

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERAS ELECTRÓNICAS**

**TEMA:  
SISTEMA DE TRANSMISIÓN MULTIPORTADORA MEDIANTE  
MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA GENERALIZADO  
(GFDM)**

**AUTORAS:  
LIZETH CAROLINA FLORES TIPÁN  
LISBETH CAROLINA TOSCANO LUCERO**

**TUTOR:  
MILTON NAPOLEÓN TIPÁN SIMBAÑA**

**Quito, Enero de 2017**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Nosotras Lizeth Carolina Flores Tipán y Lisbeth Carolina Toscano Lucero, con documento de identificación N° 172097598-4 y N° 172469375-7 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autoras del trabajo de titulación: SISTEMA DE TRANSMISIÓN MULTIPORTADORA MEDIANTE MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA GENERALIZADO (GFDM), mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieras Electrónicas, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autoras nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, Enero del 2017



Lizeth Carolina Flores Tipán

C.I: 1720975984



Lisbeth Carolina Toscano Lucero

C.I: 1724693757

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación: SISTEMA DE TRANSMISIÓN MULTIPORTADORA MEDIANTE MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA GENERALIZADO (GFDM) realizado por Lizeth Carolina Flores Tipán y Lisbeth Carolina Toscano Lucero, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Enero del 2017



Milton Napoleón Tipán Simbaña

C.I: 1713583126

## **DEDICATORIA**

En primer lugar quiero agradecer a Dios quien ha sido el que ha guiado siempre mi camino a lo largo de toda mi vida para cumplir hoy uno de mis sueños más anhelados, dedico con mucho amor este triunfo a mi madre quien ha sido el pilar, mi ejemplo quien día a día se ha esforzado tanto por darme lo mejor, valoro su sacrificio y todo lo que ha hecho por mí desde pequeña para ahora ser lo que hoy soy, una persona formada en valores y como no una profesional, a mi segunda madre que ahora es mi angelito y cuida de mí desde el cielo, sé que está orgullosa de mí, mamá mía siempre estarás en mi corazón, mi cómplice que siempre cuida de mí, la dulce mamá que siempre velaba que no me pase nada, como olvidar a mi hermano Lenin por sus ánimos, apoyo y afecto y mi ejemplo, ya que cuando él culminó sus estudios me demostró que se pueden alcanzar muchas metas pero con dedicación, como no dedicar este logro a mi gran amiga y compañera de tesis que desde el día que ingresé a la U la conocí quien iba pensar que ha pasado tanto tiempo y es quien día a día me ha mostrado ese apoyo incondicional, momentos buenos y malos que hemos vivido y ahora hemos finalizado nuestro sueño compartiendo conocimientos y anécdotas.

**Lizeth Carolina Flores Tipán**

Agradezco sobre todo a Dios por haberme permitido lograr uno más de mis objetivos, ya que sin su guía y sabiduría no lo habría cumplido, en segundo lugar también quiero agradecer a mis padres por darme la oportunidad de estudiar y de seguir una carrera profesional, pues sin su esfuerzo y sacrificio no hubiese culminado esta etapa de mi vida, mi gratitud eterna por sus consejos, cariño y amor. Gracias también a mi hermano Juan Andrés por ser mi aliado incondicional en todo momento, pues nos hemos apoyado mutuamente, y le deseo el mejor de los éxitos también en sus estudios profesionales, Dios te bendiga niño. A mis amigos y compañeros fuera y dentro de las aulas, muchas gracias por compartir su tiempo y conocimiento conmigo, en especial a mi gran amiga con quien desarrollé esta tesis y afianzamos lazos de una bonita amistad. A mis profesores a lo largo de todos estos años, gracias por su paciencia, vocación y disposición para aportar en mi formación académica y profesional.

**Lisbeth Carolina Toscano Lucero**

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestro más sincero agradecimiento en especial a nuestro tutor el Ing. Milton Tipan por sus conocimientos, paciencia, constancia, motivación y su apoyo incondicional ha permitido que nuestro proyecto de titulación día a día haya ido avanzando y llegar al final del mismo, sin olvidar también la ayuda por parte de la Universidad Politécnica Salesiana por toda la colaboración para la adquisición de equipos con la finalidad de implementar nuestro proyecto.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
<b>ESTADO DEL ARTE</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	7
<b>SISTEMAS MULTIPORTADORA</b> .....	7
2.1 OFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal).....	7
2.2 GFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Generalizado).....	15
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	20
<b>ARQUITECTURA Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DIGITAL GFDM</b> .....	20
3.1 Transmisor GFDM .....	20
3.1.1. Simulación del Transmisor .....	22
3.1.1 Simulación – Transmisor GFDM .....	22
3.2 Canal GFDM .....	23
3.2.1 Simulación – Canal GFDM .....	24
3.3 Receptor GFDM .....	25
3.3.1 Simulación – Receptor GFDM .....	26
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	28
<b>IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE TRANSMISION DIGITAL GFDM</b> .....	28
4.1 Transmisión .....	30
4.2 Análisis y Resultados.....	40
<b>CONCLUSIONES</b> .....	45
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	47
<b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA</b> .....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Multiplexación por División de Frecuencia (FDM) .....	8
Figura 2.2. Diagrama Ortogonalidad entre señales .....	9
Figura 2.3. Comparación entre FDM y OFDM .....	9
Figura 2.4. Propagación multitrayecto de las señales inalámbricas.....	10
Figura 2.5. Tramas de símbolos OFDM precedidas de prefijo cíclico. ....	10
Figura 2.7. Comparación de un sistema de portadora única y multiportadora. ....	11
Figura 2.6. Desempeño de Prefijo Cíclico .....	11
Figura 2.8. Diagrama de bloques de Transmisor OFDM.....	12
Figura 2.9. Diagrama de bloques de Receptor OFDM.....	14
Figura 2.10. Espaciamiento espectral de las subportadoras en GFDM.....	15
Figura 2.11. Cambio de OFDM a GFDM .....	16
Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema de transmisión y recepción GFDM....	20
Figura 3.2. Diagrama de bloques para el transmisor GFDM.....	21
Figura 3.3. Diagrama de Flujo del transmisor GFDM.....	22
Figura 3.4. Diagrama de bloques para el canal GFDM.....	24
Figura 3.5. Diagrama de Flujo del canal GFDM .....	24
Figura 3.6. Diagrama de bloques para el receptor GFDM.....	25
Figura 3.7. Diagrama de Flujo del transmisor GFDM.....	27
Figura 4.1. Sistema de transmisión multiportadora GFDM.....	29
Figura 4.2. Sistema de transmisión multiportadora GFDM implementado .....	30
Figura 4.3. a) Señal GFDM en tiempo b) Espectro en frecuencia sin ruido .....	31
Figura 4.4. a) Señal GFDM en tiempo b) Espectro en frecuencia .....	32
Figura 4.5. Espectro en frecuencia sin ruido.....	33
Figura 4.6. a) Señal GFDM en tiempo b) Espectro en frecuencia sin ruido .....	33
Figura 4.7. a) Señal GFDM en tiempo b) Espectro en frecuencia SNR=18 dB .....	34
Figura 4.8. a) Señal GFDM en tiempo b) Espectro en frecuencia SNR=18 dB .....	34
Figura 4.9. Espectro en frecuencia enviado al CXA SNR=18 dB .....	
Figura 4.10. a) Señal GFDM en tiempo b) Espectro en frecuencia SNR=18 dB .....	
Figura 4.11. a) Señal GFDM en tiempo b) Espectro en frecuencia SNR=30 dB ....	36
Figura 4.12. a) Señal GFDM en tiempo b) Espectro en frecuencia SNR=30dB .....	37
Figura 4.13. Espectro de frecuencia enviado al CXA SNR=30 dB .....	38
Figura 4.14. a) Señal GFDM en tiempo b) Espectro en frecuencia SNR=30 dB .....	38
Figura 4.15. Gráfica del SNR VS VER.....	40
Figura 4.16. Gráfica del EVM.....	42
Figura 4.17. Gráfica del BER.....	43

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Evolución de las tecnologías de generación. ....	7
Tabla 4.1. Parámetros de la señal GFDM .....	30
Tabla 4.2. EVM calculado en porcentaje para 16-QAM .....	42
Tabla 4.3. Número de bits erróneos .....	44

## RESUMEN

Las telecomunicaciones han aportado al desarrollo de la sociedad, su mejoramiento está estrechamente relacionado con los cambios y avances tecnológicos, por lo cual los sistemas de comunicación han ido adaptándose a las necesidades exigentes por parte de los usuarios.

En busca de mejorar el uso del espectro de frecuencia, se han propuesto nuevas formas de onda como clave para la infraestructura de 5G, entre ellas se encuentra: GFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Generalizado), la cual utiliza un método de procesamiento envolvente para el filtrado, haciendo más pequeña la trama de datos y logrando un retardo en milisegundos, obteniendo un sistema de transmisión más veloz que 4G.

Con el objetivo de comprender el funcionamiento de GFDM, este proyecto implementa un sistema de transmisión multiportadora off – line, utilizando Matlab 2013 como herramienta de simulación y equipos de análisis de señales tanto en el dominio de tiempo como en frecuencia.

En este trabajo se realiza una transmisión de datos aleatorios, los cuales son sometidos en primera instancia a la modulación 16-QAM, para luego pasar al proceso de GFDM a través de la aplicación del filtro rectangular RRC (Root Raised Cosine), y de esta manera obtener una señal de transmisión.

Al final del proyecto se realiza un análisis de los datos enviados y recibidos, mediante parámetros como: BER (Bit Error Rate) y EVM (Error Vector Magnitude), el primero permite conocer cuánto error existe entre los bits transmitidos y recibidos, mientras que el segundo evalúa los símbolos QAM tanto en transmisión como en recepción.

## **ABSTRACT**

Telecommunications have contributed to the development of society, its improvement, is closely related with the changes and technological advances, that is the reason why the communication systems have been adapting according with the needs and increasingly demanding requirements of the users.

In order to optimize the use of the frequency spectrum, new multicarrier systems have been proposed as the key to the 5G infrastructure, GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing) is including among them. It works with an envelope processing method to the filtering, making the data frame smaller and achieving a delay in milliseconds.

For a better understanding the operation of Generalized Frequency Division Multiplexing, this project implements an off - line multicarrier transmission system, using Matlab 2013 as simulation tool, and signal analyzer equipment in both time and frequency domain.

On the development of this work a transmission of random data is performed, which are firstly subjected to 16-QAM modulation, then passed to the GFDM process through the application of the RRC (Root Raised Cosine) rectangular filter, and finally obtain the transmission signal. Then the signal is generated trough AWG generator, and observed by the Real Time Oscilloscope, after that received data is processed in Matlab again. At the end, an analysis of the data sent and received is performed, using parameters such as BER (Bit Error Rate) and EVM (Error Vector Magnitude), the first allows to know how much error exists between the transmitted and received bits, second one evaluates the QAM symbols in both transmission and reception.

## **INTRODUCCIÓN**

El proyecto se encuentra dividido en 4 capítulos, los mismos que de forma clara y concreta explican el funcionamiento del Sistema de Transmisión Multiportadora mediante Multiplexación por División de Frecuencia Generalizado. A continuación, se describe de forma general el contenido de cada uno de los capítulos indicados:

### **CAPÍTULO 1**

Este capítulo trata del estado del arte de una nueva forma de onda para redes 5G, llamada Multiplexación por división de frecuencia generalizada (GFDM), que consta de todo el desarrollo que se ha venido investigando acerca de esta señal, la implementación pruebas y resultados que han sido probados y propuestos por diferentes autores.

### **CAPÍTULO 2**

En este capítulo se encuentra una breve descripción acerca de los sistemas multiportadora, y la evolución de las tecnologías de telecomunicaciones, junto con el modelamiento matemático de cada uno de ellos.

### **CAPÍTULO 3**

En este capítulo se describe la arquitectura del sistema de transmisión GFDM, al igual que los diagramas de bloques tanto de transmisión como de recepción, y una como explicación de cada etapa y el proceso que cada componente del sistema desempeña. También se explica la parte de simulación llevado a cabo para este proyecto.

### **CAPÍTULO 4**

Este capítulo trata de la implementación del sistema de transmisión GFDM explicando todo el proceso de la señal que es transmitida en los equipos RTO Y CXA permitiendo visualizar la señal en tiempo real y el espectro en frecuencia con los parámetros específicos, y la recepción de la misma mediante un sistema Off-Line donde los datos son recibidos por otro dispositivo externo para luego ser procesados y observar los resultados.

## **Planteamiento del problema**

La constante evolución de las telecomunicaciones en la actualidad, ha hecho que las redes vayan adaptándose a las necesidades del usuario, de la misma manera que los medios de transmisión; dando lugar a las redes inalámbricas y redes fijas. Las mismas que deben cumplir con ciertos requisitos demandados por los clientes, tales como: capacidad, flexibilidad, movilidad, velocidad, acceso en todo momento y lugar, a un coste accesible.

Por otro lado, la disponibilidad del espectro se ha convertido en un inconveniente relevante, pues las tecnologías anteriores a 5G disponen de un rango espectral entre 3Khz y 30 GHz, no obstante no es suficiente, pues existe mucha competencia por el espectro. Para ofrecer las prestaciones de servicios es necesario que el ancho de banda de la portadora sea de 20 MHz, es así que 4G se proyectó para mejorar el uso del espectro, utilizando Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM). Sin embargo, esta multiplexación es sensible al offset en frecuencia y a los ruidos de fase; también la necesidad de intervalos de guarda provoca una menor eficiencia espectral, por lo tanto se busca otras opciones de multiplexación multiportadora para mejorar la eficiencia y uso de las frecuencias, tal como es el caso de GFDM. (Fernández, 2014)

## **Justificación**

La tecnología de Quinta Generación 5G brindará mayor capacidad a las redes inalámbricas, ofreciendo una mayor variedad de servicio y tiempos de respuesta menor 1 ms de extremo a extremo (Boccolini, 2014). De esta manera se conseguirá una conexión amplia entre dispositivos y usuarios; es decir sus enlaces contarán con mayor cobertura. (Boccolini, 2014).

La nueva tecnología de Quinta Generación (5G) pretende solucionar ciertos inconvenientes existentes en las tecnologías de comunicaciones móviles actuales. Uno de los problemas a resolver es la alta latencia que existe entre los móviles y la red, disminuyéndola a valores cercanos al milisegundo. (Franceschin, 2015)

Aunque pareciera complejo, esta nueva tecnología permitirá alcanzar velocidades de hasta 7Gbps, consiguiendo de esta manera redes miles de veces más escalables y

eficientes, conectando así todo tipo de dispositivos móviles y que disponen de conexiones autónomas. (Franceschin, 2015)

### **Objetivos generales y específicos.**

#### **Objetivo General:**

- Implementar un Sistema de Transmisión Multiportadora GFDM mediante un Sistema Off-Line para sistemas Inalámbricos 5G.

#### **Objetivos Específicos:**

- Revisar el estado del arte de la modulación multiportadora GFDM para sistemas Inalámbricos 5G.
- Simular mediante software numérico un transmisor y un receptor para la modulación multiportadora GFDM.
- Implementar una transmisión Off-Line para el sistema multiportadora GFDM.
- Validar el transmisor mediante la medición de parámetros de desempeño como el BER, EVM, ancho de banda y potencia para el correcto funcionamiento del sistema multiportadora GFDM.

# CAPÍTULO 1

## ESTADO DEL ARTE

Los sistemas celulares de cuarta generación (4G) se han optimizado para ofrecer altas velocidades de datos y la cobertura fiable a los usuarios móviles. Los sistemas celulares de la próxima generación se enfrentarán a mayores requisitos de aplicación.

La demanda de mayores velocidades de datos excede la capacidad 4G, por ejemplo, aplicaciones de control requieren tiempos de respuesta muy cortos, por lo que se tiene la visión de nuevas formas de onda no ortogonales que llevan los datos sobre la capa física mejorando la robustez en el enlace descendente (Wunder et al., 2013). La nueva forma de onda no ortogonal que se estudia en este proyecto es : GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing) (Datta, Michailow, Lentmaier, & Fettweis, 2012).

GFDM (Generalized frequency division multiplexing) es un esquema de transmisión multiportadora basado en bloques no ortogonal con características especiales para sistemas de comunicaciones inalámbricas una de ellas es la radio cognitiva que está en desarrollo, siendo su propósito mejorar la eficiencia en cuanto a la utilización del espectro ocupando los espacio en blanco(Matthe, Michailow, Gaspar, & Fettweis, 2014).

Las transmisiones de datos de cada bloque se distribuyen en tiempo y frecuencia, cada bloque de datos GFDM consiste en cierto número de subportadoras y subsímbolos, las subportadoras se filtran con un filtro prototipo que se desplaza circularmente en el tiempo y en el dominio de la frecuencia (Matthe et al., 2014).

Es decir, GFDM se ha modelado para que todas las subportadoras se procesen de forma conjunta, el bloque de datos tanto en tiempo, así como en frecuencia es modulado y demodulado en una etapa de procesamiento.

El filtrado de subportadoras no ortogonales causan interferencias entre símbolos (ISI) e interferencia entre portadoras (ICI). Sin embargo, las técnicas de recepción eficaces pueden eliminar esta interferencia, es decir, un receptor de filtro adaptado con bloqueo

de interferencia iterativo, GFDM utiliza los filtros MF (Matched filter) porque tiene una complejidad muy baja y minimiza la influencia del ruido y ZF (Zero Forcing) que se encarga de anular las señales de interferencia (Nicola Michailow, Gaspar, Krone, Lentmaier, & Fettweis, n.d.).

GFDM emplea filtros de conformación de pulsos tales como:

1) Raíz de coseno elevado y coseno elevado: Son filtros de conformación de pulsos diseñados en el dominio del tiempo de acuerdo con el factor rolloff.

El filtro de raíz de coseno elevado toma ese nombre porque la función de transferencia es exactamente la raíz cuadrada de la función de transferencia del filtro en coseno elevado.

El filtro de coseno elevado llamado así porque la parte no nula del espectro frecuencial es un coseno, capaz de reducir al mínimo la interferencia entre símbolos (ISI).

2) Pulsos Xia: Los pulsos Xia son filtros de conformación de pulsos no simétricos reales que se definen mediante un factor de rolloff que permite regular la suavidad del pulso en el dominio de la frecuencia. El roll-off dependerá de varios factores, como la disponibilidad de ancho de banda, los niveles de ruido etc.

3) Pulso gaussiano: El pulso gaussiano es un filtro cuya respuesta al impulso es una función de Gauss y se define en el dominio del tiempo (Matthe et al., 2014).

El filtro de conformación de pulso más utilizado que emplea GFDM es el RRC y RC ya que el filtrado mejora la eficiencia del espectro en más de 75% y también el uso de estos filtros tanto en el transmisor como en el receptor mejora el rendimiento de Bit Error Rate (BER) (N Michailow, Lentmaier, Rost, & Fettweis, 2011).

Estos filtros no deben introducir interferencia entre símbolos, sino cumplir con ciertos criterios, uno de ellos es el primer criterio de Nyquist que se relaciona con el espectro de frecuencia de la señal del transmisor con la interferencia entre símbolos (N Michailow et al., 2011).

La mordedura de la cola (Tail-biting) se emplea para eliminar los intervalos de guarda adicionales. Además, GFDM utiliza un prefijo cíclico en cada bloque en lugar de cada símbolo, aumentando la eficiencia espectral en comparación con OFDM, es decir la trama de GFDM consta de un prefijo cíclico en cada bloque de símbolos por tanto la duración de la trama se reduce a  $66,7 \mu\text{s}$  y la sobrecarga es pequeña (Fettweis et al., n.d.).

La ventaja que ofrece GFDM de un solo prefijo cíclico permite mejorar la eficiencia espectral del sistema o puede ser cambiado por un sufijo cíclico adicional (CS), que permite disminuir la complejidad de los requisitos de sincronización de múltiples usuarios, además, todos los algoritmos de sincronización principales desarrollados para OFDM pueden ser adaptadas para GFDM (Nicola Michailow et al., 2014).

El Tail-biting también es usado como una forma de reducir la longitud del CP sin cortar la longitud del filtro de conformación de impulsos ya que se basa en la idea de preservar una estructura circular dentro de cada bloque de transmisión, lo que permite mantener la longitud de la CP independiente de la longitud del filtro de transmisión permitiendo mejorar el rendimiento de GFDM en comparación a OFDM. (N Michailow et al., 2011).

La aplicación de filtros de conformación de pulsos por subportadora puede controlar la radiación fuera de banda (OOB) por lo que GFDM reduce la radiación OOB en 46 dB en comparación con OFDM (Matthe et al., 2014).. Este resultado se consigue gracias al filtro de conformación de impulsos RRC aplicado en cada subportadora (Danneberg et al., 2016).

Para el espectro de la señal GFDM no sólo es importante la conformación de impulsos sino también la transición entre bloques, ya que un cambio abrupto de la señal entre dos bloques crea una alta radiación OOB. Para lograr transiciones más suaves, se puede insertar un símbolo de guardia en cada bloque (Matthe et al., 2014).

La idea de esta nueva forma de onda es abandonar el sincronismo y la ortogonalidad por completo, admitiendo así alguna interferencia, y controlarla mediante una

estructura de transceptor y técnica de transmisión asíncrona que es el proceso de la sincronización entre emisor y receptor(Matthe et al., 2014).

El modelo de canal que utiliza es el Ruido aditivo blanco gaussiano AWGN (Additive white Gaussian noise), en el receptor GFDM cada subportadora de la señal recibida se filtra por separado con el correspondiente filtro adaptado circular que se adapta a la forma de onda transmitida por cada código de línea, posteriormente, cada subportadora filtrada se muestrea en las ranuras de símbolos para obtener los símbolos de datos recuperados (Matthe et al., 2014).

GFDM es un esquema de transmisión multiportadora basada en bloques como se mencionó anteriormente, donde cada bloque contiene símbolos de datos complejos que se distribuyen en el tiempo e intervalos de frecuencia. Las subportadoras en GFDM están espaciados y cada bloque GFDM tiene un tiempo de duración, que es la duración del símbolo. La frecuencia de muestreo se establece en muestras por símbolo y muestras por bloque (Matthe et al., 2014).

GFDM emplea un filtro de conformación de pulsos , los datos ya modulados ingresan al filtro de conformación de pulsos de transmisión, seguido por la conversión ascendente luego se añade el prefijo cíclico y la señal es enviada a través del canal, se extrae el CP, seguidamente se realiza la ecualización, luego la conversión descendente y finalmente para ser recuperados los datos ingresa nuevamente a un filtro de conformación de pulsos para la recepción (N Michailow et al., 2011).

GFDM tiene un mejor desempeño con la modulación estándar de amplitud en cuadratura (QAM), que logra una gran afinidad a casi todas las condiciones no ortogonales permitiendo estar libre de interferencia autogenerada, el mapeo QAM también minimiza los problemas de singularidad con la matriz de modulación cuando se emplea un número par de subportadoras y subsímbolos, también ofrece ventajas tales como la baja las emisiones fuera de banda y baja complejidad de la implementación (Gaspar et al., 2015).

Resultados de simulaciones ya realizadas muestran el sistema GFDM con un canal aditivo de ruido gaussiano blanco (AWGN), con dos esquemas de modulación 2QPSK

y 16 QAM utilizando un filtro RRC y sin prefijo cíclico, entre otros parámetros que se indican en (Datta et al., 2012). mediante el cual permite que el rendimiento del BER de GFDM se mejora con la cancelación sucesiva de interferencias (SIC) que es una técnica de la capa física para cancelar la interferencia de las subportadoras consecutivamente (Datta et al., 2012).

GFDM es una solución para la capa PHY 5G porque su flexibilidad puede hacer frente a los diferentes requisitos (Datta et al., 2012) uno en especial la latencia ya que con GFDM es posible diseñar la estructura de tiempo-frecuencia para que coincida con las limitaciones de tiempo para las aplicaciones de baja latencia (Datta et al., 2012).

Para la transmisión de la señal GFDM, la fuente contiene un vector de datos, estos son ingresados a un mapeador QAM siendo el más utilizado en pruebas ya realizadas, ya que tiene la capacidad para transmitir grandes cantidades de información respecto a los métodos de modulación, estos bits se transforman a símbolos, y como resultado se obtiene un bloque de datos con elementos que se pueden descomponer en subportadoras y cada una de ellas en subsímbolos, antes de ingresar al modulador GFDM las subportadoras pasan por filtros de conformación de pulsos y luego se realiza la convolución circular para seguidamente ya ingresar al modulador, finalmente se obtiene la señal lista para transmitir en banda base, pero para transmitir una señal a través de un canal, es necesario cambiar la señal de banda a base a banda pasante (Nicola Michailow et al., 2014).

La señal una vez ya adecuada para ingresar al canal de transmisión, se realiza la ecualización que permitirá que los datos sean recuperados satisfactoriamente, posterior a esto ingresa al demodulador GFDM para esto se utiliza los métodos de recepción que sean convenientes.

Posteriormente la señal con componentes reales y complejas ingresa al decodificador 16-QAM, y se reciben los datos enviados al inicio del sistema de transmisión (Nicola Michailow et al., 2014).

Se debe tomar en cuenta que se cumpla el criterio de Nyquist donde la frecuencia de muestreo sea al menos dos veces la frecuencia de la señal que se transmita (Nicola Michailow et al., 2014).

Finalmente se han realizado las correspondientes pruebas a lo largo de la investigación de esta nueva forma onda, obteniendo así muy buenos resultados.

En (Mobile & Systems, n.d.) implementan el sistema de transmisión GFDM en un rango de frecuencia de 200MHz- 4.4GHz , por lo que se debe tomar en consideración que el rango depende del equipo a implementarse , en este caso utilizaron dos NI PXI (Mobile & Systems, n.d.).

GFDM utiliza mejor el espectro gracias a los filtros RC y RRC por lo tanto, GFDM da mejores resultados en comparación con OFDM. Según los parámetros utilizados en (Hamiti & Sallahu, n.d.). se trabaja con un ancho de banda a partir de 9MHz consiguiendo así la optimización del espectro, mayor ganancia y sobre todo la recuperación de datos al transmitir la señal por un canal con ruido AWGN para diferentes SNR (Signal to noise ratio).

## CAPÍTULO 2

### SISTEMAS MULTIPORTADORA

El hecho de que los usuarios cuenten con la capacidad de comunicarse en cualquier lugar y momento, ha provocado que la seguridad y fiabilidad sea más minuciosa en cuanto se establece una comunicación. Otro factor a tomar en cuenta es la inserción del Internet a las telecomunicaciones, los beneficios de la red se han combinado con los servicios ofrecidos por las telefónicas, bajo este punto de vista la velocidad de transmisión de datos debe ser muy rápida.

Frente a ésta realidad los sistemas multiportadora se han consolidado fuertemente, siendo la base para las comunicaciones inalámbricas, ya que permiten transportar más información, pues los bits se agrupan en símbolos y son transmitidos mediante varias portadoras, a diferencia de un sistema de portadora única. (Discreta, 2007)

El desarrollo continuo de las redes de comunicaciones móviles va ofreciendo a los usuarios experiencias y beneficios cada vez más novedosos. En la Tabla 2. 1 Evolución de las tecnologías de generación. se observa el avance en cuanto a los servicios que ofrecía cada tecnología a medida que cada una aparecía.

Tabla 2. 1 Evolución de las tecnologías de generación.

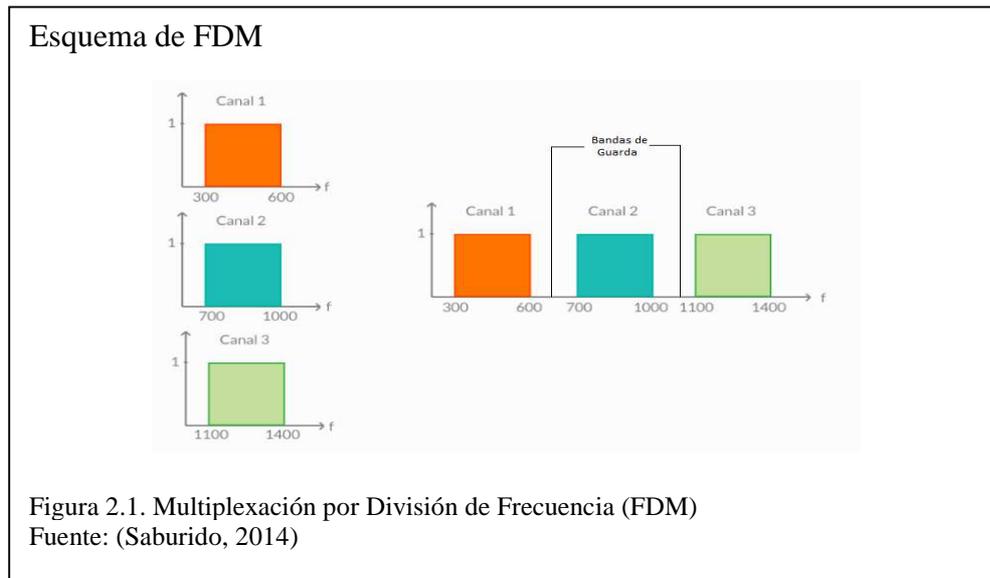
TECNOLOGÍA	SERVICIOS
PRIMERA GENERACIÓN (1G)	Voz analógica
SEGUNDA GENERACIÓN (2G)	Envío y recepción de textos
TERCERA GENERACIÓN (3G)	Banda ancha móvil, música, videos y fotografías
CUARTA GENERACIÓN (4G)	Contenidos en vivo, mayor rapidez, fluidez en grandes cantidades soportando más plataformas, no solo en celulares sino también en tablets y automóviles.

Nota: diferencias de las tecnologías en las telecomunicaciones

Elaborado por: Lisbeth Toscano, Carolina Flores

## 2.1 OFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal)

OFDM se deriva de FDM (Multiplexación por División de Frecuencia), técnica que transmite varios canales uno a continuación del otro separados por un espacio suficiente para que no se interfieran entre sí, dichos espacios se conocen como: bandas de guarda. (Saburido, 2014) La Figura 2.1. Multiplexación por División de Frecuencia (FDM), muestra una ilustración de FDM.



Dado que FDM no ofrecía una eficiencia espectral, se propuso OFDM; modulación con la cual se aprovecharía los espacios de las bandas de guarda, pues cada señal no se interferiría ya que serían ortogonales, es decir perpendiculares entre ellas.

La Figura 2.2. **Diagrama Ortogonalidad entre señales** muestra de manera gráfica la Ortogonalidad entre dos señales.

### Ortogonalidad entre dos señales

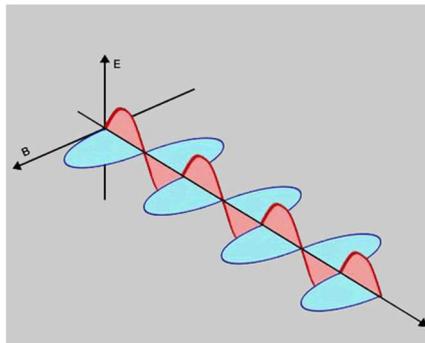


Figura 2.2. Diagrama Ortogonalidad entre señales  
Fuente: (Universidad de Magallanes, 2008)

La Figura 2.3. Comparación entre FDM y OFDM indica el cambio de FDM a OFDM desde el punto de vista de la ubicación de las portadoras, también se observa la diferencia en cuanto a la ocupación del ancho de banda.

### Esquema de FDM y OFDM

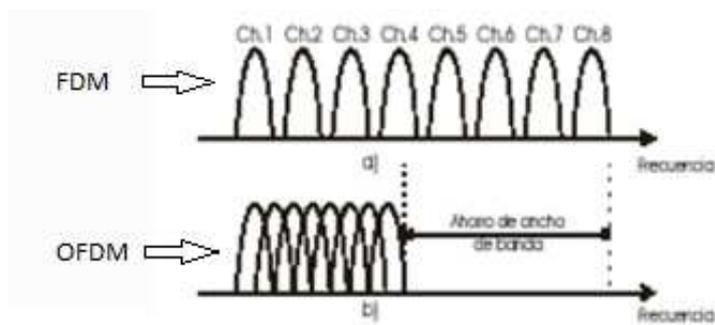
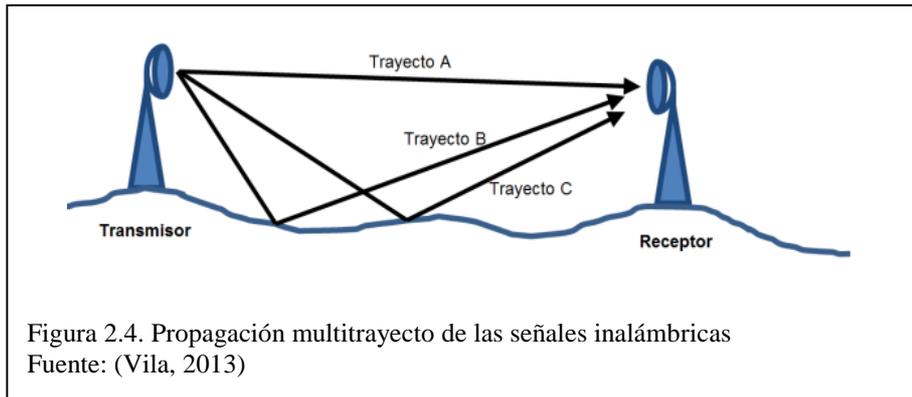
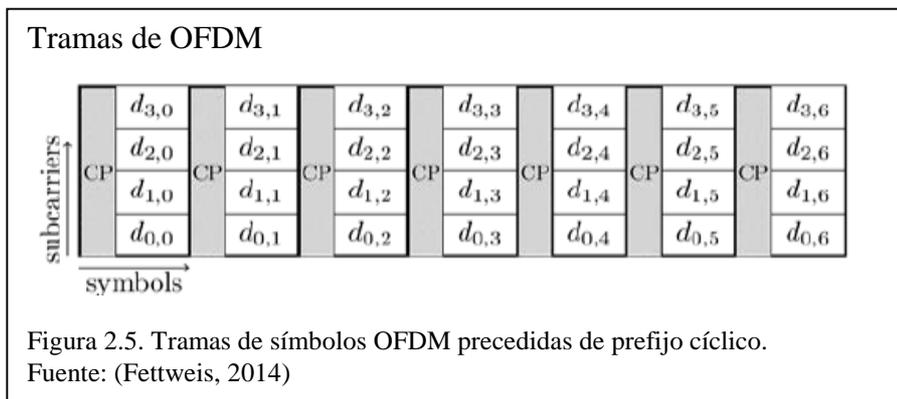


Figura 2.3. Comparación entre FDM y OFDM  
Fuente: (Corredor, Hernández, & Pedraza, 2008)

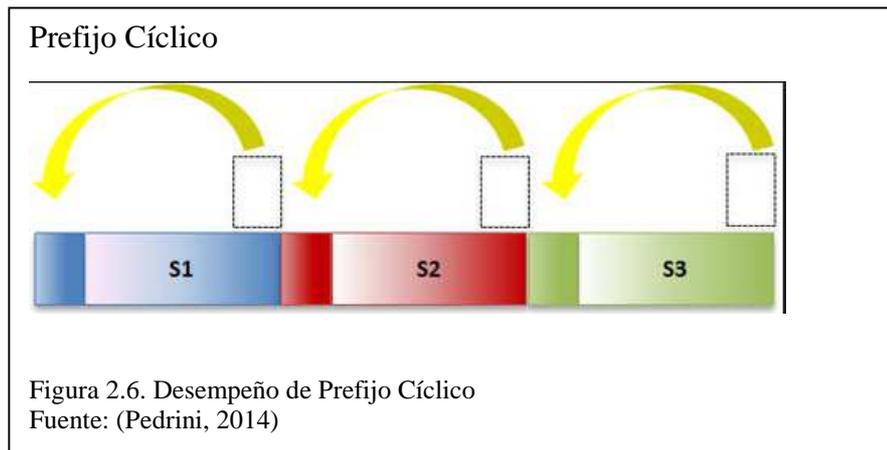
OFDM fue ideada con el objetivo de mitigar la interferencia entre símbolos (ISI), ocasionada por la propagación multitrayecto, de las señales inalámbricas. (Vila, 2013) . Fenómeno mostrado en la Figura 2.4. Propagación multitrayecto de las señales inalámbricas



Para la transmisión de datos mediante OFDM, se realiza mediante tramas conformadas por símbolos de duración muy larga, separados entre sí por un prefijo cíclico (CP), mediante el cual se evita interferencia entre símbolos, tal como se indica en la Figura 2.5. Tramas de símbolos OFDM precedidas de prefijo cíclico.

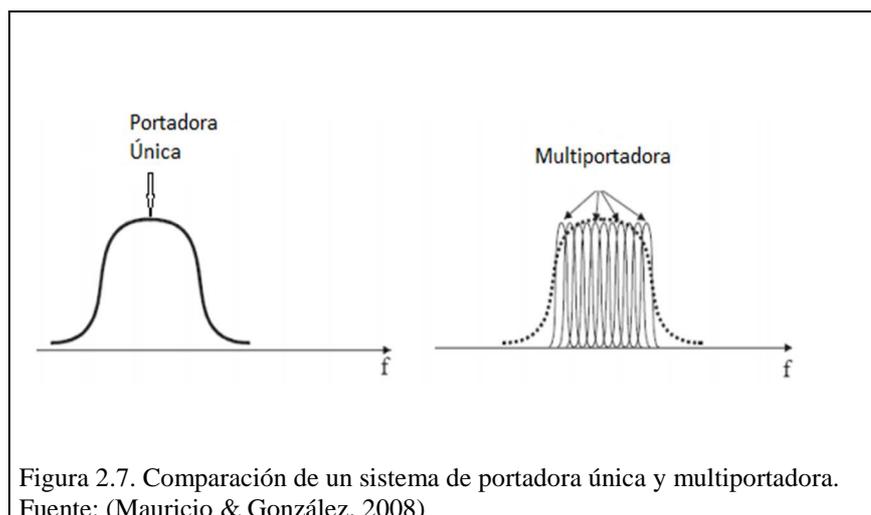


El prefijo cíclico es un tiempo en el cual se transmite una parte final del símbolo al que precede. (Vila, 2013), como se muestra en la Figura 2.6. Desempeño de Prefijo Cíclico.



Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal es un sistema multiportadora utilizado hoy en día por la tecnología 4G, la misma que ofrece una transmisión de símbolos paralela a través de portadoras adyacentes, a diferencia de un sistema de portadora única en donde los símbolos son enviados serialmente. (Mauricio & González, 2008). La

Figura 2.7. Comparación de un sistema de portadora única y multiportadora., indica la diferencia entre un sistema de portadora única y multiportadora.



Para conseguir una eficiencia espectral, las portadoras deben ser ortogonales entre sí; matemáticamente definido en la Ecuación (2.1) así: (Valverde Muñoz, 2010)

$$\int_a^b \Psi_p \Psi_q^*(t) dt = \begin{cases} K & \text{para } p = q \\ 0 & \text{para } p \neq q \end{cases} \quad (2.1)$$

Donde:

\* = conjugado complejo

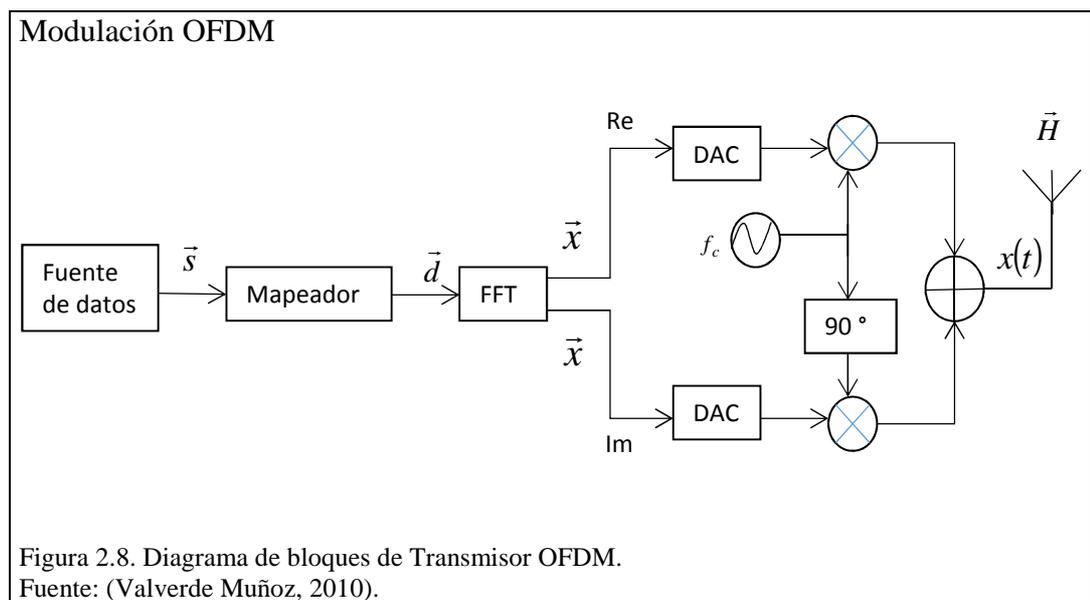
$\Psi_p$  = p-ésimo elemento del conjunto

En las Ecuaciones (2.2) y (2.3), la exponencial compleja describe a una función ortogonal, siendo así la base de la transformada de Fourier: (Valverde Muñoz, 2010)

$$\Psi_k(t) = e^{j\omega_k t} \quad (2.2)$$

Con:

$$\omega_k(t) = \omega_0 + 2\pi \frac{k}{t} \quad (2.3)$$



En la Figura 2.8,  $\vec{s}$  representa los datos a transmitir y  $\mathbf{x}(t)$  se obtiene a partir de  $\mathbf{s}(t)$ . La Ecuación (2.4) descrito matemáticamente a continuación: (Valverde Muñoz, 2010)

$$x(t) = \sqrt{2} \text{Re}\{s(t)e^{j\omega_c t}\} \quad (2.4)$$

En este sistema un conjunto de pulsos son generados mediante un filtro prototipo, el cual se multiplica por un conjunto de  $N$  portadoras distintas: (Valverde Muñoz, 2010). La Ecuación (2.5) detalla el conjunto y sumatoria entre las portadoras.

$$s(t) = \sum_n s^T[n] \phi(t - nT) = \sum_n \sum_{l=0}^{N-1} s_l[n] \phi_l(t - nT) \quad (2.5)$$

Donde  $\phi_l$  viene dado de la siguiente forma: (Valverde Muñoz, 2010), Matemáticamente, como se muestra en la Ecuación (2.6)

$$\phi_l(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} e^{j\frac{2\pi lt}{T}} \cdot w_T(t) \quad (2.6)$$

Donde:

$w_T(t)$  = ventana temporal rectangular con duración  $T$ .

Para evitar la interferencia entre portadoras (ICI) se debe muestrear  $s(t)$  con un periodo de  $\frac{T}{N}$ , dando como resultado: (Valverde Muñoz, 2010), expresado en la Ecuación (2.7)

$$s[m] = \sum_{l=0}^{N-1} s_l[0] \phi_l\left(\frac{mT}{N}\right) = \frac{1}{\sqrt{T}} \sum_{l=0}^{N-1} s_l[0] e^{-j\frac{2\pi lm}{N}}; m = 0, \dots, N - 1 \quad (2.7)$$

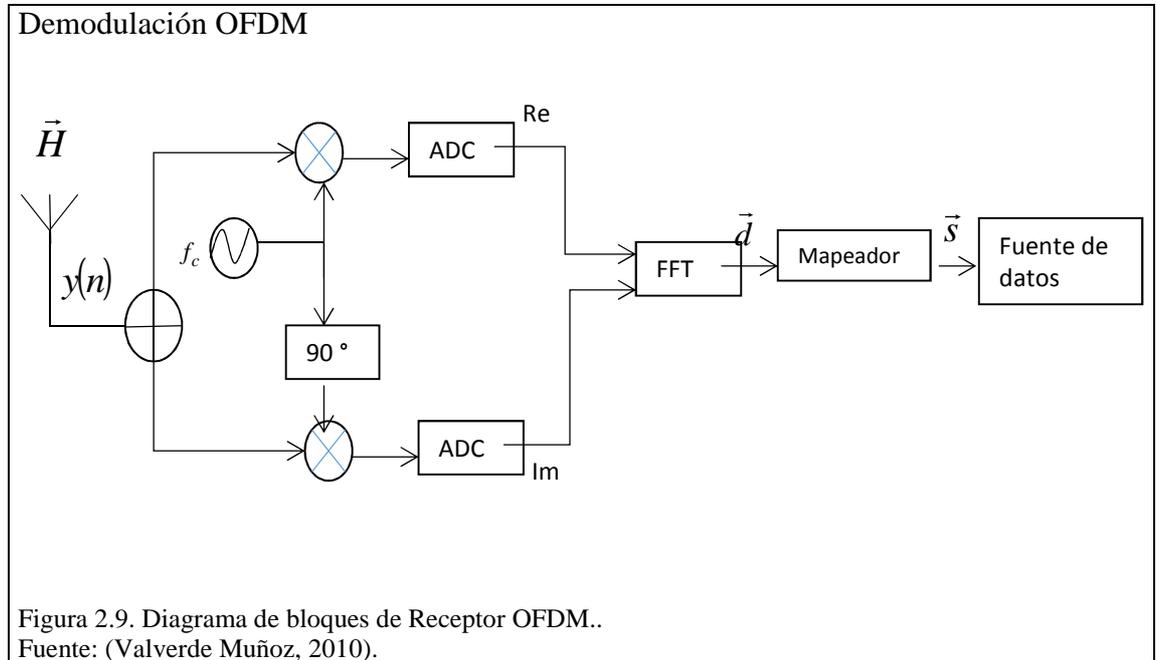
En la Ecuación (2.8), a partir de la DFT inversa, se obtiene la siguiente expresión: (Valverde Muñoz, 2010)

$$DFT_N^{-1} : x[n] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(m) e^{-j\frac{2\pi nm}{N}} \quad (2.8)$$

Entonces la señal discreta a transmitir puede escribirse como: (Valverde Muñoz, 2010), matemáticamente definida en la Ecuación (2.9)

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{j\left(\frac{2\pi n}{N}\right)k} \quad , \quad -(M-1) \leq n \leq N-1 \quad (2.9)$$

Donde  $(M-1)$  = primeras muestras de la extensión cíclica.



La Figura 2.9 muestra el diagrama de bloques para la demodulación en OFDM; es decir luego que la señal atraviese el canal.

La Ecuación (2.10) describe el canal denotado por  $\vec{H}$  , aquí la señal es descrita matemáticamente así:(Desvanecimientos, 2001)

$$H[n, i] = \sum_{l=0}^{N-1} H_l[n] \cdot \delta[i - i_l] \quad (2.10)$$

Donde  $n$  corresponde al tiempo discreto perteneciente a  $t$ , e  $i$  corresponde a  $\tau$ .

La señal recibida  $y(n)$  se la puede entender como el resultado de la convolución de la señal transmitida descrita en la ecuación (2.11), además a ésta también se le adhiere la componente de ruido  $(n_w)$ . (Desvanecimientos, 2001)

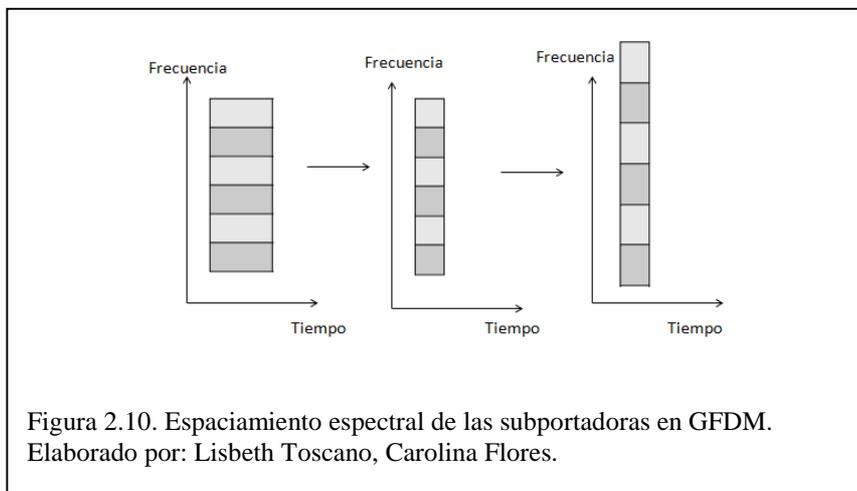
$$y[n] = \sum_{l=0}^{N-1} H_l[n]x[n - 1] + n_w[n] \quad (2.11)$$

Sin embargo la demanda constante de velocidades más altas para la transmisión de datos, el incremento de servicios y aplicaciones para los usuarios en 4G-LTE, ha hecho que OFDM ya no sea sostenible frente a estos requerimientos, por lo cual se propone GFDM como una solución viable para llevar a cabo el desempeño de la tecnología 5G.

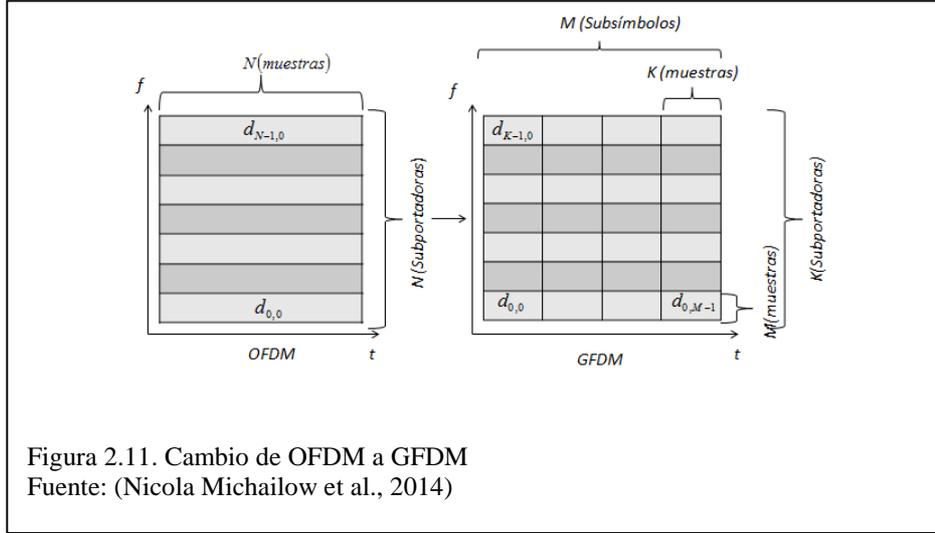
## 2.2 GFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Generalizado)

GFDM es una de las formas de onda de candidatas propuesta, en la investigación de la tecnología 5G. A diferencia de OFDM las subportadoras poseen mayor espaciamiento espectral, esto se logra a partir de reducir su intervalo de tiempo, como muestra la

Figura 2.10. Espaciamiento espectral de las subportadoras en GFDM.



De esta manera para la transmisión de datos e información las subportadoras ya no son ortogonales entre sí, pero al aumentar su espaciamiento en frecuencia se pueden admitir más subportadoras cada una con subsímbolos, obteniendo así mayor eficiencia espectral y flexibilidad a la hora de llevar a cabo su implementación.



Para un eficiente espectro de frecuencias, GFDM adopta la transmisión de múltiples símbolos por múltiples portadoras en un bloque de estructura bidimensional es decir en tiempo y frecuencia, mediante convolución circular cada sub-portadora individual y gracias a los filtros de conformación de impulsos, la señal de transmisión consigue una buena colocación en el dominio de la frecuencia. (Hamiti & Sallahu, 2015).

Como se muestra en la Figura 2.11 el sistema de transmisión GFDM inicia cambiando los datos de entrada se serie a paralelo, los cuales son codificados mediante un mapeador teniendo a su salida  $\vec{d}$ , matemáticamente descrito en la Ecuación (2.12): (Nicola Michailow et al., 2014)

$$\vec{d} = (\vec{d}_0^T, \dots, \vec{d}_{M-1}^T)^T \quad (2.12)$$

La Ecuación (2.13) muestra la misma estructura que la Ecuación (2.12), pero tomando en cuenta las subportadoras: (Nicola Michailow et al., 2014)

$$\vec{d}_m = (d_{0,m}, \dots, d_{K-1,m})^T \quad (2.13)$$

De tal manera que  $d_{k,m}$  corresponde al total de datos a transmitir, por cada  $k$ -ésima subportadora y  $m$ -ésimo subsímbolos. Luego estos datos son enviados al modulador GFDM donde son sometidos a un filtro por conformación de pulsos  $g[n]$ : (Nicola Michailow et al., 2014)

$$g_{k,m}[n] = [(n - mK) \bmod N] \cdot e^{-j2\pi\frac{k}{K}n} \quad (2.14)$$

En la Ecuación (2.14), Cada  $g_{k,m}$  son los datos ya filtrados y están en tiempo y frecuencia desplazados. La operación módulo realiza un desplazamiento circular, y la componente exponencial lleva a cabo el desplazamiento en el dominio de la frecuencia.

En la Ecuación (2.15) se describe la señal discreta a transmitir obtenida mediante la superposición de todos los símbolos a transmitir: (Nicola Michailow et al., 2014)

$$x[n] = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} g_{k,m}[n] d_{k,m} , \quad n = 0, \dots, N - 1 \quad (2.15)$$

Agrupando todas la muestras filtradas en :  $\vec{g}_{k,m} = (\vec{g}_{k,m}[n])^T$ , la ecuación (2.15) se muestra una forma abreviada en la Ecuación (2.16): (Nicola Michailow et al., 2014)

$$\vec{x} = A\vec{d} \quad (2.16)$$

Donde A corresponde a una matriz de dimensiones  $KM \times KM$ , estructurada de acuerdo a la Ecuación (2.17): (Nicola Michailow et al., 2014)

$$A = \vec{g}_{0,0} \quad \dots \quad \vec{g}_{K-1,0} \quad \vec{g}_{0,1} \quad \dots \quad \vec{g}_{K-1,M-1} \quad (2.17)$$

$\vec{x}$  contiene las muestras a ser transmitidas, es decir las correspondientes al bloque de datos GFDM.

Al realizar la transmisión a través del canal se obtiene el modelamiento matemático. La Ecuación (2.18), describe la señal después de atravesar el canal: (Nicola Michailow et al., 2014)

$$\vec{y} = \tilde{H}\vec{x} + \vec{\omega} \quad (2.18)$$

Donde:

$\vec{y}$  = Parte de  $\vec{x}$  recibida y  $\tilde{H}$  es la matriz del canal modelo.

$\vec{\omega}$  = Componente de ruido Gaussiano.

Asumiendo una sincronización perfecta la Ecuación (2.18), puede reescribirse en la Ecuación (2.19): (Nicola Michailow et al., 2014),

$$\vec{y} = H\vec{x} + \vec{\omega} \quad (2.19)$$

Las Ecuaciones (2.20) y (2.21), describe la aplicación del proceso de ecualización: (Nicola Michailow et al., 2014)

$$\vec{y} = HA\vec{d} + \vec{\omega} \quad (2.20)$$

$$\vec{z} = H^{-1}HA\vec{d} + H^{-1}\vec{\omega} = A\vec{d}\vec{\omega} \quad (2.21)$$

Después de la señal ecualizada  $\vec{z}$  se aplica la demodulación, obteniendo la Ecuación (2.22): (Nicola Michailow et al., 2014)

$$\vec{d} = B\vec{z} \quad (2.22)$$

Donde B corresponde a la matriz de recepción con dimensiones  $KM \times KM$ .

Muchas maneras estandarizadas pueden ser aplicadas al momento de la demodulación GFDM, el filtro MF (matched filter) es una de ellas descrito en la Ecuación (2.23), el cual maximiza la relación señal a ruido (SNR): (Nicola Michailow et al., 2014)

$$B_{MF} = A^H \quad (2.23)$$

Sin embargo éste método incrementa la interferencia entre portadoras (ICI), ya que éstas son no-ortogonales.

La recepción por cero - forzado (ZF) también puede ser aplicada para la demodulación GFDM mostrada en la Ecuación (2.24), éste método disminuye en gran proporción la interferencia entre portadoras a medida que el ruido mejora. (Nicola Michailow et al., 2014)

$$B_{ZF} = A^{-1} \quad (2.24)$$

La Ecuación (2.25), describe la recepción MMSE (mínimum mean square error) aplica una compensación entre la interferencia de portadoras y el mejoramiento de ruido: (Nicola Michailow et al., 2014)

$$B_{MMSE} = (R_{\omega}^2 + A^H H^H H A)^{-1} A^H H^H \quad (2.25)$$

Una vez aplicado la demodulación GFDM a la señal, la Ecuación (2.26) muestra la señal decodificada: (Nicola Michailow et al., 2014)

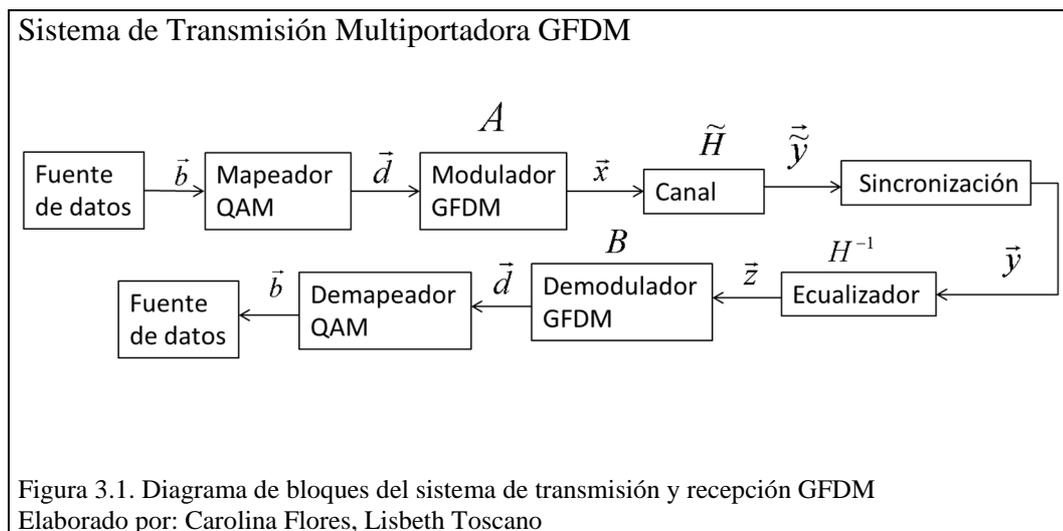
$$\vec{\hat{d}} = B \vec{y} \quad (2.26)$$

De ésta manera nuevamente se reciben los datos enviados a un inicio representados por  $\vec{b}$ .

## CAPÍTULO 3

### ARQUITECTURA Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DIGITAL GFDM

En este capítulo se hará una explicación más específica de cada componente o bloque correspondiente al sistema GFDM tanto para la transmisión como para la recepción.

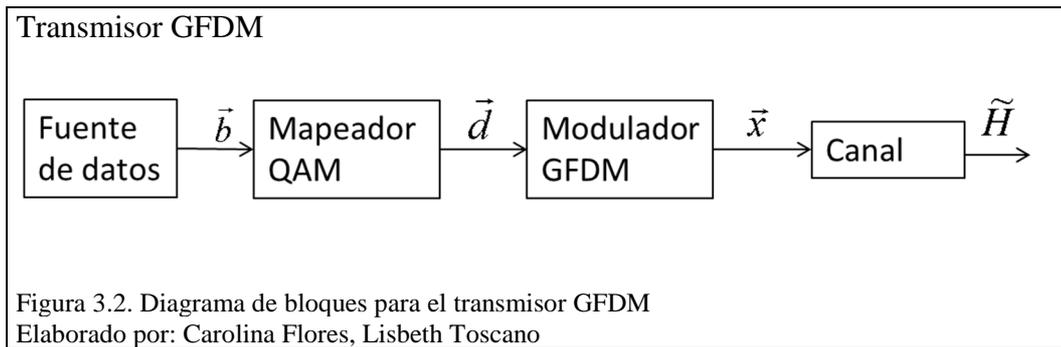


En la Figura 3.1, se muestra el diagrama de bloques tanto para la transmisión como para la recepción de GFDM, cada bloque desempeña distintas funciones las cuales son descritas en los subcapítulos 3.1, 3.2 y 3.3.

En cada etapa se realiza una simulación, desde la generación de los datos, modulaciones, aplicación de filtros, sincronización, ecualización y demodulación.

#### 3.1 Transmisor GFDM

A continuación se detalla el proceso correspondiente para realizar la etapa de transmisión del Sistema de GFDM.



Considerando el diagrama de bloques representado en la Figura 3.2. Se muestra:

La fuente proporciona un vector de datos aleatorios denotado como  $\vec{b}$ . Luego estos datos son ingresados a un mapeador, en este caso QAM, aquí se toma los bits y los cambia a símbolos de una constelación compleja  $2^\mu$ , donde  $\mu$  es el orden de modulación, en este sistema  $\mu$  es igual a 4, de este modo se tiene una codificación de 16 - QAM. El vector resultante  $\vec{d}$  denota un bloque de datos que contiene N elementos, que se puede descomponer en subportadoras K cada una de ellas con subsímbolos M. (Michailow, Gaspar, Krone, Lentmaier, & Fettweis, 2014)

A la salida del mapeador QAM se tiene datos complejos, correspondiente a  $d(k, m)$ , previo a la entrada del bloque modulador GFDM. Cada subportadora pasa por filtros de formación de pulsos  $g_{Tx(n)}$  y es modulada con una frecuencia central de subportadora. (Nicola Michailow et al., 2014)

Además para que se cumpla el criterio de Nyquist que indica que la frecuencia de muestreo debe ser al menos dos veces la frecuencia de la señal a transmitir, cada símbolo es muestreado N veces, teniendo como resultado MN muestras por subportadora, luego se realiza una convolución circular para posteriormente someterse a un modulador en cuadratura, y así la señal se encuentre lista para transmitirse por el canal. (Hamiti & Sallahu, n.d.)

### 3.1.1. Simulación del Transmisor

Aquí se muestra el desarrollo del programa utilizado para la simulación del transmisor, al inicio es importante recalcar las variables necesarias para continuar con el adecuado desarrollo del programa, si no se llegase a cumplir con los valores correctos, no se realizará la simulación.

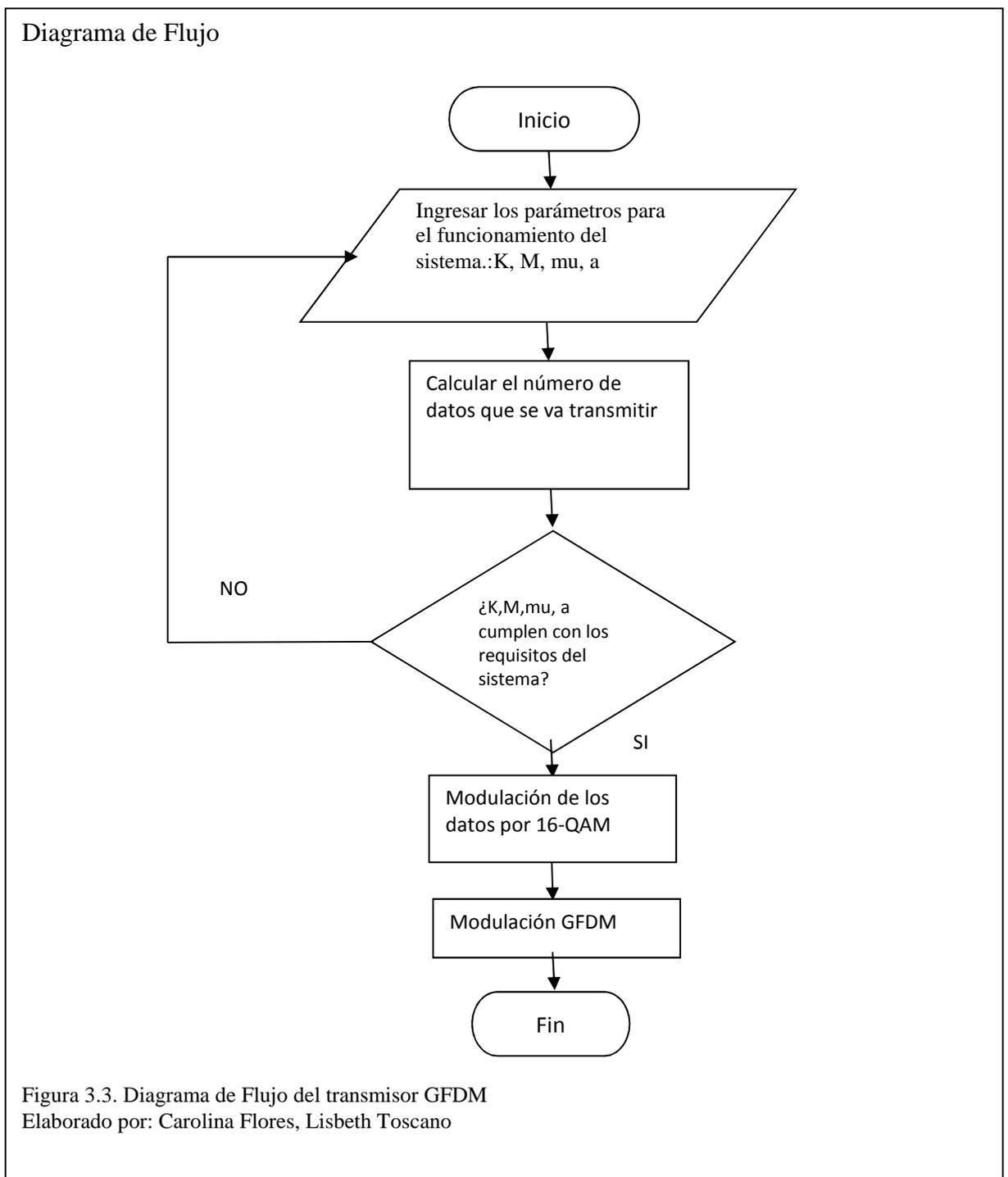


Figura 3.3. Diagrama de Flujo del transmisor GFDM  
Elaborado por: Carolina Flores, Lisbeth Toscano

En la Figura 3.3 se muestra el diagrama de flujo con el proceso basado en el código aplicado en la simulación realizada en Matlab para la parte de transmisión.

Las variables que deben ser ingresadas al inicio deben cumplir con lo siguiente:

K: es el número de subportadoras, no se debe ingresar un valor inferior a 64.

M: es el número de subsímbolos, no se debe ingresar un valor inferior a 7.

a: es el factor de roll-off, este valor oscila entre 0.1 y 1.

mu: es el orden de modulación QAM, de la siguiente manera:

para 4-QAM; mu debe tener un valor =2.

para 16-QAM; mu debe tener un valor =4.

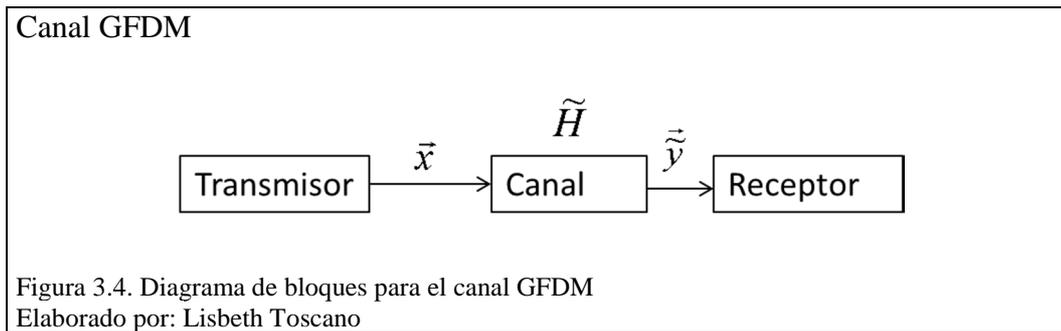
para 64-QAM; mu debe tener un valor =6.

GFDM, para conseguir un número total de datos, se calcula una matriz equivalente a  $K \times M$ , para posteriormente ingresar al bloque de modulación GFDM, donde se aplica filtros rectangulares por conformación de pulsos, y finalmente se obtiene la señal a transmitir en banda base.

Cuando se desea transmitir una señal a través de un canal o medio de transmisión, es necesario cambiar la señal de banda a base a banda pasante, esto se logra aplicando un modulador de cuadratura, que sube en frecuencia a la señal y luego se realiza la transmisión.

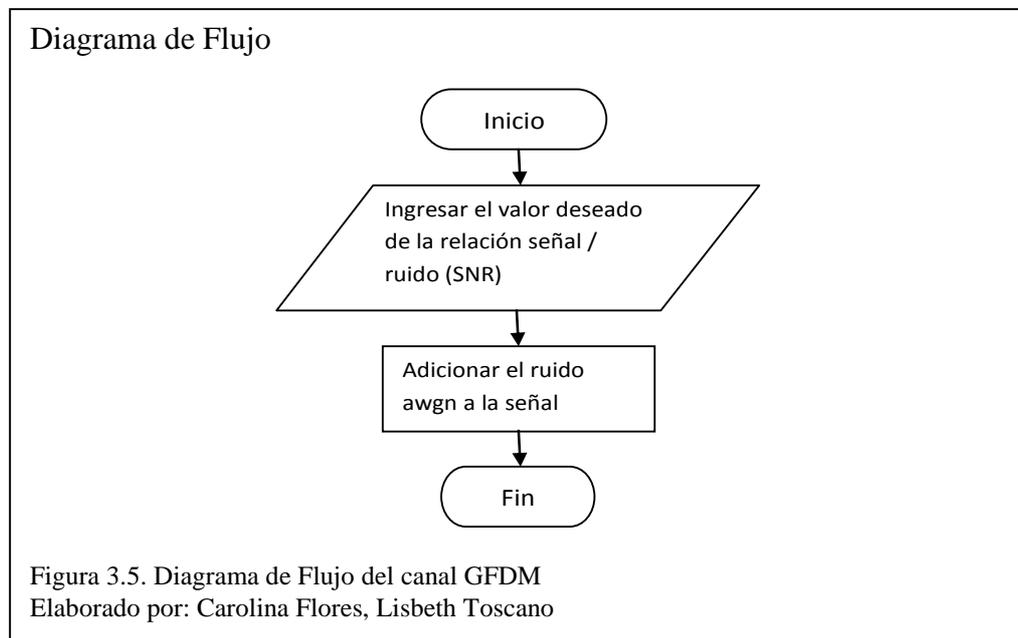
### **3.2 Canal GFDM**

Para esta etapa se adiciona ruido (awgn) a la señal a transmitir, únicamente para hacer el análisis cuando no existe ruido y cuando si lo hay.



De acuerdo al diagrama de bloques en la referencia, el canal de transmisión  $\tilde{H}$  es modelado para el sistema de tal manera que mediante una estructura matricial se realiza una convolución basada en una respuesta de impulso, además aquí también se adiciona la componente de ruido Gaussiano. (Nicola Michailow et al., 2014)

### 3.2.1 Simulación – Canal GFDM

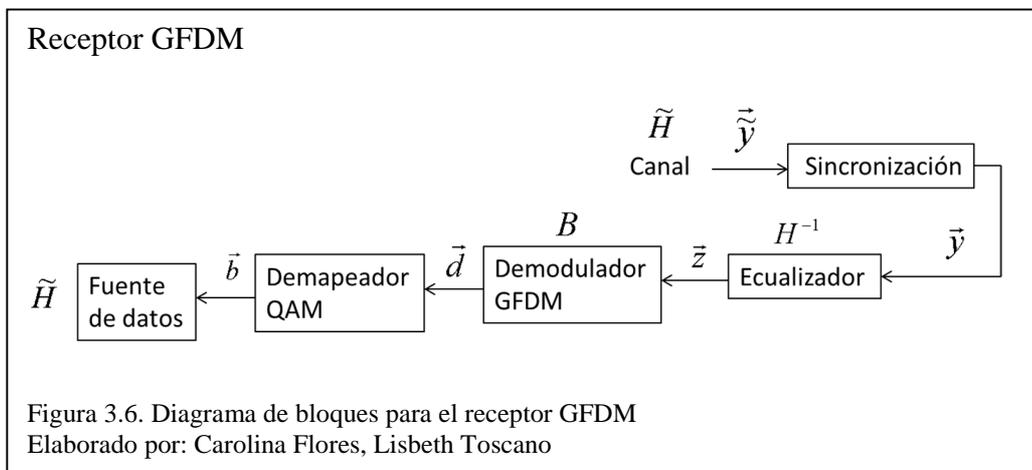


La Figura 3.5 muestra cómo se adiciona ruido a la señal de transmisión, en este caso se aplica ruido blanco debido a que así se consiguen valores constantes en todas las

frecuencias. Mediante un comando propio de Matlab se consigue adicionar ruido a la señal.

### 3.3 Receptor GFDM

A continuación se muestra el diagrama de bloques únicamente para el receptor de GFDM, los datos en este punto son los recuperados desde el Real Time Oscilloscope, para luego aplicar cada uno de los bloques descritos en la Figura 3.6 , aplicando la herramienta de simulación Matlab 2013.



Considerando el diagrama de bloques representado en la Figura 3.6 Al pasar la señal por el canal de transmisión, es necesaria establecer una sincronización tanto en el dominio de tiempo así como también en el dominio de la frecuencia, al considerar que se tiene una sincronización perfecta, la señal  $\tilde{y}$  es sometida a una ecualización; para lo cual se debe realizar una caracterización del canal  $H^{-1}$  , este paso ayudará a recuperar los datos enviados en su respectivo orden. Posterior a la ecualización la señal

$\tilde{z}$  ingresa al demodulador GFDM, en este caso se aplica el método de recepción por cero forzado (Zero Forcing - ZF), el mismo que minimiza la interferencia entre portadoras a medida que el ruido mejora notablemente. Finalmente la señal con componentes reales y complejas ingresan al decodificador 16-QAM, y así se recibe los datos enviados al inicio del sistema de transmisión.(Nicola Michailow et al., 2014)

### **3.3.1 Simulación – Receptor GFDM**

### Diagrama de Flujo



Figura 3.7. Diagrama de Flujo del transmisor GFDM  
Elaborado por: Carolina Flores, Lisbeth Toscano

En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de flujo con el proceso basado en el código aplicado en la simulación realizada en Matlab para la parte de recepción.

Primero toma la señal recuperada de los equipos experimentales la misma que se guarda en un documento de texto (.txt), se carga ese archivo en Matlab y se procede a realizar la recuperación de la señal enviada al inicio de la transmisión.

Una vez cargado el archivo recuperado del equipo, se realiza la sincronización para lo cual se genera una PRBS, estos bits de sincronización pueden ser de 128 en adelante de acuerdo a la cantidad de datos que se envían.

Para la ecualización del sistema, es necesario obtener la caracterización del canal, donde se relaciona la señal de salida con la señal de entrada. Aquí ya la trama de datos recibida debe coincidir con el mismo tamaño de tramas transmitidas.

Una vez realizada la ecualización, las tramas de datos ingresan al bloque de demodulación GFDM, aquí se estructura nuevamente la matriz definida por  $K \times M$ , y también se aplica el método de recepción por cero forzado, el cuál mejora la interferencia entre portadoras.

Posterior al bloque de demodulación GFDM, se procede a la demodulación 16-QAM, para finalmente obtener los bits enviados al inicio de la transmisión.

## **CAPÍTULO 4**

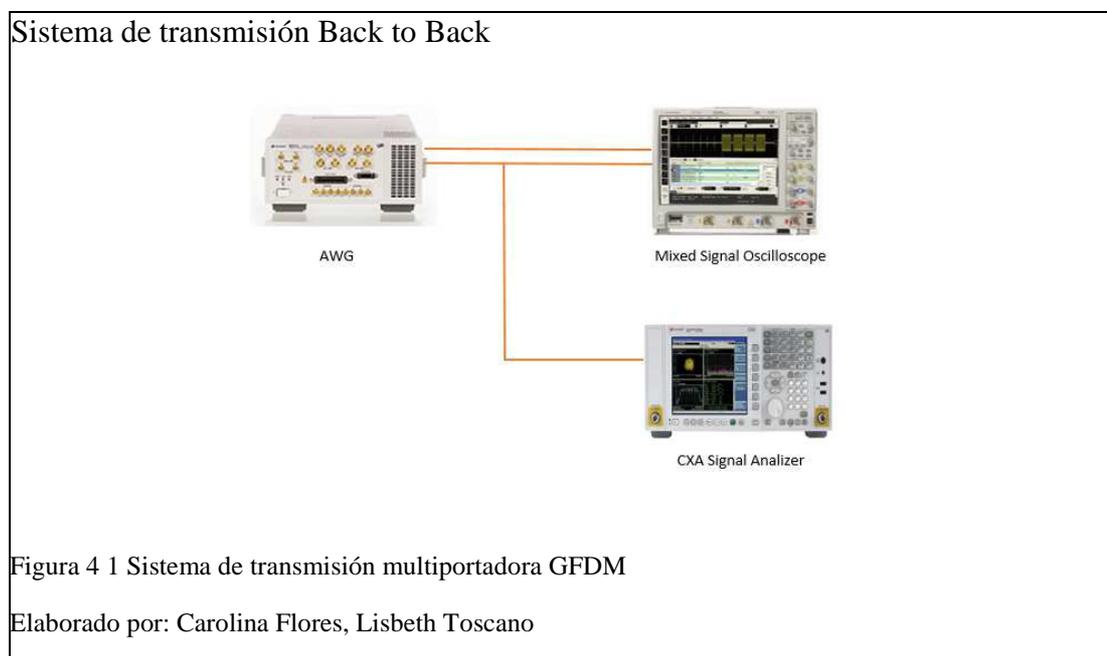
### **IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE TRANSMISION DIGITAL GFDM**

Este capítulo se muestra la implementación del sistema de transmisión GFDM, mediante un sistema Off-Line (fuera de línea) donde los datos son recibidos por otro dispositivo externo para luego ser procesados y observar los resultados.

Los equipos necesarios a utilizarse para la implementación del sistema fueron:

1. Agilent N8241A Arbitrary Waveform Generators
2. Agilent Technologies Mixed Signal Oscilloscope MSO9254A
3. Agilent Technologies CXA Signal Analyzer N9000A

En la figura 4.1 se muestra el esquema des Sistema de transmisión back to back.



En la figura 4.2 se muestra el sistema implementado

## Sistema de transmisión implementado Back to Back

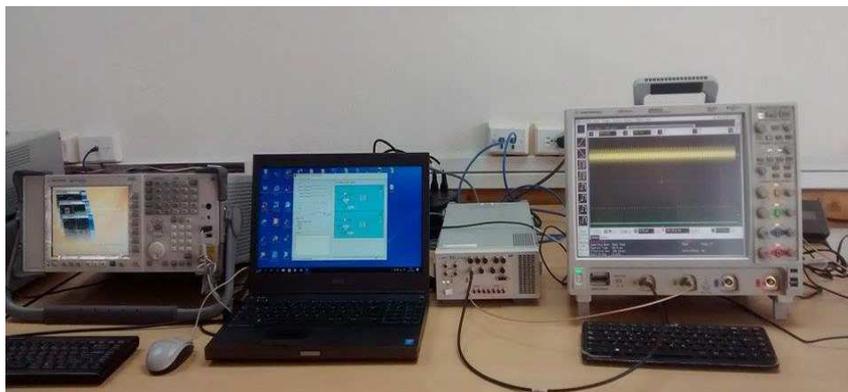


Figura 4 2 Sistema de transmisión multiportadora GFDM implementado

Elaborado por: Carolina Flores, Lisbeth Toscano

### 4.1 Transmisión

Se implementó una señal GFDM simulada en MATLAB, y creada en archivo.bin para luego cargarla en el Software N8241A Control Utility que se conecta con el AWGN, el medio de transmisión es el cable coaxial que trabaja a una velocidad de 3,908ns y 15443 A. Esta señal es enviada al generador de señales que es el encargado de generar una forma de onda ideal realizando un procesamiento digital y que se ajuste a todos los parámetros.

La señal GFDM tiene como características las siguientes:

Tabla 4. 1 Parámetros de la señal GFDM

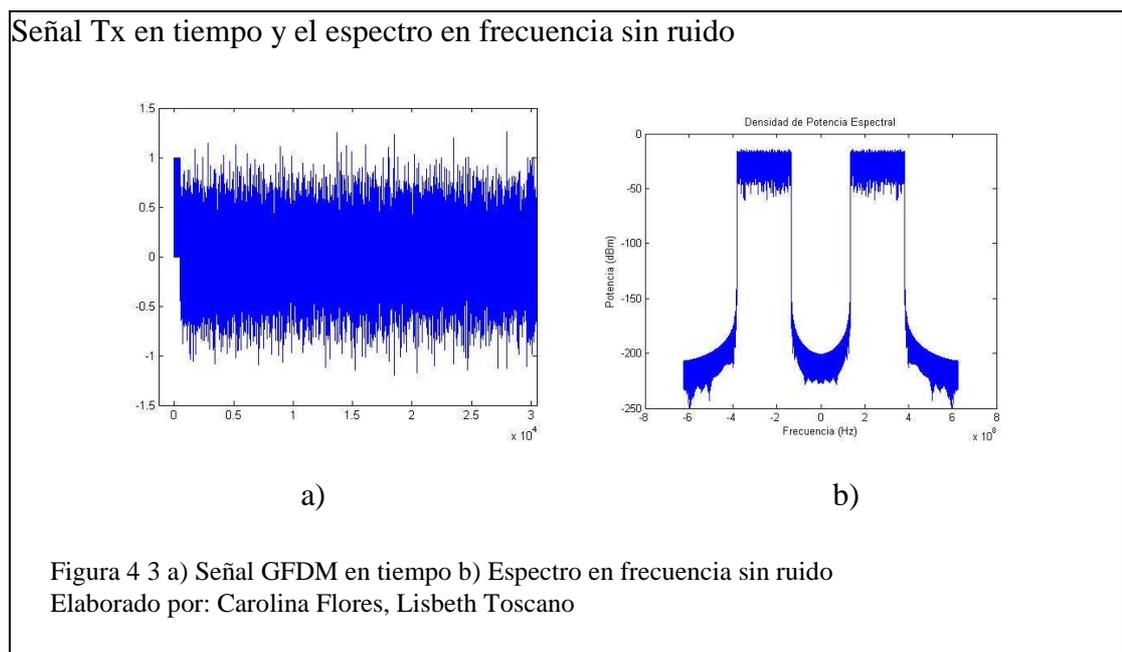
PARÁMETROS	GFDM
ANCHO DE BANDA	250MHz
NÚMERO DE SUBPORTADORAS	512
NÚMERO DE SUBSÍMBOLOS	100
FRECUENCIA DE MUESTREO	1.25 GHz
FRECUENCIA DE PORTADORA	250MHZ
FACTOR ROLL-OFF	0.1

Los parámetros de los rangos de las frecuencias (frecuencia central y de muestreo) que se utilizaron para las pruebas, y para la simulación se partió del sistema de transmisión probado en (Mobile & Systems, n.d.).

A continuación, se muestra la señal simulada en Matlab para tres casos específicos: sin ruido y con valores de 18 dB y 30 dB SNR donde se obtuvo lo siguiente:

La figura 4.2 muestra la señal en tiempo y el espectro de frecuencia sin ruido que se usó para generar en el AWG la señal GFDM, como se observa el ancho de banda es de 250 MHz y la frecuencia de la portadora es de 250 MHz

La señal de tiempo que es generada, se observa que al inicio de la señal se tiene una PRBS de 256 bits que permite sincronizar la señal para poder ser transmitida, posteriormente el espectro de la señal que ya está subida en frecuencia.

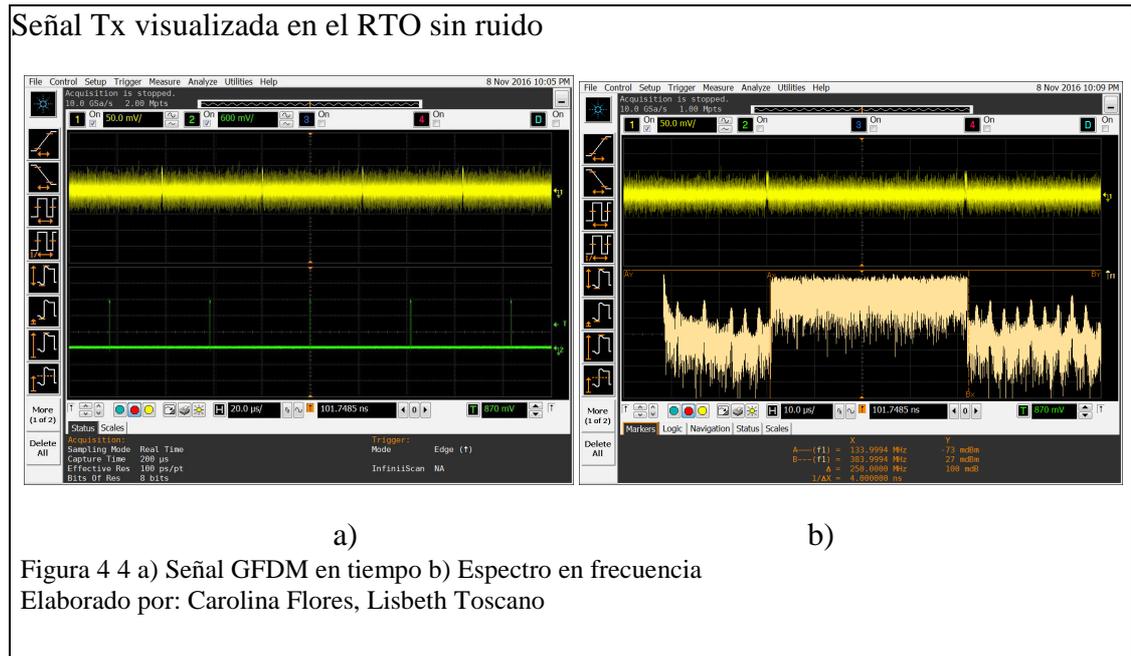


En la figura 4.3 se observa la señal GFDM enviada por el AWG y capturada en el RTO, que permite visualizar la señal en tiempo y su espectro de frecuencia.

En la figura 4.3 a) se observa la señal en tiempo con la diferencia que en el equipo esta señal se va repitiendo, es decir muestra varias tramas de la información que es enviada,

y por consiguiente se utilizan los markers para lograr saber dónde inicia y termina la señal.

En la figura 4.3 b) muestra el espectro de la señal sin ruido con los parámetros que fue enviada la señal, con frecuencia de portadora de 250 MHz y el ancho de banda de la señal de 250 MHz



En la Figura 4.4 se muestra la señal enviada al CXA que se puede visualizar el espectro de la señal sin ruido con parámetros como un ancho de banda de 250 MHz y la potencia aproximadamente en un valor de -40 dB que se encuentra dentro de los valores que la señal ya ha sido probada con resultados óptimos para trabajar.

Señal Tx visualizada en el CXA sin ruido

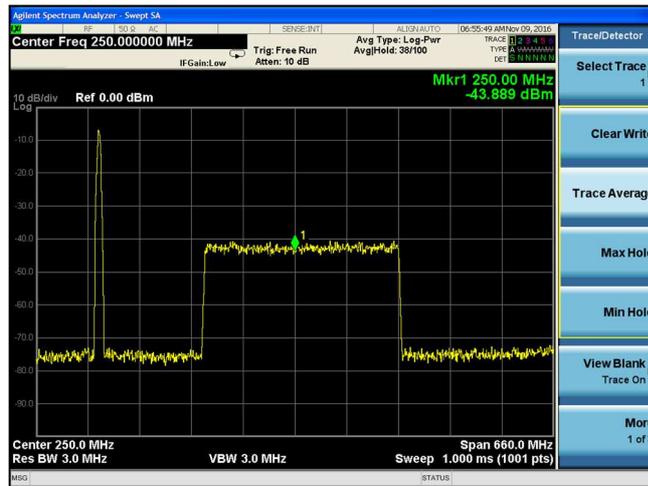


Figura 4 5 Espectro en frecuencia sin ruido

Elaborado por: Carolina Flores, Lisbeth Toscano

En la Figura 4.5 se muestra la señal GFDM sin ruido que fue transmitida, la misma fue tratada en Matlab para su tratamiento digital.

Señal Rx en tiempo y el espectro en frecuencia recuperada sin ruido

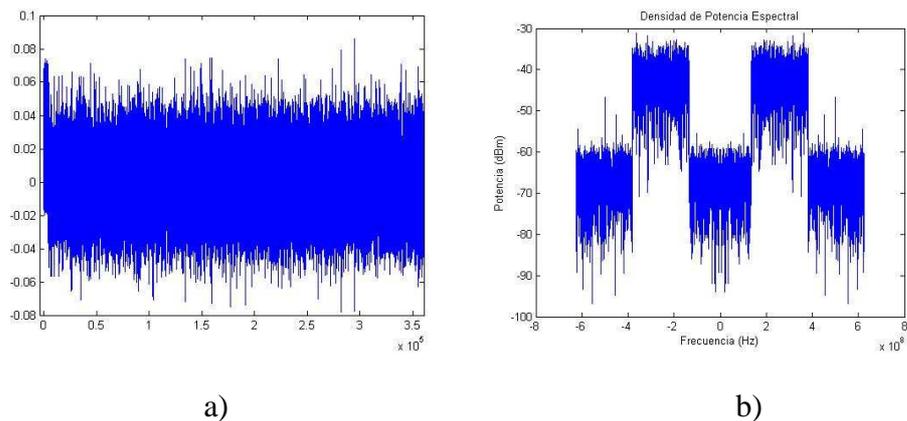
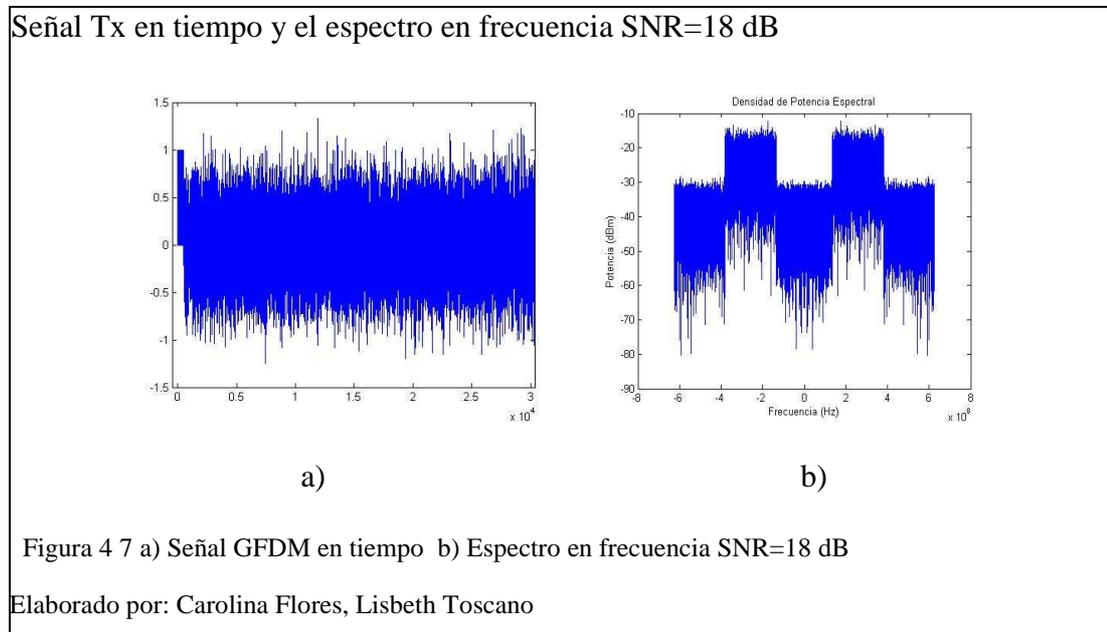


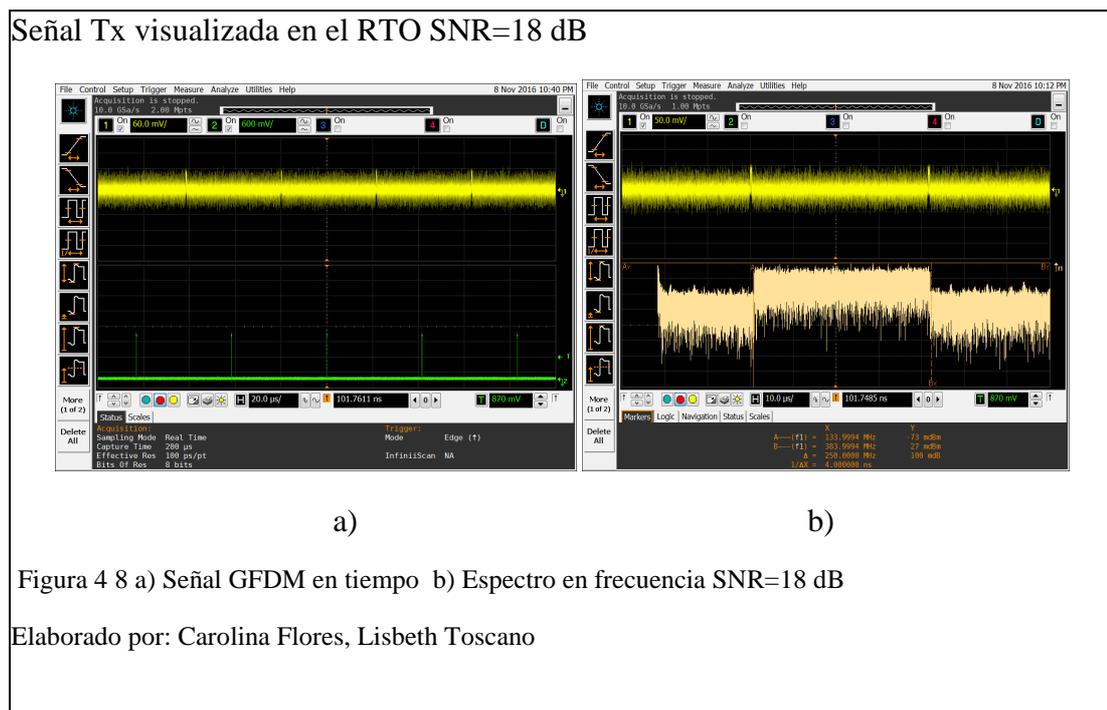
Figura 4 6 a) Señal GFDM en tiempo b) Espectro en frecuencia sin ruido

Elaborado por: Carolina Flores, Lisbeth Toscano

En la Figura 4.6 Se muestra la señal que se envía en tiempo y el espectro en frecuencia con un SNR=18 dB, es decir al canal se añade ruido, como se muestra la señal esta distorsionada.



En la figura 4.7 se muestra la señal en tiempo y el espectro de la señal con un SNR =18 dB que se está transmitiendo.



En la Figura 4.8 se observa el espectro de la señal transmitida con SNR=18, el ancho de banda de 250 MHz y la potencia de -40 dB.

En la Figura 4.9 se observa la señal recuperada en tiempo y el espectro en frecuencia con un SNR de 18 dB, a diferencia de la señal que es transmitida se logra recuperar los datos sin embargo se tiene distorsionada más aun la señal ya que atraviesa el canal con ruido.

Señal Tx visualizada en el CXA SNR=18 dB

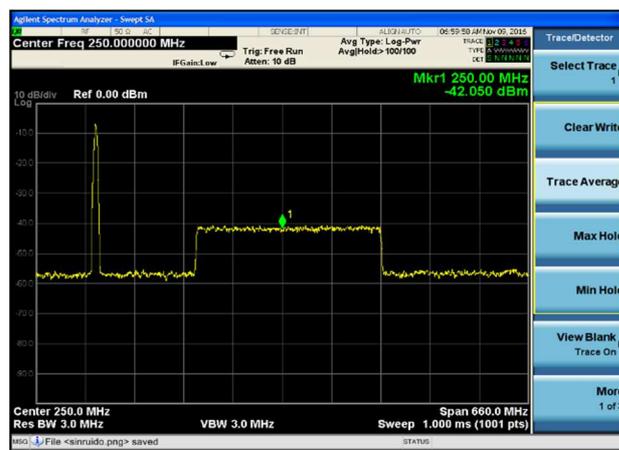


Figura 4 9 Espectro en frecuencia enviado al CXA SNR=18 dB  
Elaborado por: Carolina Flores, Lisbeth Toscano

Señal Rx en tiempo y el espectro en frecuencia recuperada SNR=18 dB

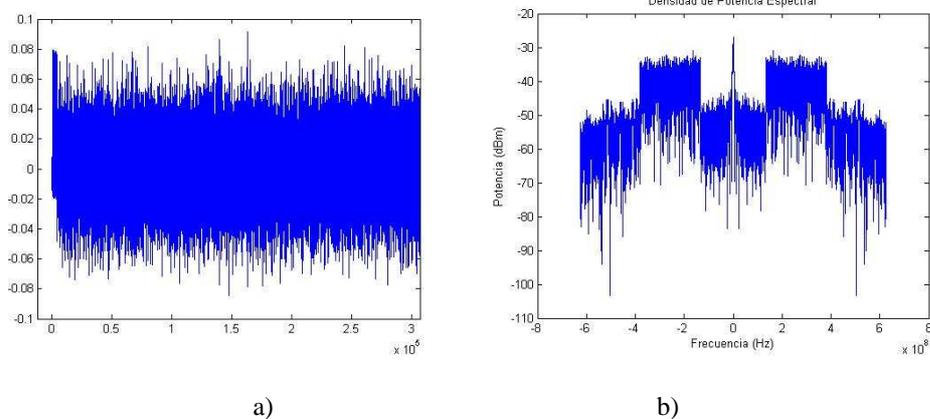
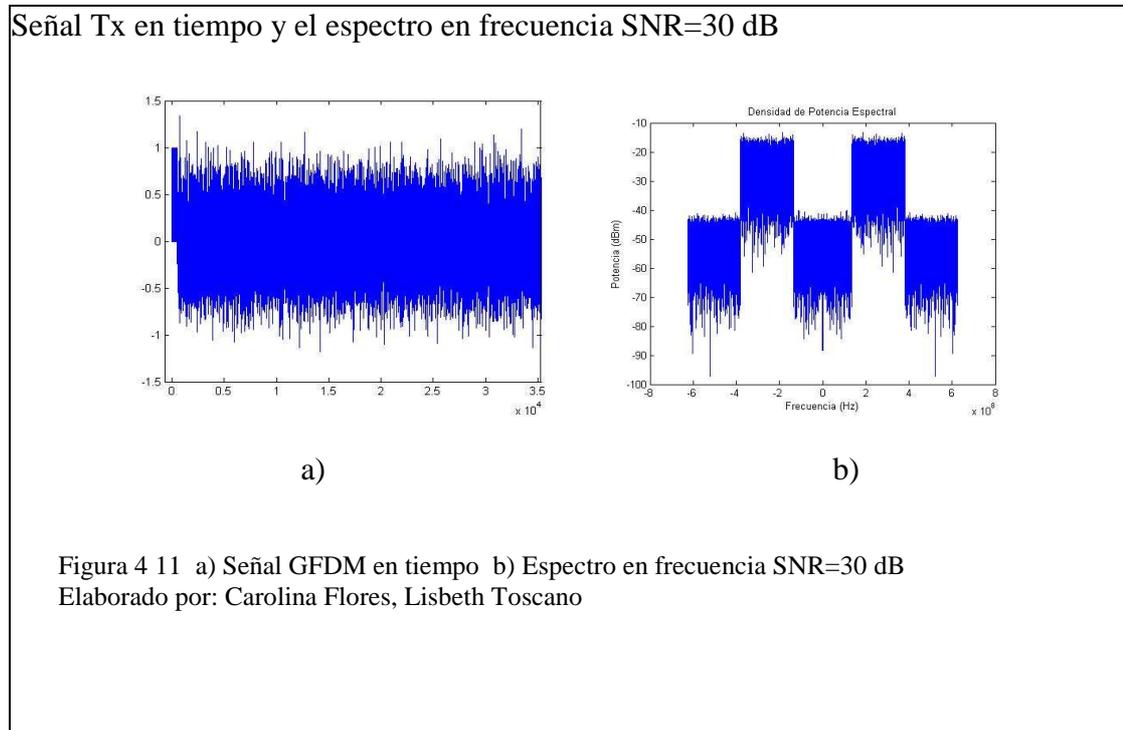


Figura 4 10 a) Señal GFDM en tiempo b) Espectro en frecuencia SNR=18 dB  
Elaborado por: Carolina Flores, Lisbeth Toscano

En la figura 4.10 se muestra la señal en tiempo y frecuencia con SNR=30 dB, se observa que el espectro en frecuencia es similar al espectro de la señal enviada sin ruido, deduciendo que la señal es recuperada satisfactoriamente, siendo resultado de la ecualización y el método de recepción.



En la Figura 4.11 se muestra la señal en tiempo y el espectro en frecuencia que se transmite en el RTO observando que el espectro de la señal es semejante al espectro visualizado en el RTO de la señal transmitida sin ruido, de la misma manera midiendo con los markers el ancho de banda de la señal y la frecuencia de portadora coincide con los parámetros enviados.

## Señal Tx visualizada en el RTO SNR=30 dB



a)

b)

Figura 4.12 a) Señal GFDM en tiempo b) Espectro en frecuencia SNR=30dB  
Elaborado por: Carolina Flores, Lisbeth Toscano

En la Figura 4.12 se muestra la señal enviada al CXA muestra el espectro de la señal con un ancho de banda de 250 MHz y la potencia aproximadamente de -40 dB.

### Señal Tx visualizada en el CXA SNR=30 dB

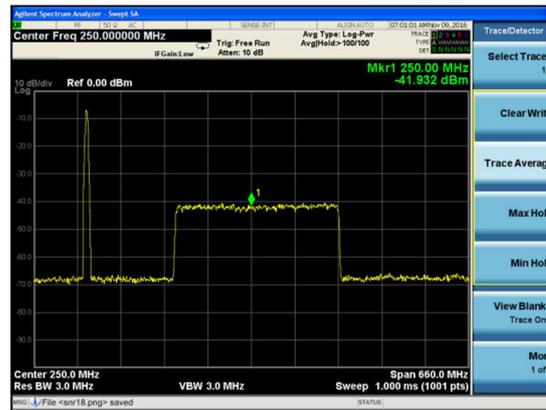


Figura 4 13 Espectro de frecuencia enviado al CXA SNR=30 dB

Elaborado por: Carolina Flores, Lisbeth Toscano

En la Figura 4.13 se muestra la señal recuperada en tiempo y el espectro de la señal con SNR =30 dB es recuperada satisfactoriamente con todos los datos enviados.

### Señal Rx en tiempo y el espectro en frecuencia SNR=30 dB

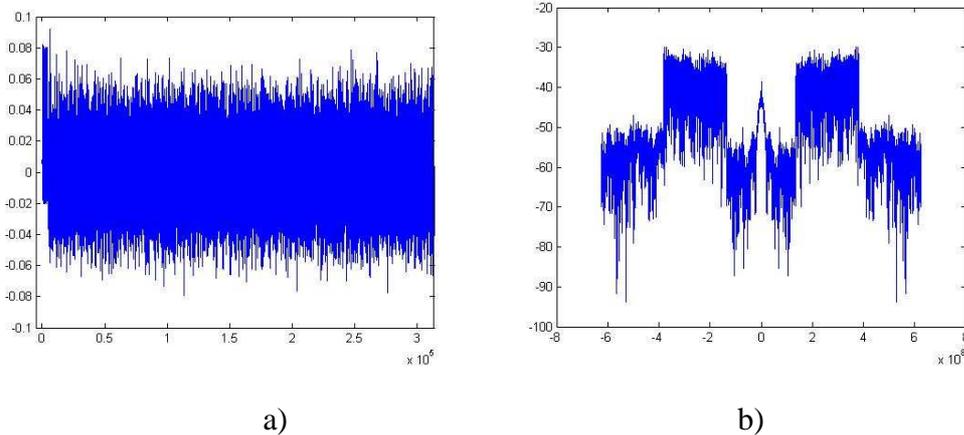


Figura 4 14 a) Señal GFDM en tiempo b) Espectro en frecuencia SNR=30 dB  
Elaborado por: Carolina Flores, Lisbeth Toscano

La transmisión y recepción de la señal es recuperada satisfactoriamente como se observa en la figura 4.13 en el valor de SNR = 30 dB , que a comparación de la Figura

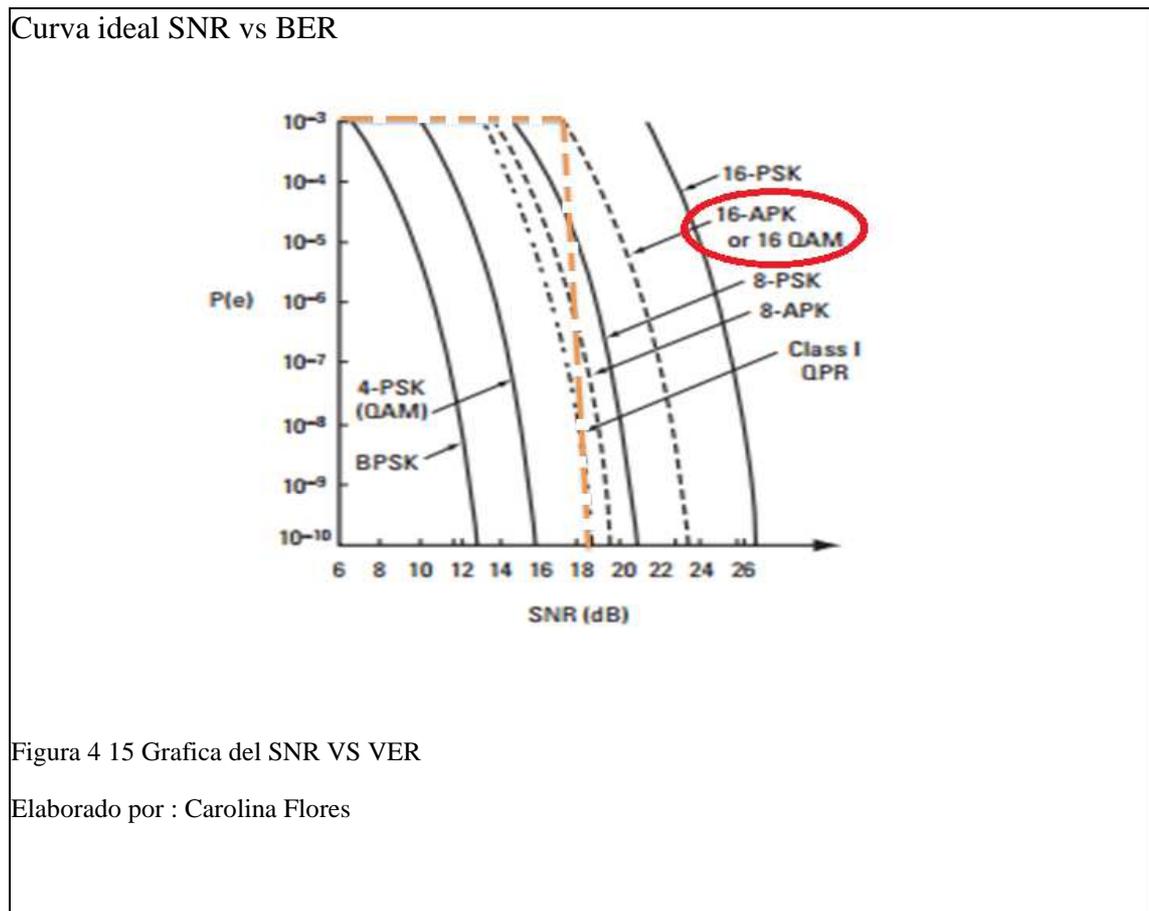
4.9 con un  $SNR = 18 \text{ dB}$  se muestra distorsionada ,debido a que señal siempre que se transmita por una canal va existir problemas de transmisión uno de ellos es el cable que produce distorsión en la señal.

La señal que se aprecia en los equipos con los parámetros tanto del ancho de banda de 250 MHz como la potencia -40 dB son rangos en que el sistema trabaja de manera adecuada.

## 4.2 Análisis y Resultados

Para el análisis del sistema de transmisión GFDM se obtienen las curvas del BER y EVM con distintos valores de la relación señal a ruido.

Según la curva ideal del SNR vs el BER muestra los valores que toma dependiendo la modulación que se esté utilizando como se observa en la [Figura 4.15](#) de la referencia..



Para la curva del EVM se parte de la siguiente ecuación dada en (MathWorks, 2014), la misma que permitió calcular el valor.

$$\mathbf{EVM} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\mathbf{e}_k)}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\mathbf{I}_k^2 + \mathbf{Q}_k^2)}} \quad (4.1)$$

Dónde

$$\mathbf{e}_k = (\mathbf{I}_k - \tilde{\mathbf{I}}_k)^2 + (\mathbf{Q}_k - \tilde{\mathbf{Q}}_k)^2$$

$\mathbf{I}_k$  = Medida en fase del k-ésimo símbolo

$\mathbf{Q}_k$  = Medida de fase en cuadratura del k-ésimo símbolo

$N$  = Longitud del vector de entrada

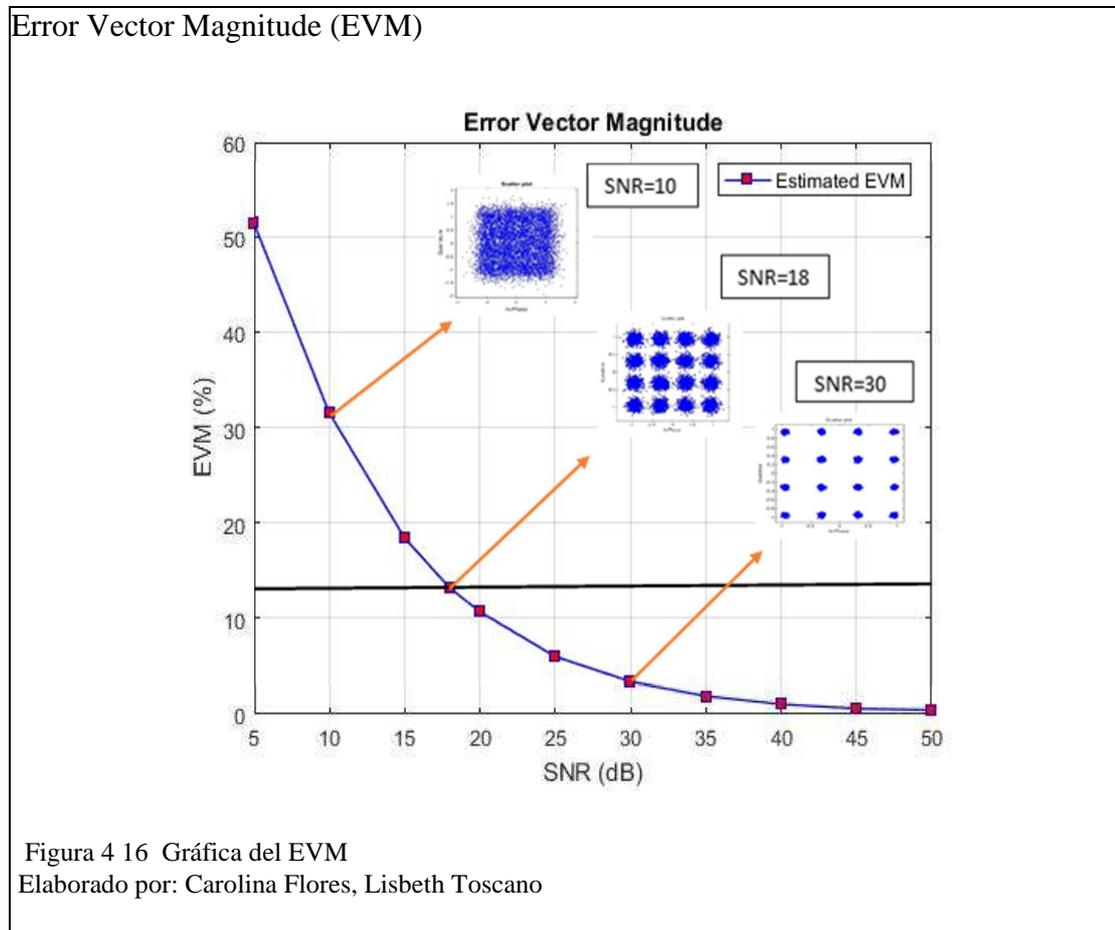
La curva del EVM que se muestra en la siguiente figura 4.15 indica que a medida que el SNR aumenta se tiene un buen EVM, este valor esta dado en porcentaje.

Según la figura 4.14 que es la curva ideal del SNR vs BER se analiza que para la modulación 16QAM el valor aproximadamente calculado es SNR=18.41 dB dando como resultado un EVM de 12% valor que permite obtener un BER=  $10^{-3}$ , entonces a partir de ese valor la señal es óptima para que con técnicas FEC se pueda transmitir sin errores.

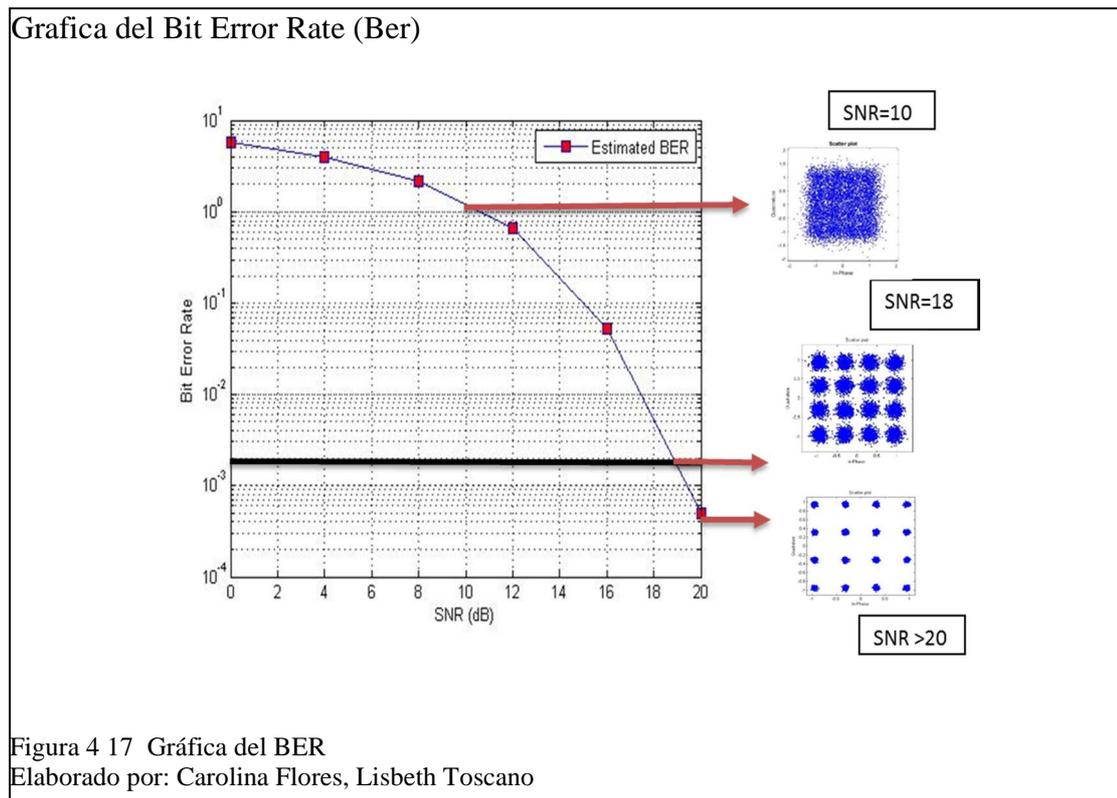
La tabla 4.2, muestra el EVM calculado en el rango de SNR de acuerdo a la modulación 16-QAM, según la Figura 4.14

Tabla 4. 2 EVM calculado en porcentaje para 16-QAM

SNR (dB)	EVM(%)
18.41	12
19.17	11
20	10
21	9
22	8
23	7



En la Figura 4.16, se muestra la curva del BER que a medida que el valor de SNR aumenta la señal mejora, es decir la señal aumenta en comparación con el ruido, se analiza tanto para una relación señal a ruido de 10 dB, 18dB y 30 dB los diagramas de constelación van mejorando y por consiguiente recuperándose la señal, por lo tanto mientras sea mayor de 20 dB se observa que la señal ya es recuperada casi completamente.



En la Tabla 4. 3, se indica el número de bits erróneos entre los enviados y recibidos, mediante Matlab con el comando “biterr”.

Tabla 4. 3 Número de bits erróneos

SNR (dB)	BER (bits-recibidos /bits-enviados)
5	5.8135
10	4.0151
15	2.1572
20	0.6709
25	0.0632
30	0.0185
35	0.0075
40	0.0025
45	0.0015
50	0.0005

## CONCLUSIONES

- GFDM utiliza dentro de su estructura los filtros por conformación de pulsos, lo que permite mejorar el uso del espectro de frecuencia, ya que cuenta con un bloque bidimensional que trabaja en tiempo y frecuencia, transmitiendo subsímbolos a través de multiportadoras.
- GFDM permite el diseño de transmisores más simples, a comparación de OFDM, ya que ésta última necesita requisitos de sincronización precisa para mantener la ortogonalidad entre las subportadoras.
- A pesar de la convolución circular aplicada en GFDM que da como resultado subportadoras no ortogonales, ésta característica permite reducir la sobrecarga de las tramas transmitidas, así como también el factor de latencia.
- Respecto al espectro de frecuencia de transmisión se concluye que, al trabajar con una frecuencia de portadora de 250MHz y una de muestreo de 1.25GHz, se consigue una estable y fiable transmisión de la información, pues a más de que se cumple con el criterio de Nyquist, también se obtiene una eficiencia espectral, ya que al recuperar el espectro en la recepción conserva las mismas características medidas en la transmisión.
- En la curva gráfica de EVM, se comprueba el correcto funcionamiento del sistema de transmisión, pues a partir de un  $BER=10^{-3}$  los sistemas multiportadoras adquieren un desempeño admisible, ya que la información enviada es recuperada prácticamente sin pérdidas.
- De acuerdo al desempeño de los sistemas multiportadoras, los valores de BER varían acorde a la cantidad de bits enviados; en este caso al enviarse un aproximado de 10000 datos se obtuvo un BER de  $10^{-4}$ , sin embargo al realizar el análisis de EVM ha sido necesario tomar en cuenta un BER igual a  $10^{-3}$ , porque según técnicas de corrección de errores (FEC) a partir de este valor el desempeño del sistema es confiable.

- Según la Figura 4.14, la curva ideal para la modulación 16-QAM aplicada en este proyecto, indica que dado un BER igual a  $10^{-3}$  se obtiene un SNR aproximado de 18 dB, de tal manera que al calcular el EVM se obtuvo un valor igual a 12%, el cual concuerda con el rango de porcentajes de EVM para una modulación de 16-QAM, mostrado en la Tabla 4. 2, comprobando el funcionamiento admisible del sistema.
- Mediante la curva gráfica del Bit Error Rate, se observa que al incrementar la señal con respecto al ruido desde 20 SNR en adelante, se consigue una aceptable recepción de los bits enviados respecto a los recibidos, ya que al calcular esta relación , el valor se acerca a cero como se muestra en la Tabla 4. 3.

## RECOMENDACIONES

- Al presentar un proyecto implementado, se ha dependido directamente de las características de los equipos para el análisis de la señal en tiempo y frecuencia, y al ser un sistema en evaluación para las futuras redes 5G, la frecuencia a la cual trabajen dichos equipos debe ser no menor a 1GHz, por lo que se recomienda en lo posible contar con equipos de mayor frecuencia de operación.
- Para futuros temas de investigación sería conveniente el estudio del comportamiento de este sistema multiportadora en otro tipo de medios de transmisión como la fibra óptica o redes ADSL.
- Evaluar otras técnicas de sincronización, ecualización, métodos de recepción que sean aplicables a los sistemas GFDM.

## REFERENCIA

- Danneberg, M., Michailow, N., Gaspar, I., Matthe, M., Zhang, D., Mendesy, L. L., & Fettweis, G. (2016). Implementation of a 2 by 2 MIMO-GFDM transceiver for robust 5G networks. *Proceedings of the International Symposium on Wireless Communication Systems, 2016–April*, 236–240. <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2015.7454336>
- Datta, R., Michailow, N., Lentmaier, M., & Fettweis, G. (2012). GFDM interference cancellation for flexible cognitive radio phy design. *IEEE Vehicular Technology Conference, 1(2)*. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2012.6399031>
- Desvanecimientos, C. O. N. (2001). Tesis Doctoral MODULACIÓN MULTIPORTADORA ADAPTATIVA.
- Fettweis, G. P., Gaspar, I., Mendes, L., Matthé, M., Michailow, N., Festag, A., ... Zhang, D. (n.d.). Designing A Possible 5G PHY With GFDM.
- Gaspar, I., Matthe, M., Michailow, N., Leonel Mendes, L., Zhang, D., & Fettweis, G. (2015). Frequency-Shift Offset-QAM for GFDM. *Communications Letters, IEEE, 19(8)*, 1454–1457. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2445334>
- Hamiti, E., & Sallahu, F. (n.d.). Spectrum Comparison between GFDM , OFDM and GFDM Behavior in a Noise and Fading Channel, 39–43.
- Matthe, M., Michailow, N., Gaspar, I., & Fettweis, G. (2014). Influence of pulse shaping on bit error rate performance and out of band radiation of Generalized Frequency Division Multiplexing. *2014 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC 2014*, 43–48. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2014.6881170>
- Mauricio, J., & González, V. (2008). Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación “ Simulación de un Esquema de Modulación / Demodulación OFDM Utilizando un Modelo de Canal Multitrayectoria ” Presentada por :
- Michailow, N., Gaspar, I., Krone, S., Lentmaier, M., & Fettweis, G. (n.d.). Generalized Frequency Division Multiplexing: Analysis of an Alternative Multi-Carrier Technique for Next Generation Cellular Systems.
- Michailow, N., Lentmaier, M., Rost, P., & Fettweis, G. (2011). Integration of a {GFDM} secondary system in an {OFDM} primary system. *Future Network Mobile Summit (FutureNetw), 2011*, 1–8.
- Michailow, N., Matthe, M., Gaspar, I. S., Caldevilla, A. N., Mendes, L. L., Festag, A., & Fettweis, G. (2014). Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks. *IEEE Transactions on Communications, 62(9)*, 3045–3061. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2014.2345566>
- Mobile, V., & Systems, C. (n.d.). GFDM Base Transceiver Implementation Documentation, 1–31.
- Valverde Muñoz, C. (2010). Implementación de un sistema OFDM en un dispositivo SFF SDR.

Wunder, G., Kasparick, M., Ten Brink, S., Schaich, F., Wild, T., Gaspar, I., ... Eged, B. (2013). 5G NOW: Challenging the LTE design paradigms of orthogonality and synchronicity. *IEEE Vehicular Technology Conference*.  
<https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2013.6691814>