestra un mensaje de error “Por favor ingrese un IBO”; En caso de haberse ingresado, se define lo siguiente:

- Se utilizarán 100 símbolos OFDM.
- La cantidad de subportadoras son 512.
- El ancho de banda es de 20 MHz

Se crea el mensaje, se guardan estas variables en el archivo `datos_entrada.mat`, se cierra la interfaz gráfica y se abre la interfaz gráfica del programa principal.

Luego, se crean las siguientes funciones automáticamente al momento de generar los botones de selección, la lista y el botón.

Se hace llamado a la función que detecta cuando se cambia la opción de selección simple. En caso de ser PSK, se establece el M con un valor de 64. En caso de ser QAM se establece el M con un valor de 256.

Se inicializa la opción de selección simple. Se comienza con un M igual a 64 ya que la opción de PSK está por defecto.

Se presenta la opción de la lista:

En caso de ser la segunda opción se establece el IBO con un valor de 3 dB.

En caso de ser la tercera opción se establece el IBO con un valor de 5 dB.

En caso de ser la cuarta opción se establece el IBO con un valor de 7 dB.

4.2.3 *Datos_generados.m*

El módulo comienza inicializando los valores de la interfaz gráfica en Matlab.

Luego, se actualizan los textos de la interfaz. En caso de que M tenga un valor de 64 se mostrará que la modulación es PSK, caso contrario se mostrará que la modulación es QAM.

Finalmente, viene se hace llamado a la función del callback del botón 7 “Volver”. El cual cierra la interfaz gráfica y abre la interfaz gráfica principal.

4.2.4 *Grafica_BER.m*

El módulo comienza inicializando los valores de la interfaz gráfica en Matlab.

En el botón 7 “Volver”, se cierra la interfaz gráfica y abre la interfaz gráfica principal.

Luego se hace un llamado a la función la función que permite realizar la gráfica de los BER. Primero se cargan las variables necesarias para esta función a través del archivo *grafica_BER_variables.mat*. Luego se gráfica las variables *Error_BER_lineal* (Señal sin amplificar o amplificador lineal) y *Error_BER2* (señal amplificada) en una gráfica donde el eje “Y” es logarítmico. Finalmente se muestran la leyenda y etiquetas de los ejes.

4.2.5 *Graf_mod.m*

El módulo comienza inicializando los valores de la interfaz gráfica en Matlab.

En el botón 7 “Volver”, se cierra la interfaz gráfica y abre la interfaz gráfica principal.

Posteriormente se hace llamado a la función que realiza la gráfica de los BER. Primero se cargan las variables necesarias para esta función a través del archivo *grafica_mod_variables.mat*. Luego se gráfica las señal sin amplificar o amplificador lineal (de color rojo) y la señal amplificada (de color azul) en una misma gráfica. Finalmente se muestran la leyenda y etiquetas de los ejes.

4.2.6 *Graf_diag_const.m*

El módulo comienza inicializando los valores de la interfaz gráfica en Matlab.

En el botón 7 “Volver”, se cierra la interfaz gráfica y abre la interfaz gráfica principal.

Entonces se ejecuta la función de la gráfica 1. Primero se cargan las variables necesarias para esta función a través del archivo `grafica_const_variables.mat`. Se grafica la señal usando la variable auxiliar que contiene la señal con una relación señal a ruido de 0 dB.

Después viene la función de la gráfica 2. Primero se cargan las variables necesarias para esta función a través del archivo `grafica_const_variables.mat`. Se grafica la señal usando la variable auxiliar que contiene la señal con una relación señal a ruido de 10 dB.

Finalmente se ejecuta la función de la gráfica 3. Primero se cargan las variables necesarias para esta función a través del archivo `grafica_const_variables.mat`. Se grafica la señal usando la variable auxiliar que contiene la señal con una relación señal a ruido de 20 dB.

CAPÍTULO V

SIMULACIÓN EN MATLAB Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo, se presenta las simulaciones realizadas en el sistema y se analiza el comportamiento del mismo considerando los datos originales a ser transmitidos y los datos recibidos.

Así, se evalúa las degradaciones que introduce el amplificador de potencia utilizando el modelo Rapp y se compara con el funcionamiento de un amplificador de potencia lineal ideal de ganancia unitaria. Para ello, a la salida de cada amplificador se presenta el espectro de frecuencia de señales OFDM y en el lado del receptor OFDM se evalúa la tasa de error de bits BER (Bit error rate), para determinar en cuánto la señal OFDM se degrada al pasar por el amplificador que usa el modelo Rapp y el amplificador lineal ideal de ganancia unitaria.

Las premisas utilizadas para la simulación y los distintos escenarios en el proceso de transmisión/recepción del sistema OFDM, están conforme a:

- Se establece un ancho de banda para la transmisión OFDM de 20 Mhz.
- Se utiliza 512 subportadoras.
- El número de puntos implementados en el programa para las transformadas rápidas inversa y directa de Fourier, debe corresponder una potencia de dos (2) (Yang, y otros, 2009). Se establece en 128.
- Se simula para cada uno de los valores de IBO configurados en el sistema. Esto es: 3, 5 y 7 dB.
- Se realiza la simulación en los dos tipos de modulación configuradas en el programa: 64-PSK y 256-QAM.
- Se designa como longitud del prefijo cíclico, un valor equivalente a $\frac{1}{4}$ de la longitud del símbolo de OFDM.
- Se utiliza 100 símbolos de OFDM.

- El número de datos a transmitir para cada una de las simulaciones es de 51.200 (correspondiente a 100 símbolos OFDM x 512 subportadoras).

5.1 Simulación OFDM usando modulación tipo 64-PSK y con IBO de 3db

Esta simulación contempla un sistema OFDM con 512 subportadoras, una modulación 64-PSK, 51.200 datos y un IBO de 3 dB sobre un canal AWGN (Additive White Gaussian Noise).

La Figura 40, presenta la pantalla con los datos previo a la simulación.

INGRESAR DATOS

Tipo de Modulación

PSK QAM

IBO

3 dB

Guardar

VER DATOS GENERADOS

Tipo de Modulación:	PSK
Índice de Modulación de:	64
Bits:	6
Total de Datos:	51200
Total de Subportadoras:	512
Bandwidth (Mhz)	20
Símbolos OFDM:	100
IBO (dB)	3

a) Pantalla de Ingreso de Datos

b) Pantalla de datos generados previo al cálculo

Figura 40 Mensaje para ingresar y mostrar datos utilizados, (64-PSK, IBO de 3db)

Una vez que se pulsa el botón “Calcular” aparece una pantalla de confirmación indicando que los cálculos han sido realizados, como se observa en la Figura 41. Esta pantalla es común para todos los cálculos realizados en el presente trabajo.

Figura 41 Mensaje de confirmación de realización de los cálculos

Luego de proceder la simulación con los datos introducidos, se obtiene los resultados de la misma. En la Figura 42 se muestra el espectro de frecuencia con la señal OFDM luego de haber sido amplificada por medio del modelo Rapp y con un amplificador lineal ideal de ganancia unitaria.

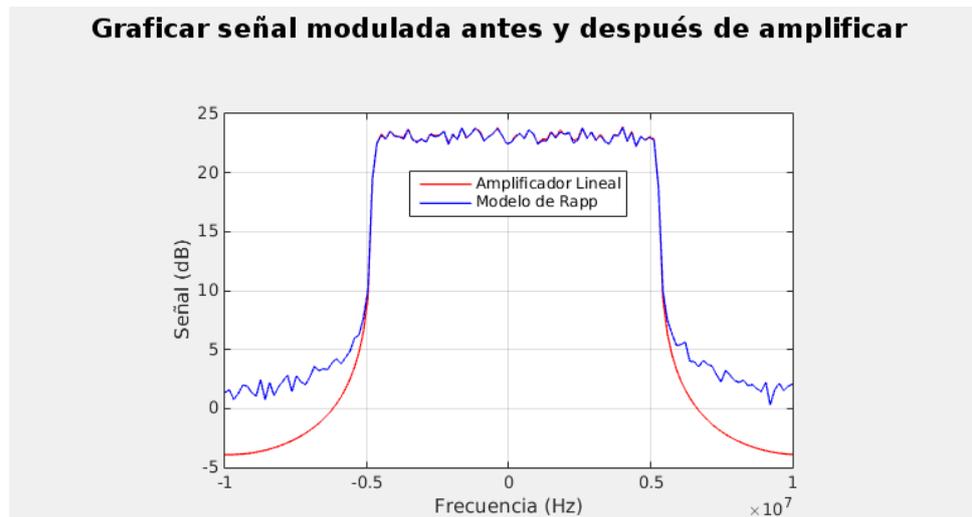
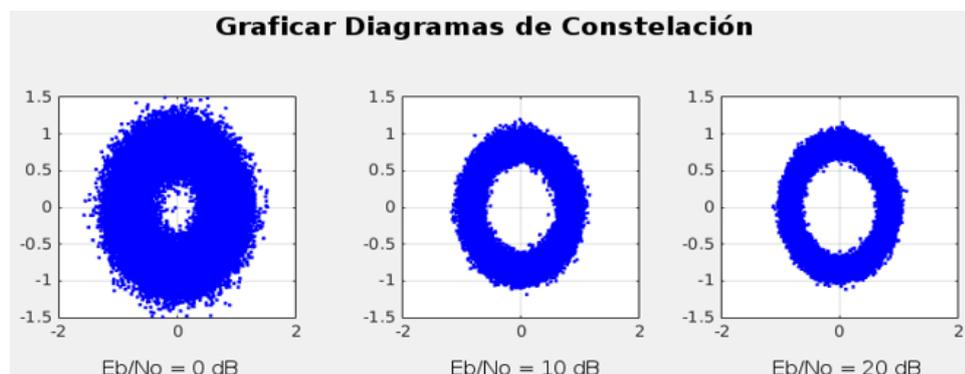


Figura 42 Espectro de frecuencia de señales de OFDM luego de haber sido amplificadas mediante modelo Rapp y amplificador ideal (64-PSK, IBO de 3db)

Aquí se observa las distorsiones fuera de banda creada por el amplificador de potencia en su trabajo cerca de la zona no lineal (IBO= 3 dB).

En cuanto al comportamiento de la señal a través del canal de comunicación (simulación de AWGN), esta puede verse en la Figura 43, donde se muestra los diagramas de constelación para los valores de $E_b/N_o=0$, $E_b/N_o=10$ y $E_b/N_o=20$.



**Figura 43 Diagrama de constelación para valores de $E_b/N_0=0$,
 $E_b/N_0=10$ y $E_b/N_0=20$, (64-PSK, IBO de 3db)**

De acuerdo a la Figura 43 se observa que a medida que se va disminuyendo el ruido (el valor de E_b/N_0 aumenta), la dispersión de los datos igualmente se va reduciendo, pero esta disminución no es tan significativa como para garantizar la confiabilidad de transmisión con estos parámetros.

En la Figura 44 se presenta el BER con respecto a la relación señal a ruido.

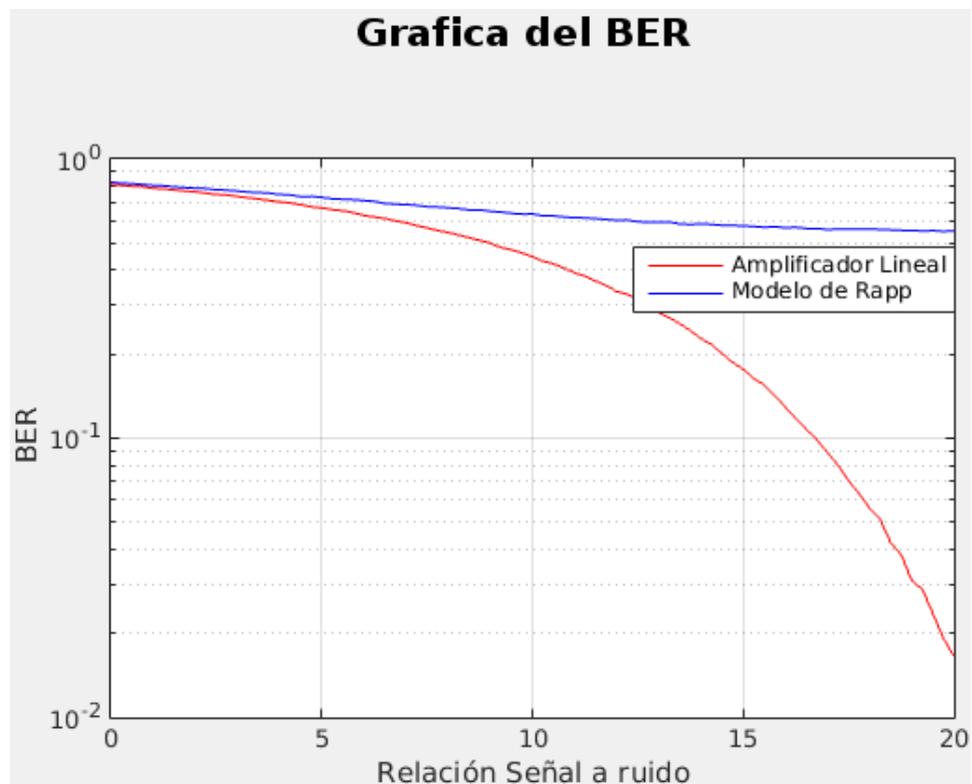


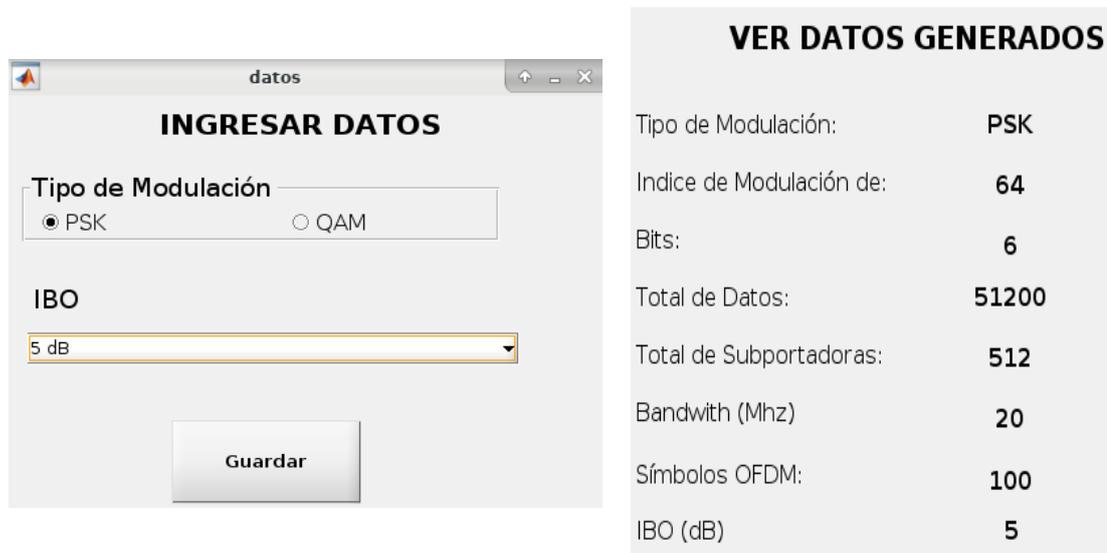
Figura 44 BER con respecto a la SNR, (64-PSK, IBO de 3db)

En la Figura 44 se corrobora el comportamiento de dispersión de la señal mostrado en la Figura 43, cuando en un amplificador lineal ideal disminuye el BER a medida que aumenta la “relación señal a ruido” SNR (signal to noise rate), en el modelo Rapp con los parámetros de esta simulación (64-PSK, IBO de 3db) sólo se observa una pequeña disminución

5.2 Simulación OFDM usando modulación tipo 64-PSK y con IBO de 5db

Los parámetros de simulación para este caso son: 512 subportadoras, una modulación 64-PSK, 51.200 datos y un IBO de 5 dB sobre un canal AWGN (Additive White Gaussian Noise).

La Figura 45, muestra la pantalla con los datos previo a la simulación.



a) Pantalla de Ingreso de Datos

b) Pantalla de datos generados previo al cálculo

Figura 45 Mensaje para ingresar y mostrar datos utilizados, (64-PSK, IBO de 5db)

En la Figura 46 se puede observar el espectro de frecuencia con la señal OFDM luego de haber sido amplificada por medio del modelo Rapp y con un amplificador lineal ideal de ganancia unitaria.

Graficar señal modulada antes y después de amplificar

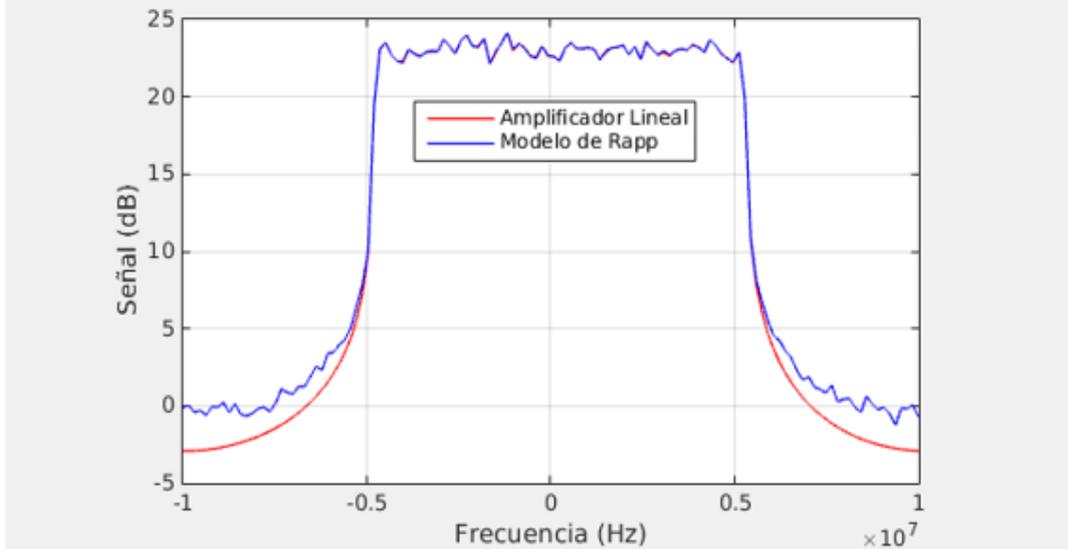


Figura 46 Espectro de frecuencia de señales de OFDM luego de haber sido amplificadas mediante modelo Rapp y amplificador ideal (64-PSK, IBO de 5db)

Aquí se observa las distorsiones fuera de banda creada por el amplificador de potencia en su trabajo no tan cerca de la zona no lineal (IBO= 5 dB). En este caso las distorsiones son menores, comparadas con las de IBO= 3 dB.

En la Figura 47, se aprecia los diagramas de constelación para los valores de $E_b/N_o=0$, $E_b/N_o=10$ y $E_b/N_o=20$.

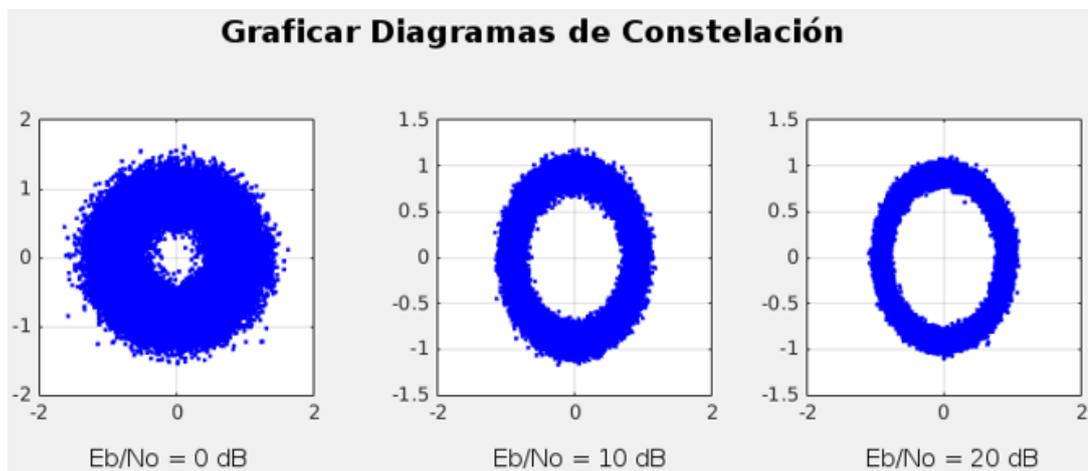


Figura 47 Diagrama de constelación para valores de $E_b/N_o=0$, $E_b/N_o=10$ y $E_b/N_o=20$, (64-PSK, IBO de 5db)

Tal como se indica en la simulación anterior se aprecia que a medida que se va disminuyendo el ruido (el valor de E_b/N_0 aumenta), la dispersión de los datos igualmente se va reduciendo. Por otro lado, comparado con un IBO= 3 dB, la dispersión de los datos es menor.

La Figura 48, trae la relación del BER con respecto a la relación señal a ruido SNR. Aquí también se aprecia una mejora en el comportamiento del BER mientras se aumenta el SNR, comparado con una simulación con IBO= 3 dB.

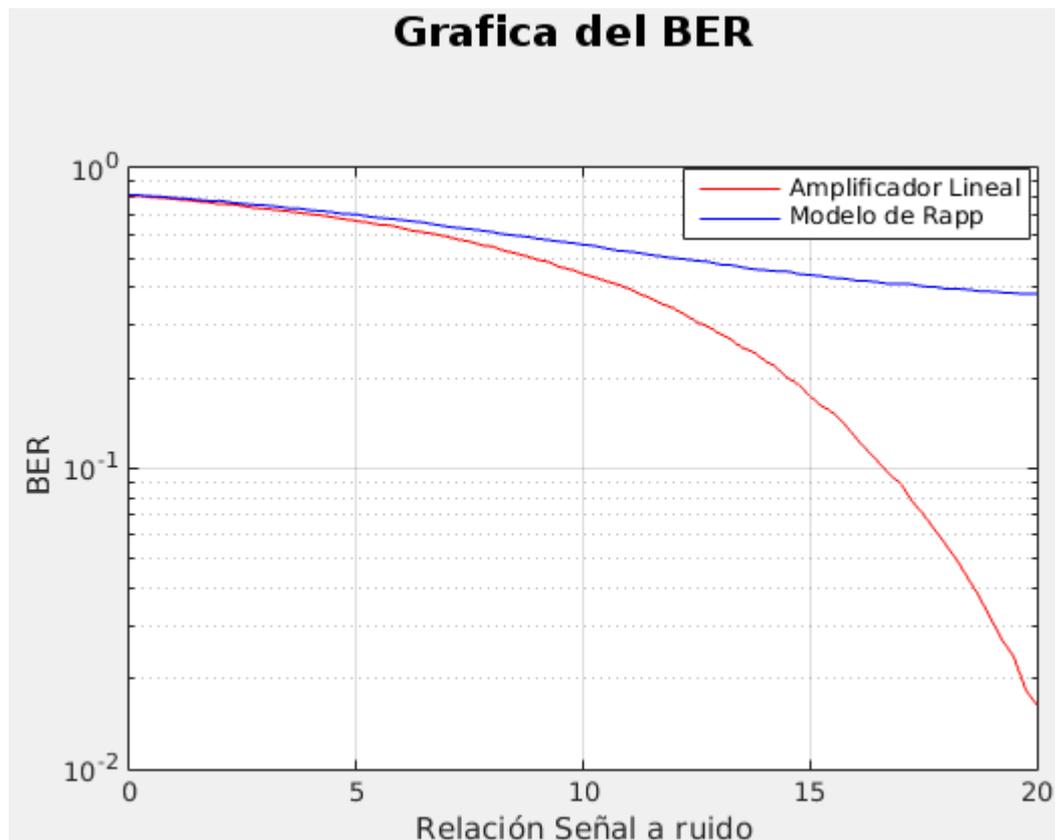
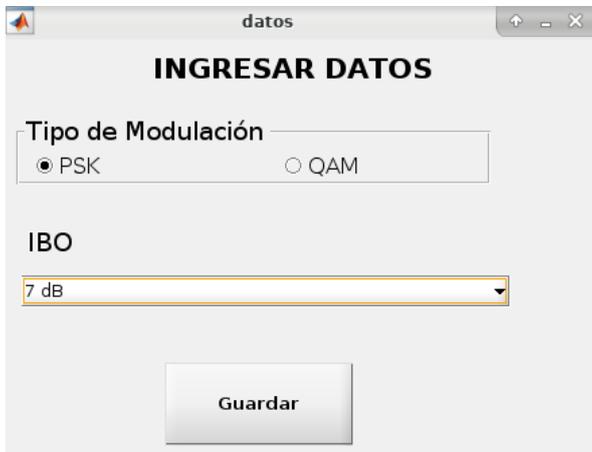


Figura 48 BER con respecto a la SNR, (64-PSK, IBO de 5db)

5.3 Simulación OFDM usando modulación tipo 64-PSK y con IBO de 7db

Los parámetros de simulación para este caso son: 512 subportadoras, una modulación 64-PSK, 51.200 datos y un IBO de 7 dB sobre un canal AWGN (Additive White Gaussian Noise).

En la Figura 49, se presenta la pantalla con los datos previo a la simulación.



VER DATOS GENERADOS	
Tipo de Modulación:	PSK
Indice de Modulación de:	64
Bits:	6
Total de Datos:	51200
Total de Subportadoras:	512
Bandwith (Mhz)	20
Símbolos OFDM:	100
IBO (dB)	7

a) Pantalla de Ingreso de Datos

b) Pantalla de datos generados previo al cálculo

Figura 49 Mensaje para ingresar y mostrar datos utilizados, (64-PSK, IBO de 7db)

En la Figura 50 se aprecia el espectro de frecuencia con la señal OFDM luego de haber sido amplificada por medio del modelo Rapp y con un amplificador lineal ideal de ganancia unitaria.

Graficar señal modulada antes y después de amplificar

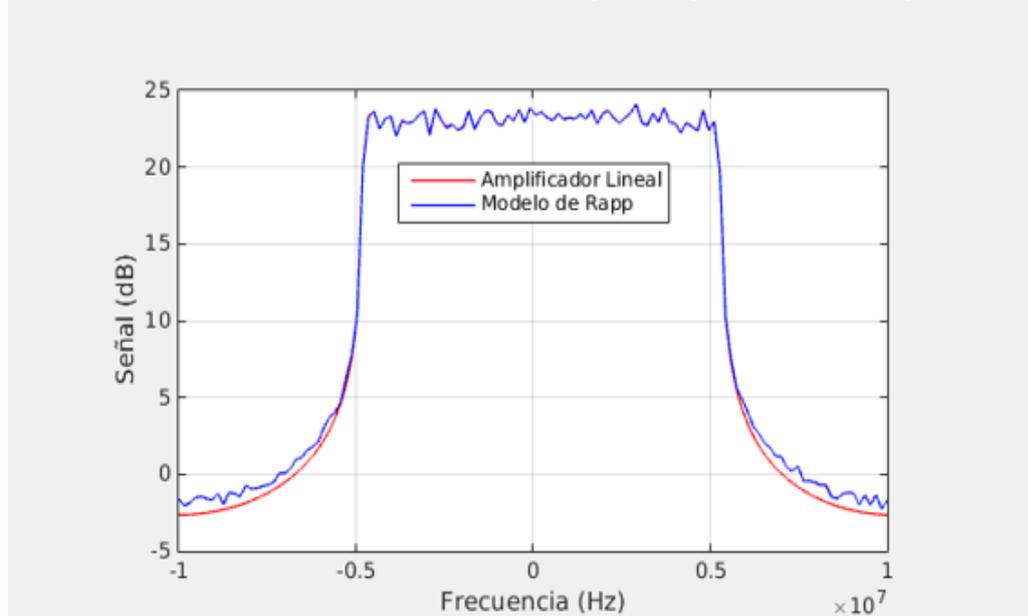


Figura 50 Espectro de frecuencia de señales de OFDM luego de haber sido amplificadas mediante modelo Rapp y amplificador ideal (64-PSK, IBO de 7db)

Aquí prácticamente no se presentan posibles distorsiones fuera de banda a ser introducidas por el amplificador de potencia, esto porque se trabaja en la zona lineal del amplificador (IBO= 7 dB).

En la Figura 51, se presenta los diagramas de constelación para los valores de $E_b/N_o=0$, $E_b/N_o=10$ y $E_b/N_o=20$.

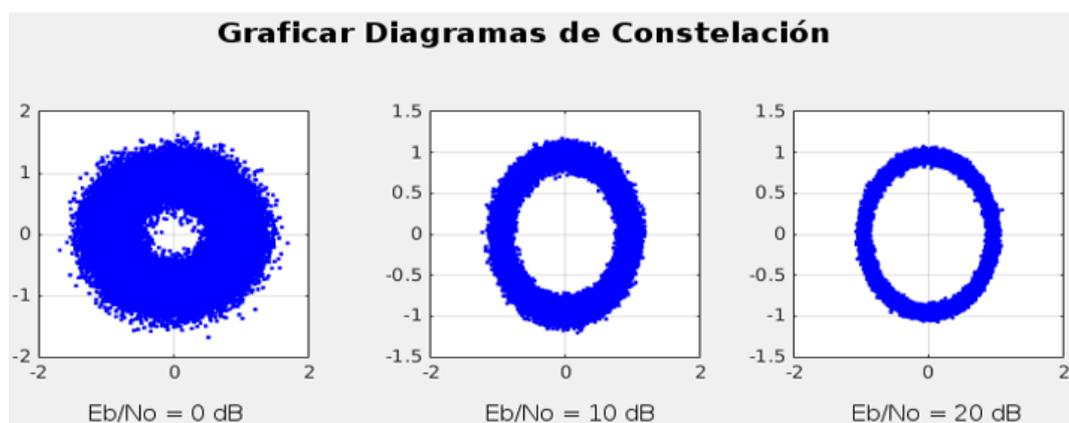


Figura 51 Diagrama de constelación para valores de $E_b/N_o=0$, $E_b/N_o=10$ y $E_b/N_o=20$, (64-PSK, IBO de 7db)

También en el diagrama de constelación se ve el uso del amplificador de potencia en una zona lineal cuando con $E_b/N_o=20$ la dispersión de los datos

es muy pequeña en comparación con las simulaciones efectuadas con IBO= 3 dB y con IBO= 7 dB.

Este efecto del trabajo del amplificador en una zona más lineal se ve reflejado en la Figura 52, donde la relación del BER con respecto a la relación señal a ruido presenta un comportamiento que se aproxima más al del amplificador lineal ideal.

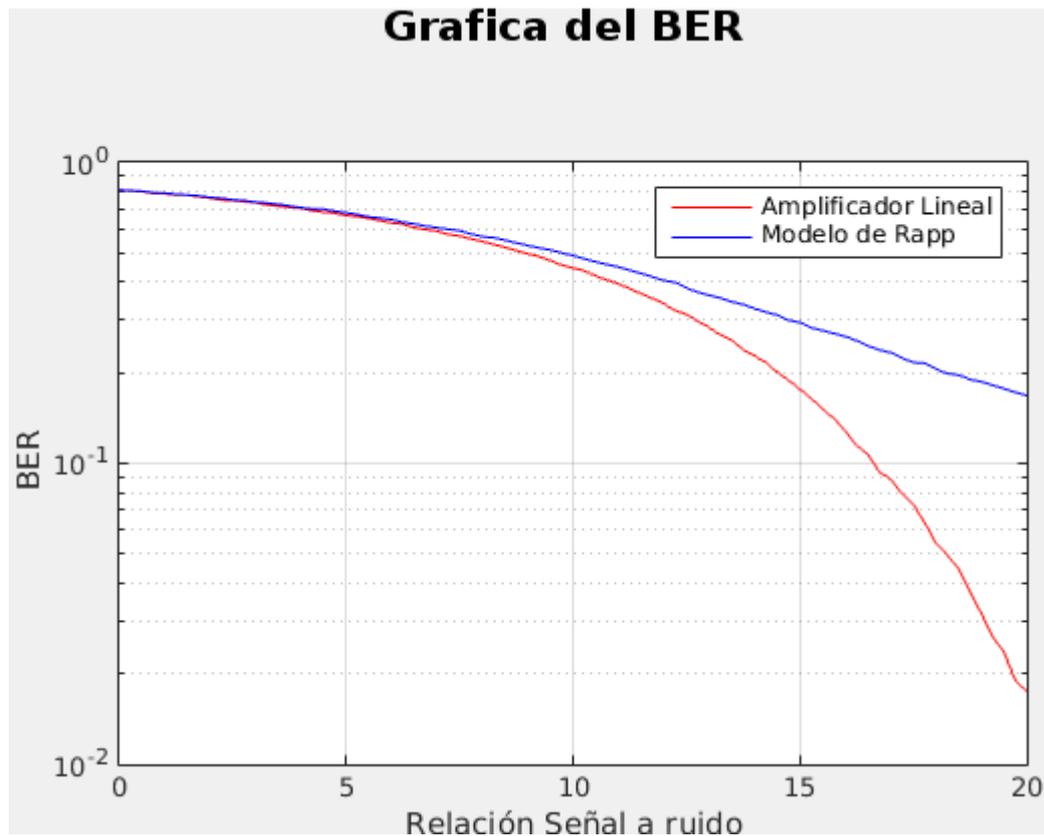


Figura 52 BER con respecto a la SNR, (64-PSK, IBO de 7db)

5.4 Simulación OFDM usando modulación tipo 256-QAM e IBO de 3db

Hasta ahora las simulaciones realizadas se llevaron a cabo con una modulación 64-PSK y con tres diferentes valores de IBO (3, 5 y 7 dB). Las próximas 3 simulaciones se efectuaron con modulación 256-QAM y los mismos escenarios de valores de IBO.

Los parámetros de simulación para este cuarto caso son: 512 subportadoras, una modulación 256-QAM, 51.200 datos y un IBO de 3 dB sobre un canal AWGN (Additive White Gaussian Noise).

En la Figura 53, se presenta la pantalla con los datos previo a la simulación.

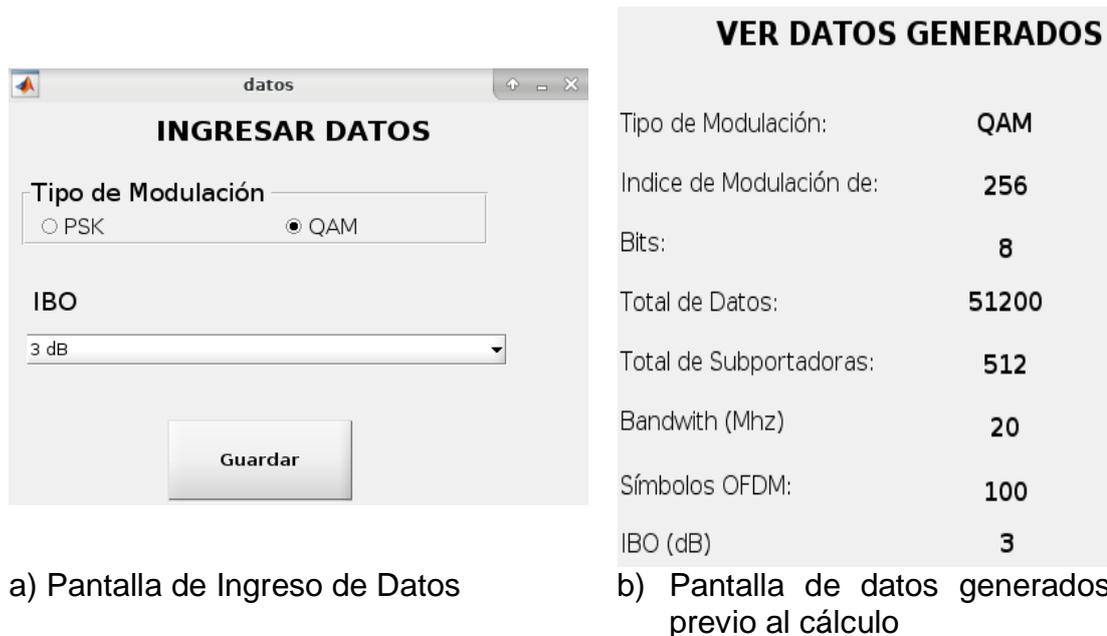


Figura 53 Mensaje para ingresar y mostrar datos utilizados, (256-QAM, IBO de 3db)

En la Figura 54 se puede observar el espectro de frecuencia con la señal OFDM luego de haber sido amplificada por medio del modelo Rapp y con un amplificador lineal ideal de ganancia unitaria.

Graficar señal modulada antes y después de amplificar

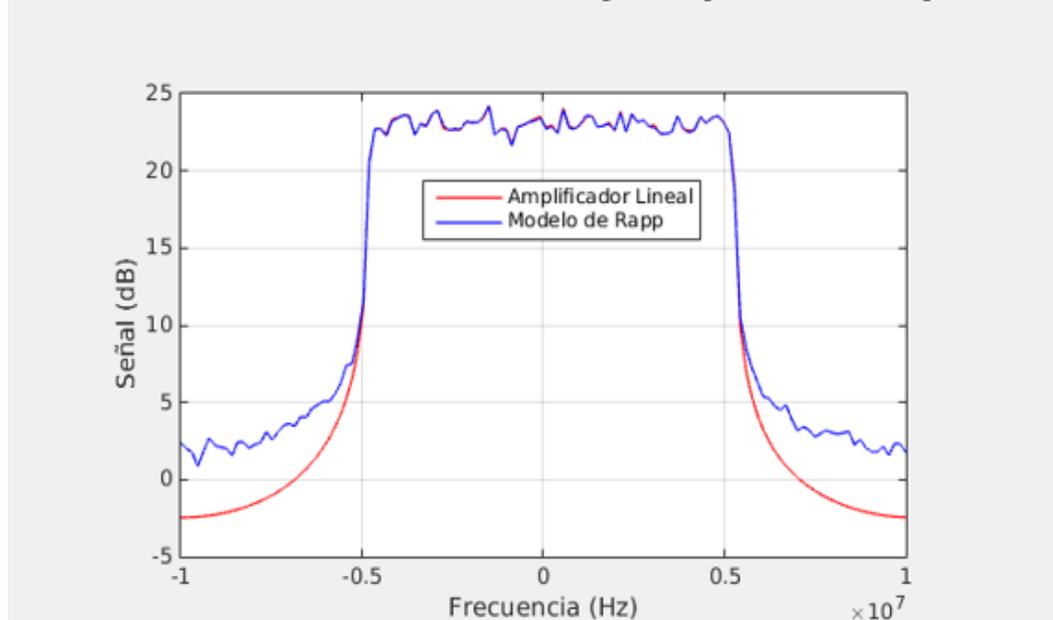


Figura 54 Espectro de frecuencia de señales de OFDM luego de haber sido amplificadas mediante modelo Rapp y amplificador ideal (256-QAM, IBO de 3db)

Aquí se observa las distorsiones fuera de banda creadas por el amplificador de potencia en su trabajo cerca de la zona no lineal (IBO= 3 dB). Prácticamente presenta el mismo comportamiento presentado en la simulación con 64-PSK y con IBO= 3 dB.

En la Figura 55, se muestra los diagramas de constelación para los valores de $E_b/N_o=0$, $E_b/N_o=10$ y $E_b/N_o=20$.

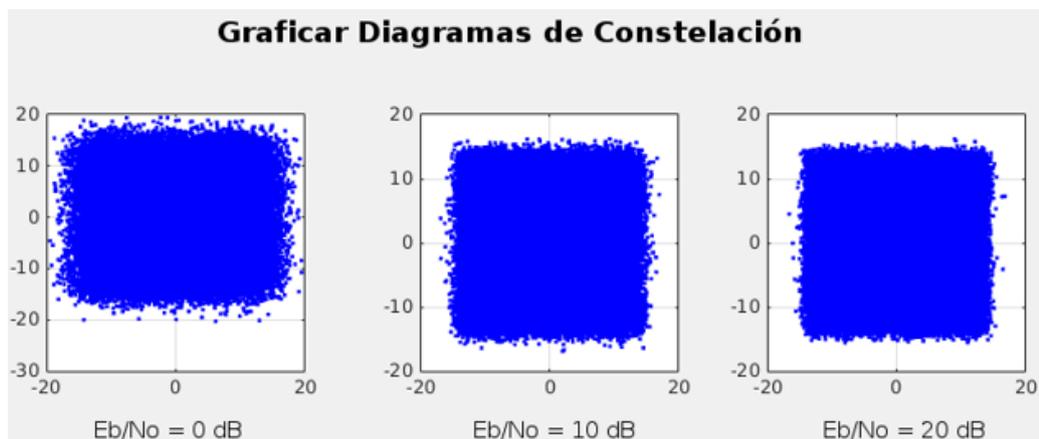


Figura 55 Diagrama de constelación para valores de $E_b/N_o=0$, $E_b/N_o=10$ y $E_b/N_o=20$, (256-QAM, IBO de 3db)

De acuerdo a la Figura 55 se observa que la dispersión de los datos se mantiene prácticamente inalterable a medida que se incrementa la relación E_b/N_0 . Comparado con la simulación realizada con modulación 64-PSK e IBO= 3 dB, se aprecia un peor comportamiento ante la relación energía por bit / densidad espectral de potencia de ruido.

En la Figura 56 se presenta el BER con respecto a la relación señal a ruido.

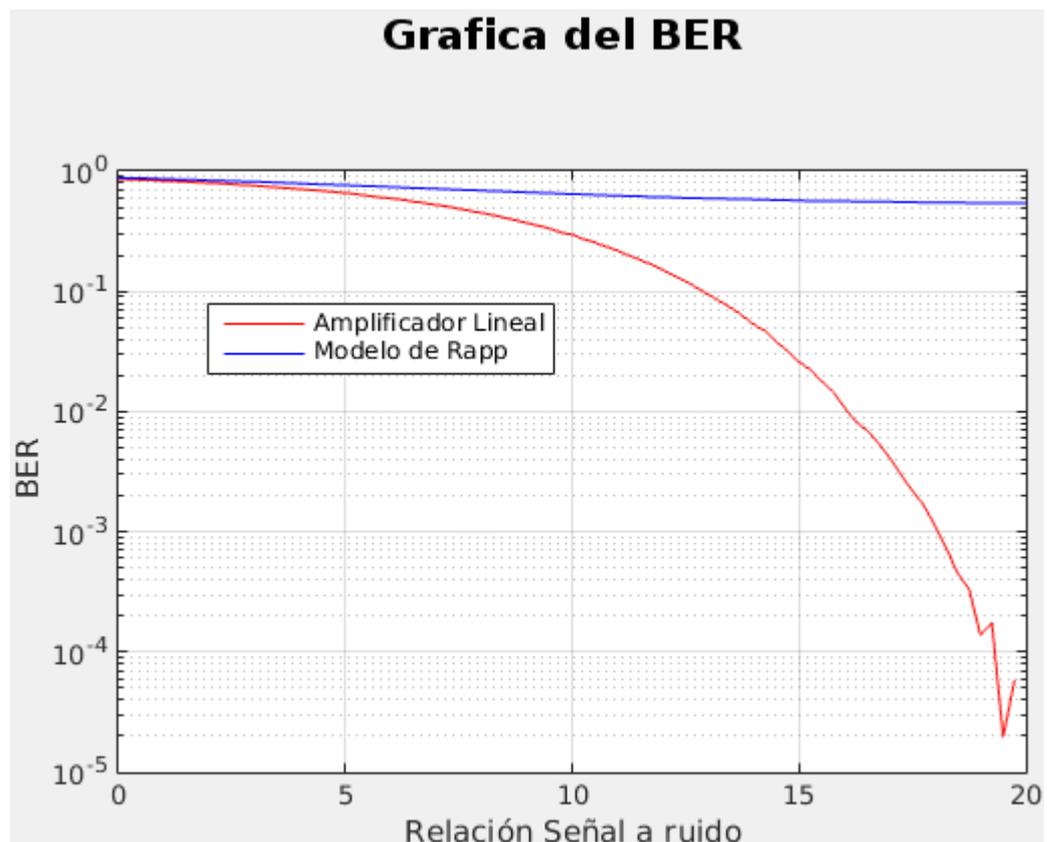


Figura 56 BER con respecto a la SNR, (256-QAM, IBO de 3db)

En la Figura 56 coincide el hecho de mantenerse prácticamente el mismo BER independientemente del aumento del SNR, con el comportamiento que se observa en la Figura 55. Si se compara esta simulación con respecto a la simulación con modulación 64-PSK e IBO de 3db (ver Figura 44), se aprecia que en esta última la pendiente de la curva (en negativo) es mayor.

5.5 Simulación OFDM usando modulación tipo 256-QAM y con IBO de 5db

Los parámetros de simulación para este caso son: 512 subportadoras, una modulación 256-QAM, 51.200 datos y un IBO de 5 dB sobre un canal AWGN (Additive White Gaussian Noise).

La Figura 57, muestra la pantalla con los datos previo a la simulación.



a) Pantalla de Ingreso de Datos

VER DATOS GENERADOS	
Tipo de Modulación:	QAM
Índice de Modulación de:	256
Bits:	8
Total de Datos:	51200
Total de Subportadoras:	512
Bandwith (Mhz)	20
Símbolos OFDM:	100
IBO (dB)	5

b) Pantalla de datos generados previo al cálculo

Figura 57 Mensaje para ingresar y mostrar datos utilizados, (256-QAM, IBO de 5db)

En la Figura 58 se puede observar el espectro de frecuencia con la señal OFDM luego de haber sido amplificada por medio del modelo Rapp y con un amplificador lineal ideal de ganancia unitaria.

Graficar señal modulada antes y después de amplificar

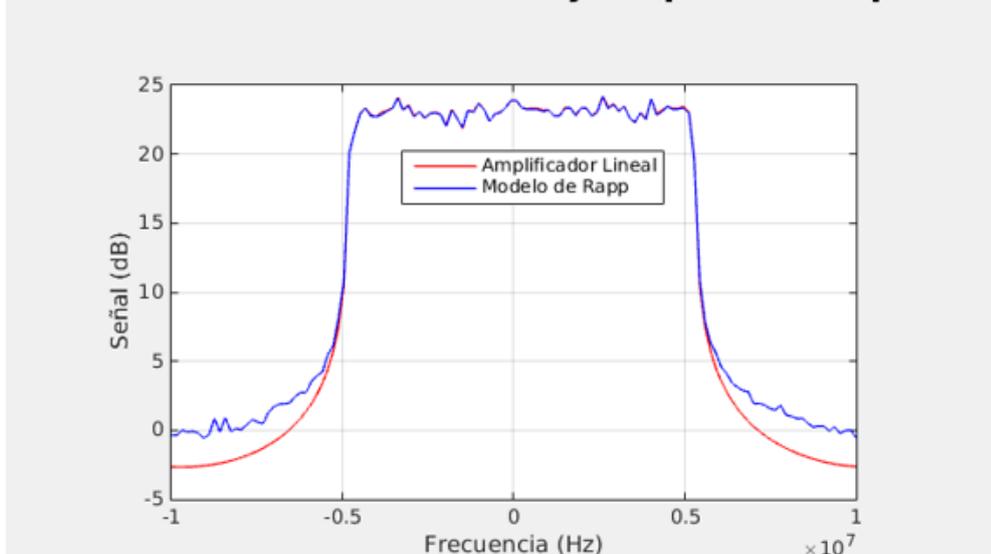


Figura 58 Espectro de frecuencia de señales de OFDM luego de haber sido amplificadas mediante modelo Rapp y amplificador ideal (256-QAM, IBO de 5db)

Aquí se observa las distorsiones fuera de banda creada por el amplificador de potencia en su trabajo no tan cerca de la zona no lineal (IBO= 5 dB). En este caso son menores distorsiones presentadas comparadas con las de IBO= 3 dB. Con respecto a la simulación que se efectúa con modulación 64-PSK e IBO= 5dB (ver Figura 49), se presenta un comportamiento similar,

En la Figura 59, se aprecia los diagramas de constelación para los valores de $E_b/N_o=0$, $E_b/N_o=10$ y $E_b/N_o=20$.

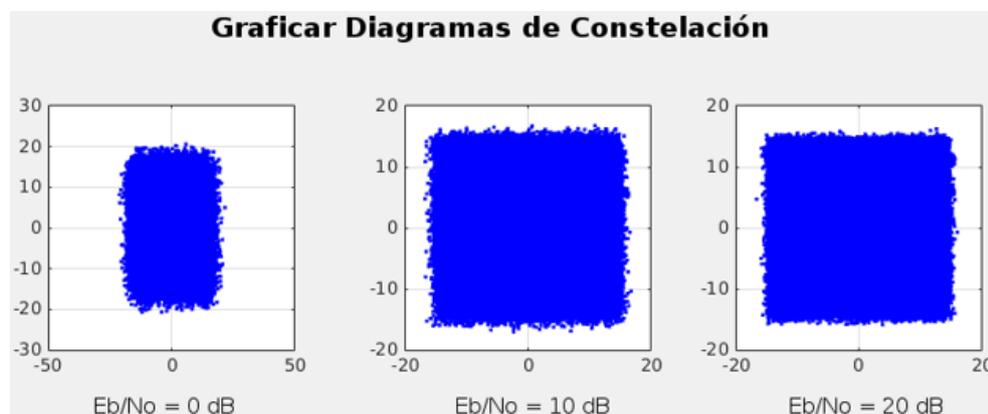


Figura 59 Diagrama de constelación para valores de $E_b/N_o=0$, $E_b/N_o=10$ y $E_b/N_o=20$, (256-QAM, IBO de 5db)

Para esta simulación la dispersión de los datos en el diagrama de constelación no presenta mayor variación con la modulación 256-QAM e IBO= 3dB.

La Figura 60, trae la relación del BER con respecto a la relación señal a ruido.

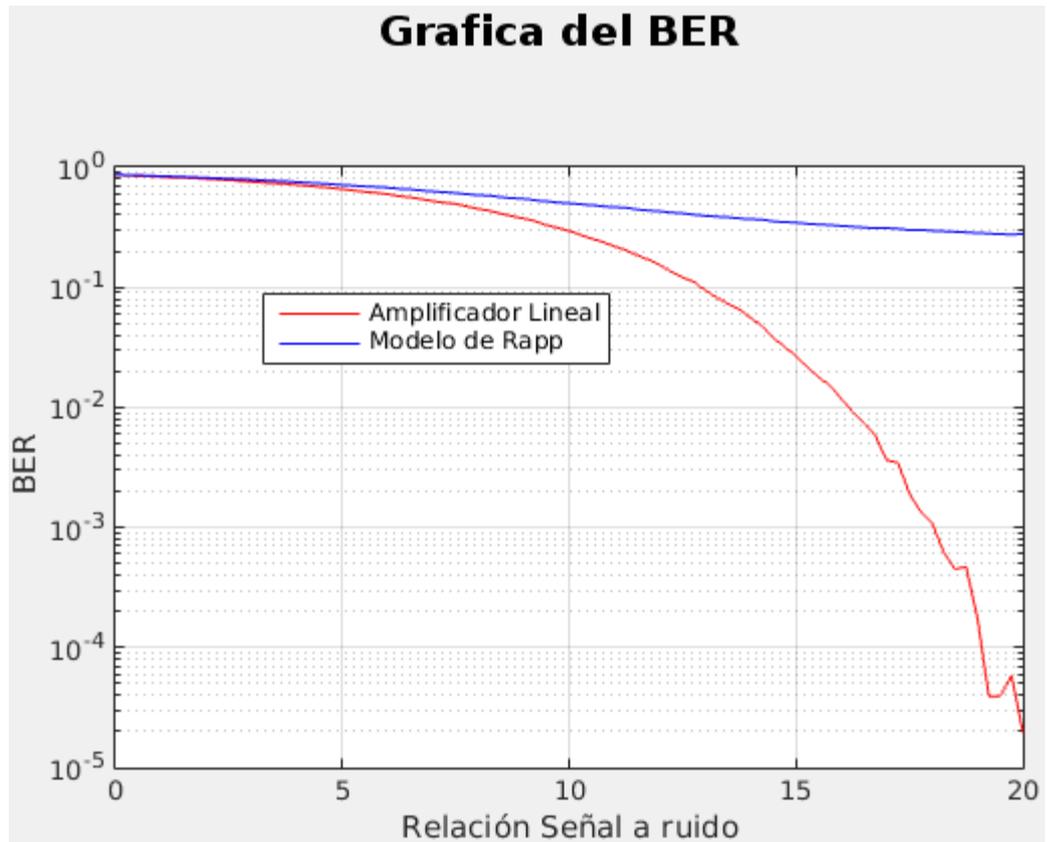


Figura 60 BER con respecto a la SNR, (256-QAM, IBO de 5db)

En la Figura 60 se puede apreciar una mejora en el comportamiento del BER mientras se aumenta la SNR, en contraste con una simulación con IBO= 3 dB, en la que prácticamente el BER no disminuía. Ahora, comparando con la simulación que se realiza con la modulación 64-PSK e IBO= 7dB (ver Figura 48), presenta un comportamiento similar.

5.6 Simulación OFDM usando modulación tipo 256-QAM e IBO de 7db

Los parámetros de simulación para este caso son: 512 subportadoras, una modulación 256-QAM, 51.200 datos y un IBO de 7 dB sobre un canal AWGN (Additive White Gaussian Noise).

En la Figura 61, se presenta la pantalla con los datos previo a la simulación.



INGRESAR DATOS

Tipo de Modulación

PSK QAM

IBO

7 dB

Guardar

VER DATOS GENERADOS

Tipo de Modulación:	QAM
Indice de Modulación de:	256
Bits:	8
Total de Datos:	51200
Total de Subportadoras:	512
Bandwith (Mhz)	20
Símbolos OFDM:	100
IBO (dB)	7

a) Pantalla de Ingreso de Datos

b) Pantalla de datos generados previo al cálculo

Figura 61 Mensaje para ingresar y mostrar datos utilizados, (256-QAM, IBO de 7db)

En la Figura 62 se aprecia el espectro de frecuencia con la señal OFDM luego de haber sido amplificada por medio del modelo Rapp y con un amplificador lineal ideal de ganancia unitaria.

Graficar señal modulada antes y después de amplificar

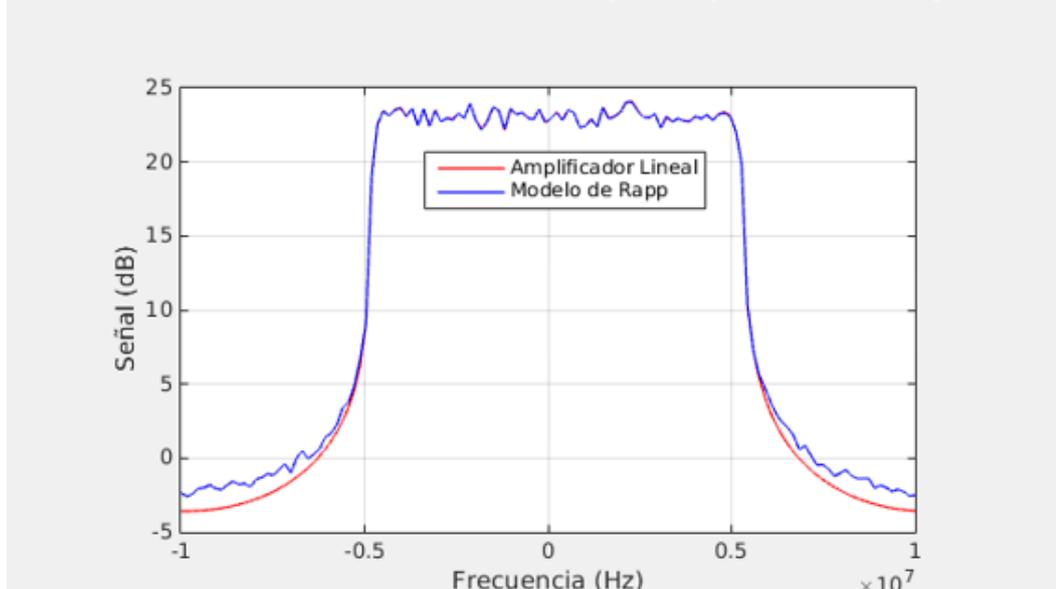


Figura 62 Espectro de frecuencia de señales de OFDM luego de haber sido amplificadas mediante modelo Rapp y amplificador ideal (256-QAM, IBO de 7db)

Aquí prácticamente no se presentan posibles distorsiones fuera de banda a ser introducidas por el amplificador de potencia, esto porque se trabaja en una zona un poco más lineal del amplificador (IBO= 7 dB).

Comparado con el comportamiento de la simulación con modulación 64-PSK e IBO= 7 dB (Figura 50), prácticamente presenta similar curva.

En la Figura 63, se presenta los diagramas de constelación para los valores de $E_b/N_o=0$, $E_b/N_o=10$ y $E_b/N_o=20$.

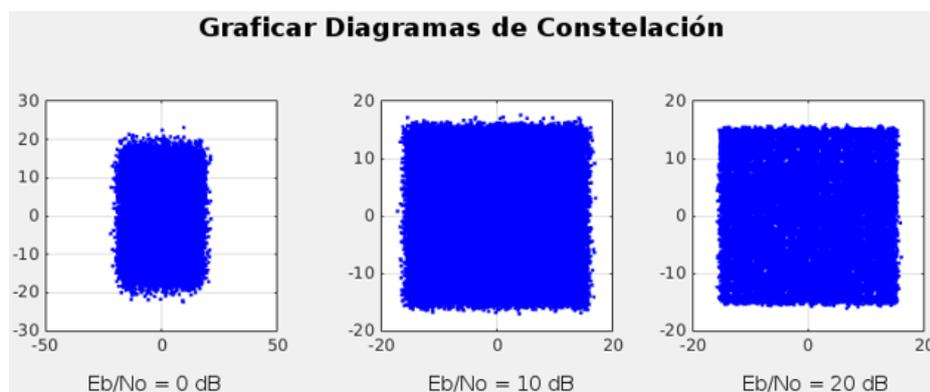


Figura 63 Diagrama de constelación para valores de $E_b/N_o=0$, $E_b/N_o=10$ y $E_b/N_o=20$, (256-QAM, IBO de 7db)

En contraste con las otras dos simulaciones que se realizan con modulación 256-QAM (para IBO= 3dB y con IBO= 5 dB), ahora sí se puede apreciar una disminución de la dispersión de los datos cuando con $E_b/N_o=20$. Esto es reflejo de la utilización del amplificador de potencia en una zona más lineal.

Este efecto del trabajo del amplificador en una zona más lineal también se ve plasmado de igual manera en la Figura 64. Aquí la relación del BER con respecto a la SNR muestra un comportamiento al de la modulación 64-PSK e IBO= 7 dB (Figura 51) en la cual se observa una mejora del BER, pero aún lejos de parecerse al de un amplificador lineal.

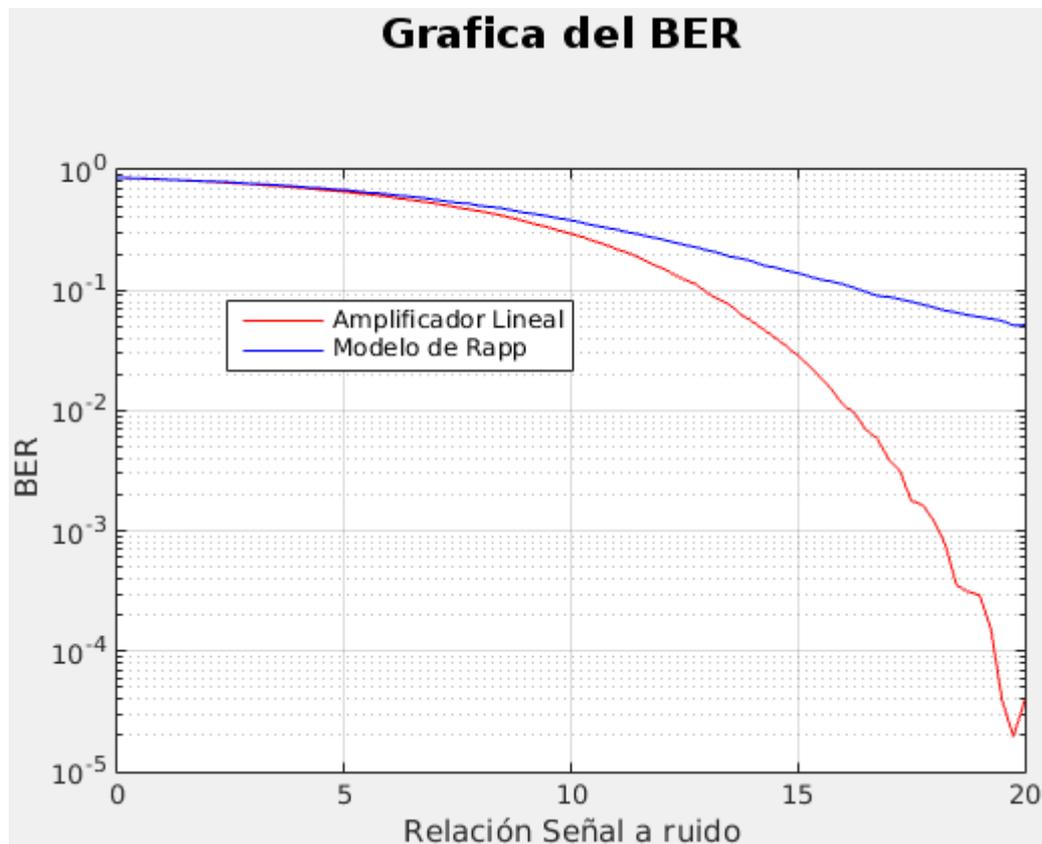


Figura 64 BER con respecto a la SNR, (256-QAM, IBO de 7db)

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una descripción de las técnicas de modulación: monoportadora y multiportadora. Dentro de las técnicas multiportadoras se destacó la OFDM explicando su principio de funcionamiento, sus características, su entorno, ventajas y desventajas. De igual manera se presentó los amplificadores de potencia, los tipos, sus parámetros y propiedades; sus clases y el modelo Rapp que simula su comportamiento.

También se hizo énfasis en el problema del alto PAPR del sistema OFDM al utilizar el amplificador de potencia.

Todo el sistema OFDM se modeló y se realizó su simulación por medio del programa Matlab®, esto incluyó el ruido aditivo blanco Gauseano y el amplificador de potencia (modelo Rapp y el amplificador lineal ideal de ganancia unitaria)

A través de las simulaciones realizadas se observó que el uso de la modulación 256-QAM, aunque es más eficiente que la modulación 64-PSK por la mayor cantidad de datos que puede enviar por símbolo OFDM, también presenta un mayor tasa de error de bit.

De igual manera se determinó que incrementando el IBO se mejora la tasa de error de bit (para ambas modulaciones: 256-QAM y 64-PSK), sin embargo hace menos eficiente al amplificador de potencia.

Asimismo se observó que el modelo Rapp para el amplificador de potencia refleja el comportamiento de las no linealidades de mismo en su conversión AM-AM, aunque no refleja el comportamiento del amplificador de potencia en la conversión AM-PM.

RECOMENDACIONES

Sobre la base de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas y tomando en cuenta las limitaciones encontradas en OFDM, se recomienda:

- Realizar simulaciones con otros modelos matemáticos de amplificadores de potencia en los que se refleje además de la no linealidad, la distorsión en la conversión AM-PM, el efecto de memoria de los amplificadores de potencia y deformaciones de la uniformidad de la ganancia.
- Llevar a cabo las pruebas realizadas en equipos reales de manera de determinar las desviaciones entre los resultados obtenidos de la simulación y los encontrados en ensayos físicos.
- La aplicación de técnicas alternativas al incremento del IBO, ya que con esta acción se disminuye notablemente la eficiencia de amplificador de potencia y puede limitar su alcance. Estas técnicas incluyen pero no se limitan a la predistorsión de la señal y extensión de la constelación.
- Efectuar el estudio utilizando la técnica de modulación: Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única, SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Esta técnica es muy parecida a OFDM pero logra disminuir sensiblemente el PAPR.
- Mejorar la programación realizada en Matlab®, por medio del paquete de entorno de programación visual GUIDE (Graphical User Interface Development Environment), para desarrollar una interfaz gráfica con el usuario, dando facilidades de poder guardar la gráfica, exportarla, exportar los datos a Excel; además de ofrecer un entorno más amigable al usuario.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

AM

La amplitud modulada (AM) Amplitude Modulation, es una técnica de modulación en la cual se modifica la amplitud de la señal portadora transmitida, con relación directa a la información que se envía.12

Amplificador

Dispositivo que, mediante la utilización de energía, magnifica la amplitud de un fenómeno. En el caso del amplificador electrónico se refiere a circuito electrónico utilizado para incrementar la intensidad de corriente, la tensión o la potencia de la señal que se le aplica a su entrada, obteniéndose la señal aumentada a la salida..... 1, 8, 9, 10

Ancho de banda

Para señales analógicas, el ancho de banda es la longitud, medida en Hz, de la cantidad de frecuencias en la que se concentra la mayor potencia de la señal. Se puede calcular a partir de una señal temporal mediante el análisis de Fourier.39

ASK

Modulación por desplazamiento de amplitud (Amplitude-shift keying). Forma de modulación en la cual se representan los datos digitales como las variaciones de amplitud de la onda portadora en función de los datos a enviar.....5

AWGN

Ruido Blanco Aditivo Gausseano (Additive White Gaussian Noise). Es un modelo de ruido básico utilizado en la teoría de la información para simular el efecto de muchos procesos aleatorios que se producen en la naturaleza. Es Aditivo porque se añade a cualquier ruido que pudiera estar intrínseco en el sistema. El Blanco se refiere al hecho que tiene una potencia uniforme a través de la banda de frecuencia. Gaussiano porque tiene una distribución normal en el dominio del tiempo.54, 63, 64, 66, 68, 72, 75, 78

BER

Tasa de error binario (Bit Error Rate). Se define como el número de bits recibidos de forma incorrecta con respecto al número total de bits enviados dentro de un intervalo de tiempo especificado.9

Calor

Energía que se manifiesta por un aumento de temperatura y procede de la transformación de otras energías 35, 38

CDMA

Acceso múltiple por división de código (Code Division Multiple Access). Técnica de multiplexación en la cual la señal se emite con un ancho de banda mucho mayor al requerido por los datos a transmitir, pero permite acceso a múltiples usuarios mediante un código de transmisión.5

Chasquis

Jóvenes diestros y preparados físicamente desde temprana edad, para recorrer por medio de un sistema de postas (tambos), los extensos caminos construidos por el estado inca.2

Conmutación

Mecanismo por el cual un elemento o dispositivo pasa de un estado activo, de conducción o prendido a un estado pasivo, de circuito abierto o apagado 13, 35, 43, 49

Crossover Distortion

Distorsión de cruce por cero. Es un tipo de distorsión que se caracteriza por la conmutación entre dispositivos que manejan una carga. Sucede con mayor frecuencia cuando se combinan dos señales, y se encuentra comúnmente en etapas de amplificadores clase B y AB, o de "push-pull". 45

Difracción

La difracción es un fenómeno en el que se distorsiona una onda por un obstáculo cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda.20

Dispersión

La dispersión es el fenómeno de separación de las ondas de distinta frecuencia al atravesar un material.20

DSSS

Espectro ensanchado por secuencia directa (Direct Sequence Spread Spectrum). Técnica en la cual se realiza la codificación del canal, antes de efectuar la modulación, en espectro ensanchado para la transmisión de señales digitales sobre ondas radiofónicas, modulando digitalmente la portadora.5

DVBT

Difusión de Video Digital Terrestre DVB-T, (Digital Video Broadcasting Terrestrial). Estándar para la transmisión de televisión digital terrestre creado por la organización europea Digital Video Broadcasting.7

Espectro

Es la representación de la diversidad de elementos de un todo. En el caso del espectro de frecuencia se caracteriza por la distribución de amplitudes para cada frecuencia de un fenómeno ondulatorio (sonoro, luminoso o electromagnético). 9, 13, 14, 15, 22

FDM

La multiplexación por división de frecuencia FDM (Frequency Division Multiplexing) es una técnica de modulación en la cual el total de ancho de banda disponible es dividido en una serie de sub-bandas de frecuencias no solapadas, en la que cada una de ellas lleva una señal separada. 15, 16

FHSS

Espectro ensanchado por salto de frecuencia (Frequency Hopping Spread Spectrum). Técnica de modulación en espectro ensanchado en el que la señal se emite sobre una serie de distintas radiofrecuencias, distribuyéndose la información entre cada portadora, para incrementar la seguridad de la información.5

FM

La frecuencia modulada (FM) Frequency Modulation, es una técnica de modulación que permite transmitir información por medio de una onda portadora modificando su frecuencia. Así, la frecuencia instantánea de la señal modulada es proporcional al valor instantáneo de la señal moduladora (datos transmitidos). 12

FSK

Modulación por desplazamiento de frecuencia (Frequency Shift Keying). Técnica de modulación para la transmisión digital de información utilizando dos o más frecuencias diferentes para cada símbolo.5

HPA

Amplificador de alta potencia (High Power Amplifier). Amplificador que se utiliza en la última etapa del sistema de transmisión de datos, señal, video, audio.....9

IBO

Se define como la diferencia en dB entre la potencia máxima de entrada que puede aceptar el amplificador en el punto de saturación y la potencia media de la señal.9

ICI

La interferencia interportadora ICI (Intercarrier Interference), es un proceso en el cual la frecuencia de una señal presenta un desplazamiento "offset" de la fase original.22

Impedancia

Es una medida de oposición que presenta un circuito a una corriente cuando se aplica una tensión.34

ISI

La Interferencia entre Símbolos ISI (Inter Symbol Interference) es un proceso en el cual parte de la información de un símbolo de datos, se introduce en otro símbolo de datos.21, 23

LTE

Estándar de evolución a largo plazo (Long Term Evolution. Estándar para comunicaciones inalámbricas de transmisión de datos de alta velocidad para teléfonos móviles y terminales de datos.7

Matlab

Herramienta de software matemático desarrollado por The MathWorks, Inc. 1

Modulación

Es un conjunto de técnicas que se usan para transportar información de señales típicamente en baja frecuencia, utilizando una o varias ondas

portadoras a altas frecuencias para mejorar su eficiencia en la transmisión. 1, 3, 5, 7, 8, 9

Monoportadora

Técnica de modulación en la cual la señal, con los datos analógicos o con datos digitales, se agrupa en símbolos que se transmiten por medio de una única portadora.....11

Multiplexación

La multiplexación es el uso combinado de dos o más canales de información a través de un solo medio de transmisión (lo que permite tener varias comunicaciones de manera simultánea) utilizando un dispositivo llamado multiplexor. 1, 3, 5, 6

Multiportadora

Técnica de modulación en la cual la señal, con los datos analógicos o con datos digitales, se agrupa en símbolos transmitidos a través de distintas subportadoras.....10, 11

OFDM

Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Es una técnica de comunicaciones que divide un canal, de frecuencia en un número determinado de bandas de frecuencia espaciadas con el mismo ancho, donde en cada banda se transmite una subportadora que a su vez transporta una porción de la información del usuario. Como característica principal cada subportadora es ortogonal al resto. 1, 3, 5, 6

Ortogonalidad

El término ortogonalidad (del griego ortos – recto - y gonos – ángulo -) es una generalización de la noción geométrica de perpendicularidad. En el caso de señales, estas son ortogonales si no interfieren entre sí mismas en cualquier intervalo de tiempo.22

PAE

Eficiencia de potencia añadida (Power Added Efficiency). Es una medida para determinar la eficiencia de un amplificador de potencia tomando en cuenta el efecto de la ganancia del amplificador.....39

PAPR

Relación entre la potencia pico con respecto a la potencia promedio (Peak to Average Power Ratio). Expresión que define en decibelios (dB) la relación existente entre la potencia pico de una señal y su potencia promedio o esperada.10

PSD

Densidad del espectro de potencia (Power Spectral Density). Función matemática que describe cómo está distribuida la potencia de una señal sobre el espectro de frecuencias (distintas frecuencia que la forman).9

PSK

Modulación por desplazamiento de fase (Phase-shift keying). Forma de modulación angular que consiste en hacer variar la fase de la portadora entre un número de valores discretos.5

QAM

Modulación de amplitud en cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation). Técnica que transporta dos señales independientes, mediante la modulación de una señal portadora, tanto en amplitud como en fase.5

Receptor

En el área de comunicación, es el dispositivo que recibe la información que envía el emisor. Esta información puede venir de señales eléctricas, telegráficas, telefónicas o radiofónicas y el receptor, las convierte en sonidos, señales o datos que se pueden oír, ver o interpretar.24, 33

Reflexión

La reflexión es el cambio de dirección de una onda, que, al entrar en contacto con la superficie de separación entre dos medios cambiantes, hace que cambie su trayectoria original.20

Semiconductores

Elementos que se comportan como un conductor o como un aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre.35

single-ended

Es el método más simple y más comúnmente utilizado para transmitir señales eléctricas a través de cables. Un conductor lleva un voltaje variable que representa la señal, mientras que el otro conductor está conectado a una tensión de referencia, generalmente tierra.....44

SNR

Relación Señal a Ruido (Signal to Noise Ratio). Expresa la proporción que existen entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido del canal donde se propaga. Esta relación se mide en decibelios.65, 68, 71, 74, 77, 80

Relación Señal a Ruido (Signal to Noise Ratio). Expresa la proporción que existen entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido del canal donde se propaga. Esta relación se mide en decibelios.80

TCM

Modulación con Codificación Reticulada (Trellis Coded Modulation). Esquema de modulación en el que se combina la codificación y la modulación introduciendo el uso de datos redundantes.5

Telégrafo

Sistema de señales eléctricas para la transmisión de mensajes de texto codificados, como con el código Morse, mediante líneas alámbricas o comunicaciones de radio.....3

Transmisor

Aparato que sirve para transmitir o emitir señales eléctricas o telefónicas. Es un equipo que emite una señal, código o mensaje a través de un medio. ..17, 33

WiFi

Mecanismo de conexión de dispositivos electrónicos de forma inalámbrica. .7

WiMAX

Sistema de interoperabilidad mundial para acceso por microondas (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Norma de transmisión de datos que utiliza las ondas de radio y establece las frecuencias de uso.7

BIBLIOGRAFÍA

- Agarwal, T. (2016). *The Classes and Classification of Amplifiers With Their Applications*. Obtenido de Electronics, Projects, Focus (Elprocus): <https://www.elprocus.com/classification-of-amplifiers-classes-its-applications/>
- Agudelo Rios, L. H. (13-15 de diciembre de 2001). *Importancia de las telecomunicaciones en el desarrollo universal*. Obtenido de Sistema de Información Científica Redalyc - Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal: <http://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=91101103>
- Alfaro, G. R. (16 de octubre de 2011). *MODULACION-DEMULACION*. Obtenido de TELECOMUNICACIONES ELECTRONICAS: <https://sites.google.com/site/telecomunicacionesmegatec/home/modulacion-demodulacion>
- AspenCore, Inc. (February de 2014). *Class B Amplifier*. Obtenido de Electronics Tutorials: http://www.electronicstutorials.ws/amplifier/amp_6.html
- AspenCore, Inc. (s.f.). *Amplifier Classes*. Obtenido de Electronics Tutorials: <http://www.electronicstutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html>
- Bernal Oñate, P., Lara Cueva, R., & Guamán, Y. (october 2015). Análisis del Desempeño de Filtros Adaptivos de Volterra Aplicado a Sistemas Satelitales. *Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*, 307-311.
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2009). *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos, 10a Edición*. Naucalpan de Juárez, Estado de México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

- Brančík, L., & Dostál, T. (2010). 2. Analogue Electronic Circuits. En F. o. communication, *Design of electronic systems* (págs. 1-108). Brno, Czech Republic: Brno University of Technology.
- Breed, G. (Vol. 10 No. 6 de June de 2011). The Quest for Power Amplifier Linearity and Efficiency. *High Frequency Electronics*, págs. 6-7.
- Briceño, J. E. (2012). *Principio de las Comunicaciones, Revisión III (digital)*. Mérida, Venezuela: Taller de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes.
- Briceño, J. E. (Abril, 2005). *Transmisión de datos. 3ra Edición*. Mérida: Taller de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, ULA.
- Browne, J. (18 de March de 2009). *Learn The Meaning Of Amplifier Linearity*. Obtenido de Microwaves & RF: <http://www.mwrf.com/components/learn-meaning-amplifier-linearity>
- Burbank, J. L., Andrusenko, J., Everett, J. S., & Kasch, W. T. (2013). *Wireless Networking*. New Jersey, USA: IEEE Press, John Wiley & Sons, Inc.
- Chapman, S. J. (2013). *MATLAB® Programming with Applications for Engineers, First Edition*. Stamford, CT - USA: Cengage Learning.
- Chiueh, T., & Tsai, P. (2007). *OFDM Baseband Receiver Design for Wireless Communications*. Singapore: John Wiley & Sons (Asia).
- Cripps, S. C. (2006). *RF Power Amplifiers for Wireless Communications 2da Ed*. Oxford, Massachusetts, USA: Artech House, Inc.
- Dawkins, P. (July 2017). *Differential Equations*. Beaumont, Texas - USA: Lamar University.
- Dhakal, S. (2013). *Odfm performance analysis over AWGN and Rayleigh channels*. Patan - Nepal: Tribhuvan University Institute of Engineering.

- Díaz Pérez, I., & Falcón Romero, J. (25 de julio de 2008). Maximització de l'Eficiència Energètica d'Amplificadors de Potència mitjançant Valors Òptims de Clipping per senyals OFDM. *Trabajo de fin de carrera, Escola Politècnica Superior de Castelldefels*. Castelldefels, Barcelona, Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Drake Moyano, J. M. (2005). *Amplificadores de potencia - Instrumentación electrónica de comunicaciones*. Santander - España: Universidad de Cantabria - Dpto. de Electrónica y Computadores.
- Duran, E. S. (5 de febrero de 2016). *Historia de las comunicaciones electrónicas*. Obtenido de Tecnología en Telecomunicaciones: <http://elianamartinezd.blogspot.com/>
- Equipo administrador de Textos Científicos. (04 de agosto de 2005). *PSK - Desplazamiento de fase*. Obtenido de Señales de transmisión analógicas y señales de datos digitales: <https://www.textoscientificos.com/redes/modulacion/psk>
- Fazel, K., & Kaiser, S. (2008). *Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.
- Gharaibeh, K. M. (2012). *Nonlinear distortion in wireless systems modeling and simulation with MATLAB®*. Chichester, United Kingdom: IEEE Press, John Wiley & Sons, Ltd.
- Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Golio, Mike;. (2011). *RF and microwave semiconductor device handbook*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press LLC.
- Gomezjurado Zevallos (Coordinador), J., Núñez Sánchez, J., Cordero Íñiguez, J., & Uyaguari Uyaguari, F. (Enero, 2014). *Historia de las telecomunicaciones en el Ecuador*. Quito–Ecuador: CNT (Corporación Nacional de Telecomunicaciones) - Academia Nacional de Historia.

- Hanington, G., Chen, P.-F., Asbeck, P. M., & Larson, L. E. (Aug 1999). High-Efficiency Power Amplifier Using Dynamic Power-Supply Voltage for CDMA Applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* (Volume: 47, Issue: 8), 1471 - 1476.
- Hannan, M. A., Hussein, H. A., Mutashar, S., Samad, S. A., & Hussain, A. (11 de December de 2014, 14). Automatic Frequency Controller for Power Amplifiers Used in Bio-Implanted Applications: Issues and Challenges. *MDPI AG Sensors*, 23844-23870.
- Heras, E. (October de 2010). Fiber-based Orthogonal Frequency Division Multiplexing Transmission Systems. *Master Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya*. Barcelona, España: Escola Politècnica Superior de Castelldefels.
- Hranac, R. (November de 2012). *Technical columns - What is OFDM?* Obtenido de Society of Cable Telecommunications Engineers Inc. - SCTE • ISBE: <http://www.scte.org/TechnicalColumns/12-11-30%20what%20is%20ofdm.pdf>
- IDC Technologies. (2017). *Introduction to the Amplifier*. Obtenido de IDC Technologies specialises in engineering courses & training: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Introduction%20to%20the%20Amplifier.pdf
- Junming, L., Guohao, Z., Yaohua, Z., Sizhen, L., Zhihao, Z., & Sidi, C. (20015). Design of broadband class-F power amplifier with high-order harmonic suppression for S-band application. *Chinese Institute of Electronics, Journal of Semiconductors, Vol. 36, No. 12*, 125002-1 - 125002-5.
- Kansagra, P., & Faldu, H. (13-14 May 2011). RF Based Push Pull Class E Power MOSFET Amplifie. *National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology* (págs. 1-3). Vallabh Vidhyanagar, Gujarat, India: B.V.M. Engineering College.

- Kokane, D. N. (08 de March de 2015). Obtenido de ABES Engineering College - ECE augmentation course by Faculty: http://www.abes.ac.in/departments/deptt-under-graduate/electronics-and-communications/chronicals/ece-augmentation-course-by-faculty/item/download/253_9b1665120cf3779d69b17e3a10f4d698
- Kulka, Z. (26 de June de 2007). Application of pulse modulation techniques for class-d audio power amplifiers. *Institute of Radioelectronics Electroacoustics Divisio*. Warsaw, Poland: Warsaw University of Technology.
- Lombry, T. (2015). *Principles of amplification*. Obtenido de Luxorion Project: <http://www.astrosurf.com/luxorion/qs1-amplifier-principle4.htm>
- Malvino, A., & Bates, D. J. (2006). *Electronic Principles, 7th Edition*. London, UK: cGraw-Hill Education.
- María, V. (2015). *IPET Nº 49, Telecomunicaciones, II Unidad 1, Modulación Digital*. Obtenido de Escuela del Trabajo de Villa María – Córdoba: <http://www.escueladeltrabajo.net/unidad%201.pdf>
- Maxim Integrated. (31 de January de 2007). *Class D Amplifiers: Fundamentals of Operation and Recent Developments*. Obtenido de APPLICATION NOTE 3977: <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN3977.pdf>
- MITEQ. (2010). *Power Amplifier Products*. Obtenido de L3 Narda-MITEQ: https://nardamiteq.com/docs/MITEQ_PowerAmplifier_c43.pdf
- Molisch, A. F. (2011). *Wireless Communications 2nd ed*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Muhammad H. Rashid, Ph.D. (2011). *Power electronics handbook - devices, circuits, and applications*. Oxford: Elsevier Inc.
- Nieto, R. (noviembre de 2010). Sistemas de Transmisión por Fibra Óptica basados en Orthogonal Frequency-Division Multiplexing. *rabajo Final de Carrera, Escola Politècnica Superior de Castelldefels (EPSC)*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.

- Paredes, M. C. (diciembre de 2014). Algoritmos para la reducción de los picos de potencia en los sistemas OFDM. *Tesis Doctoral, Escuela Politécnica Superior, Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones*. Leganés, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Parvez, M. Z., & Al Baki, M. (May de 2010). Master Thesis - Peak to average power ratio reduction in OFDM based radio systems. *School of Engineering, Department of Signal Processing*. Karlskrona, Blekinge, Sweden: Blekinge Institute of Technology (BTH).
- Peled, R., & Ruiz, A. (1980). Frequency Domain Data Transmission using Reduced Computational Complexity Algorithms. *Proc. IEEE Int'l. Conf. Acoustics, Speech, and Sig. Proc.*, Denver, Colorado, USA.
- Perahia, E., & Stacey, R. (2008). *Next Generation Wireless LANs*. New York, the United States of America: Cambridge University Press.
- Pérez Fontán, F., & Mariño Espiñeira, P. (2008). *Modeling the Wireless Propagation Channel-A Simulation Approach with MATLAB®*. Singapore: John Wiley & Sons Ltd Ltd.
- Pérez López, C. (2002). *MATLAB y sus aplicaciones en las ciencias y la ingeniería*. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Pérez Vega, C. (2004). *Transmisión de Televisión*. Cantabria - España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria.
- Pérez, I. P., Díaz, C., Giordana, A., & Ibáñez, N. (03 de agosto de 2016). Amplificadores de alto rendimiento. *Facultad de Ingeniería*. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de La Plata.
- Perret, Robert;. (2009). *Power Electronics Semiconductor Devices*. London, UK: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
- Ponce Silva, D. (1999). Sistemas de alimentación para lámparas de descarga basados en amplificadores clase E. *Tesis doctoral, Centro nacional de investigacion y desarrollo tecnologico*. Cuernavaca, Morelos, México: Secretaría de Educación Pública.

- Poole, I. (2017). *Multicarrier Modulation, MCM Tutorial*. Obtenido de RF Technology & Design: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/multicarrier-modulation-mcm/basics-techniques-tutorial.php>
- Pothecary, N. (1999). *Feedforward Linear Power*. Norwood, MA, USA: Artech House.
- Proakis, J. G., & Salehi, M. (2008). *Digital Communications, 5th edition*. New York: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Raab, F. H., Asbeck, P., Cripps, S., Kenington, P. B., Popovic, Z. B., Pothecary, N., . . . Sokal, N. O. (March 2002). Power Amplifiers and Transmitters for RF and Microwave. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques (Volume: 50, Issue: 3)*, 814 - 826.
- Rahman, M., Das, S., & Fitzek, F. (February 2005). OFDM Based WLAN Systems. *Center for TeleInfrastruktur (CTiF), Aalborg University, Aalborg, Denmark*.
- Rantelon Ltd. (2013). *Amplifier parameters*. Obtenido de Rantelon Ltd. (Filters and Amplifiers Manufacturer): <http://www.rantelon.ee/eng/docs/parameetrid.pdf>
- Rapp, D. I. (1991). Effects of HPA-Nonlinearity on a 4-DPSK/OFDM signal for a Digital Sound Broadcasting System. *European Space Agency - Second european conference on satellite communications, 22-24 October 1991*, 179-184.
- RF Wireless World. (2017). *FDM vs OFDM - Difference between FDM and OFDM*. Obtenido de RF Wireless World Articles section: <http://www.rfwireless-world.com/Articles/difference-between-FDM-and-OFDM.html>
- Salmanzadeh, R., & Mozaffari Tazehkand, B. (February, 2014). A Modified Method Based on the Discrete Sliding Norm Transform to Reduce the PAPR in OFDM Systems . *ETRI Journal, Volume 36, Number 1*, 42-50.

- Samal, L., Mahapatra, K. K., & Ram, R. (22-24 Feb. 2012). Class-C Power amplifier design for GSM application. *2012 International Conference on Computing, Communication and Applications* (págs. 1-5). Dindigul, Tamilnadu, India: IEEE Xplore Digital Library.
- Schulze, H., & Luders, C. (2005). *Theory and Applications of OFDM and CDMA*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Schwartz, M. (2011). History of communications. *IEEE Communications Magazine*, April 2011, 12-17.
- Segan, S. (6 de octubre de 2016). *¿Qué es el 5G?* Obtenido de PCMag Latinoamérica: <http://latam.pcmag.com/cell-phone-service-providers-products/1549/feature/que-es-el-5g>
- Singh, S., & Singh, H. (2015). Review Paper on OFDM-Concepts and Applications. *International Journal of Engineering Development and Research*, Volume 3, Issue 3 - ISSN: 2321-9939 (<https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1503100.pdf>), 1-4.
- Tena-Ramos, D., Patiño-Gómez, M., Ortega-González, F. J., Pardo-Martín, J. M., & Benavente-Peces, C. (January 16th of 2015). Predistorsión digital aplicada al amplificador de potencia de un sistema EER. *The ResearchGate Team* (págs. 1-5). Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid, Grupo de Ingeniería de Radio, EUIT de Telecomunicación.
- V. Tarokh (Editor). (2009). *New Directions in Wireless Communications Research*. Cambridge, USA: Springer Science+ Business Media.
- València, U. d. (2004). Primeros pasos en las telecomunicaciones. En E. T. Telecomunicación, *Historia de las telecomunicaciones* (págs. 1-32). Valencia.
- Veca, A. C., Lage, R. A., & Ruiz Noguera, M. D. (2014). *Filtros analógicos: clásicos, basados en Capacitor Conmutado y con FPAA*.

Buenos Aires, Argentina: E-Book - Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

- Viswanathan, M. (24 de May de 2011). *Introduction to OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing*. Obtenido de Signal Processing Simplified: <https://www.gaussianwaves.com/2011/05/introduction-to-ofdm-orthogonal-frequency-division-multiplexing-2/>
- Weinstein, S., & Ebert, P. (October 1971). Data Transmission of Frequency Division Multiplexing Using The Discrete Frequency Transform. *IEEE Transactions on Communications, COM-19 (5)*.
- Whitaker (Editor-in-Chief), J. (2005). *The electronics handbook, 2nd Edition*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC.
- Wicks, B. N. (January de 2009). Design and Implementation of Millimeter-Wave Power Amplifiers on CMOS. *Doctor of Philosophy, National Information and Communication Technology Australia*. Melbourne, Australia: The University of Melbourne.
- Wilson, M. (11 de December de 2013). *Amplifier Classes from A to H*. Obtenido de Circuit Cellar (KCK Media Corp): <http://circuitcellar.com/cc-blog/amplifier-classes-from-a-to-h/>
- World, R. W. (2012). *ISI vs ICI | difference between ISI and ICI*. Obtenido de ©RF Wireless World - Home of RF and Wireless Vendors and Resources: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/ISI-vs-ICI.html>
- Yang, W. Y., Chang, T. G., Song, I. H., Cho, Y. S., Heo, J., Jeon, W. G., . . . Kim, J. K. (2009). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.



DEPARTAMENTO DE ELECTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES

ACTA DE DENUNCIA DE PROYECTO DE GRADO

En Sangolquí a los, veintitrés días del mes de noviembre del año dos mil diecisiete, ante el Sr. Ing. Darwin Aguilar, Mgs., Director de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, del Departamento de Eléctrica y Electrónica, comparece el Señor, ALVEAR RODRIGUEZ PATRICIO DANIEL, con el objeto de denunciar solemne y públicamente su Proyecto de Investigación de Grado titulado ANÁLISIS DE LOS EFECTOS OCASIONADOS AL USAR EL MODELO DE RAPP PARA UN AMPLIFICADOR DE POTENCIA, EN UNA TRANSMISIÓN OFDM CON PICOS DE POTENCIA ELEVADA, el cual desarrollará como requisito previo a la obtención del Título de INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES.

Al efecto que fue advertido de la seriedad del compromiso contraído, se compromete bajo su palabra de Honor, a desarrollar el proyecto antes enunciado, en los plazos y condiciones determinados por el Reglamento de Estudiantes y a entregarlo como aporte de su preparación individual.

Sangolquí, 23 de Noviembre de 2017

DIRECTOR CARRERA

ING. DARWIN AGUILAR Mgs.

EL ESTUDIANTE EGRESADO

ALVEAR RODRIGUEZ PATRICIO DANIEL





**PROGRAMA CARRERA INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

ACTA DE ENTREGA RECEPCIÓN DE TESIS/PROYECTO DE GRADO

En Santa Clara - Sangolquí, Cantón Rumiñahui, Provincia de Pichincha, siendo las ocho horas del veintitrés de noviembre del dos mil diecisiete el señor Ing. Darwin Aguilar, Mgs. Director del programa carrera Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", comparece el señor egresado: ALVEAR RODRIGUEZ PATRICIO DANIEL; quien manifiesta hacer la entrega de su Tesis/Proyecto de Grado titulado: " ANÁLISIS DE LOS EFECTOS OCASIONADOS AL USAR EL MODELO DE RAPP PARA UN AMPLIFICADOR DE POTENCIA, EN UNA TRANSMISIÓN OFDM CON PICOS DE POTENCIA ELEVADA " el archivo magnético grabado en dos CDs; como requisito previo a la obtención de su título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.

En efecto, revisados que fueron los ejemplares en digital, se puede constatar que se refieren al mencionado Proyecto de Grado, por lo que el señor Director dispone se levante la presente Acta de Entrega - Recepción, para dar cumplimiento con este requisito.

Para constancia de lo actuado, firman en unidad de acto el señor Director de la programa carrera Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" y el señor egresado de esta Carrera.


Sr. Patricio Daniel Alvear R.
EL EGRESADO


Sr. Ing. Darwin Aguilar, Mgs.
EL DIRECTOR

