

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:**

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN ENLACE DE RADIO SOBRE FIBRA  
ÓPTICA (ROF) A 60GHZ**

**AUTORES:**

**NANCY ELIZABETH AMAGUA MASABANDA**

**NELSON ANDRÉS MOGRO MÁRMOL**

**DIRECTOR:**

**MILTON TIPÁN SIMBAÑA**

**Quito, octubre de 2013**

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIZACIÓN DE USO DEL TRABAJO DE GRADO**

Nosotros, Nancy Elizabeth Amagua Masabanda y Nelson Andrés Mogro Mármol, autorizamos a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaramos que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

-----  
Nancy Elizabeth Amagua Masabanda

CC: 1721039343

-----  
Nelson Andrés Mogro Mármol

CC: 1722722285

## **DEDICATORIA**

A Dios, a mis abuelitos (+), mi hermano (+), por ser mi luz y mi guía en cada momento de mi vida, por darme sabiduría para lograr mis propósitos, a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental en mi desarrollo académico, mi gran apoyo en lo económico y en lo moral, a un gran amigo quien con su apoyo nos demostró que siempre se puede surgir en grupo y al Ing. Milton Tipán por su confianza, su ayuda y colaboración en la realización de este proyecto.

**Elizabeth Amagua M.**

## **DEDICATORIA**

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, a mis padres por brindarme su apoyo incondicional a cada momento, por los valores que me han inculcado y por ser la guía en mi camino, de manera especial a mi madre, quien ha sido mi ejemplo de lucha y superación personal, a mis familiares y amigos quienes han estado presentes durante la realización de este proyecto. Finalmente agradezco la confianza, apoyo y dedicación de tiempo al Ing. Milton Tipán, por haber compartido conmigo sus conocimientos y permitir la culminación de este proyecto.

**Andrés Mogro M.**

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	3
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	3
<b>1.1. Introducción</b> .....	3
<b>1.2. Problema</b> .....	3
<b>1.3. Hipótesis</b> .....	4
<b>1.4. Tesis</b> .....	4
<b>1.5. Objetivos</b> .....	4
<b>1.5.1. Objetivo General</b> .....	4
<b>1.5.2. Objetivos Específicos</b> .....	4
<b>1.6. Justificación</b> .....	5
<b>1.7. Alcances</b> .....	6
<b>1.8. Metodología de la investigación</b> .....	6
<b>1.8.1. Método Lógico Deductivo</b> .....	6
<b>1.8.2. Desarrollo del Software</b> .....	7
<b>1.8.3. Documentación</b> .....	7
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	8
<b>ESTADO DEL ARTE</b> .....	8
<b>2.2 Perspectiva histórica de los sistemas de comunicaciones ópticas</b> .....	9
<b>2.3 Arquitectura de los sistemas RoF</b> .....	12
<b>2.3.1 El transmisor óptico</b> .....	15
<b>2.3.2 Efectos no lineales en la fibra óptica</b> .....	22
<b>2.3.2.1 Dispersión estimulada Brillouin (SBS)</b> .....	23
<b>2.3.2.3.2 Modulación de fase cruzada (CPM)</b> .....	26
<b>2.4 Evolución y tendencia de la tecnología RoF</b> .....	29
<b>2.5 Dispositivos y pruebas experimentales recientes</b> .....	34
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	38
<b>ANÁLISIS Y SIMULACIÓN</b> .....	38
<b>3.1. Introducción</b> .....	38
<b>3.2. Análisis de modelos matemáticos para fibra óptica monomodo</b> .....	39

<b>3.2.1 Modelos matemáticos basados en la ecuación no lineal de Schrödinger</b>	39
<b>3.2.1.1 Método Split-Step Fourier</b>	45
<b>3.2.1.2 Método Split-Step Fourier Simétrico o de segundo orden</b>	47
<b>3.2.1.3 Método Time Domain Split Step TDSS</b>	48
<b>3.2.2 Funcion de transferencia de la fibra óptica</b>	50
<b>3.3 Arquitectura y simulación del enlace RoF a 60 GHz</b>	52
<b>3.3.1 Arquitectura y simulación del modelo basado en el método Split-Step Simétrico</b>	52
<b>3.3.2 Arquitectura y simulación del modelo basado en la función de transferencia de la fibra</b>	60
<b>3.4 Simulación del enlace RoF mediante el simulador comercial OptSim</b>	68
<b>3.4.1 Simulación del sistema RoF basado en la primera arquitectura</b>	69
<b>3.4.2 Simulación del sistema RoF basado en la segunda arquitectura</b>	72
<b>CAPÍTULO 4</b>	77
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	77
<b>4.1 Análisis comparativo de los enlaces de RoF</b>	77
<b>4.2.1 Comparación del enlace RoF basado en el método Split-Step simétrico</b>	87
<b>4.2.2 Comparación del enlace RoF basado en el método de la función de transferencia de la fibra óptica</b>	89
<b>4.3 Redacción de un artículo científico en base a los resultados obtenidos</b>	92
<b>CONCLUSIONES</b>	93
<b>RECOMENDACIONES</b>	95
<b>LISTA DE REFERENCIAS</b>	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Configuración de un sistema de comunicaciones de Radio sobre fibra óptica.	13
Figura 2 Esquema de una modulación de Intensidad y Detección Directa.....	19
Figura 3 Esquema de modulación de la señal banda base y RF con modulador MZM..	22
Figura 4 Generación de bandas laterales debido FWM en un sistema de dos canales ...	28
Figura 5 Ilustración esquemática del cálculo método Split-Step Fourier .....	46
Figura 6 Ilustración esquemática del método SSF simétrico, se observa que la no linealidad actúa en el centro del segmento.....	47
Figura 7 Diagrama de bloques del modelo RoF implementado en Matlab .....	52
Figura 8 Arquitectura del sistema RoF a 60GHz detallada con sus elementos principales .....	53
Figura 9 Espectros de la señal OFDM generada en Matlab.....	54
Figura 10 Portadora óptica con bandas laterales de RF a 60GHz.....	55
Figura 11 Señal OFDM modulada en la portadora óptica .....	56
Figura 12 Señal de salida de la fibra óptica dispersiva .....	57
Figura 13 Parámetros de diseño del filtro pasa bajos.....	59
Figura 14 Gráfica de respuesta en fase y frecuencia del filtro pasa bajos .....	59
Figura 15 Señal OFDM en banda base recuperada en el receptor .....	60
Figura 16 Diagrama de bloques del modelo RoF mediante la función de transferencia implementado en Matlab.....	61
Figura 17 Espectro de la señal de entrada OFDM .....	62
Figura 18 Espectro de la señal de 25GHz .....	63
Figura 19 Señal de 35.5 GHz .....	63
Figura 20 Señal modulada (señal OFDM modulada con señal de 25GHz + señal de 35.5Ghz).....	64
Figura 21 Espectro de la señal del campo óptico de salida del MZM .....	64
Figura 22 Espectro de la señal óptica de entrada y salida de la fibra .....	65
Figura 23 Módulo y Fase de la función de la transferencia de la fibra óptica .....	66
Figura 24 Espectro de la señal de salida del fotodetector en función de la corriente .....	67
Figura 25 Espectro de la señal OFDM en banda base recuperada en el receptor .....	67
Figura 26 Arquitectura RoF de la primera arquitectura implementada en OptSim™ .....	69
Figura 27 Espectro de la señal OFDM generada .....	70
Figura 28 Espectro de la señal de entrada a la fibra.....	70
Figura 29 Espectro de la señal de salida de la fibra .....	71
Figura 30 Espectro de la señal OFDM recuperada .....	72
Figura 31 Arquitectura RoF de la segunda arquitectura implementada en OptSim™ .....	72
Figura 32 Espectro de la señal OFDM.....	73
Figura 33 Espectro de la señal que ingresa de 25GHz.....	73
Figura 34 Señal total, suma de las señales que ingresan OFDM, 25Ghz y 35.5Ghz.....	74
Figura 35 Señal del campo óptico de entrada .....	74

Figura 36 Señal atenuada de salida del campo óptico.....	75
Figura 37 Espectro de la señal recuperada OFDM .....	75
Figura 38 Variación de la señal OFDM respecto a diferentes valores de atenuación (Primera arquitectura) .....	79
Figura 39 Variación de la señal OFDM respecto a diferentes valores de atenuación (Segunda arquitectura) .....	80
Figura 40 Variación de la señal OFDM respecto a diferentes valores de dispersión (Primera arquitectura) .....	82
Figura 41 Variación de la señal OFDM respecto a diferentes valores de dispersión (Segunda arquitectura) .....	83
Figura 42 Distancia de transmisión vs BER (Primera arquitectura) .....	85
Figura 43 Distancia de transmisión vs BER (Segunda arquitectura) .....	86
Figura 44 Comparación de la señal OFDM de entrada generada en Matlab y OptSim <sup>TM</sup> .....	87
Figura 45 Comparación de la señal óptica de entrada generada en Matlab y OptSim <sup>TM</sup> ..	88
Figura 46 Espectro de la señal OFDM generada en Matlab .....	89
Figura 47 Espectro de la señal OFDM generada en OptSim .....	90
Figura 48 Señal total, suma de las señales que ingresan OFDM, 25Ghz y 35.5Ghz (Matlab).....	90
Figura 49 Señal atenuada de salida del campo óptico (OptSim) .....	91

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Avances notables en el desarrollo de las comunicaciones ópticas.....	10
Tabla 2 Parámetros de la señal OFDM a transmitirse.....	54
Tabla 3 Parámetros característicos de la fibra monomodo G.655.B.....	57
Tabla 4 Parámetros de simulación de la primera arquitectura .....	77
Tabla 5 Parámetros de simulación de la segunda arquitectura .....	78

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Artículo científico en base a los resultados obtenidos.....	99
Anexo 2 Código Matlab para la simulación de la arquitectura del modelo SSSF .....	106
Anexo 3 Código Matlab para la simulación de la arquitectura basada en la función de transferencia de la fibra.....	112

## RESUMEN

Los enlaces de radio sobre fibra constituyen un pilar fundamental para las grandes redes integradas de alto desempeño, se habla de redes integradas ya que lo que se busca es la convergencia de las redes alámbricas con las inalámbricas.

La tecnología RoF se proyecta como la solución más prometedora para cumplir la demanda de los nuevos servicios multimedia garantizando una calidad de servicio óptima, ya que combina la capacidad de las redes ópticas con la escalabilidad y movilidad de las redes inalámbricas, con lo cual se reduce el costo de las redes de acceso, ya que las redes RoF permitirán grandes velocidades de transmisión combinadas con grandes anchos de banda, además de lograr una gran escalabilidad, la posibilidad de variar el radio de cobertura de acuerdo a las necesidades del usuario, entre otras, son las ventajas que presentan estos sistemas.

El proyecto de titulación “Análisis y simulación de un enlace de radio sobre fibra óptica (RoF) a 60 GHz” constituye un proyecto de investigación que tiene como objetivo principal el caracterizar una transmisión de radio sobre fibra óptica a 60 GHz, tanto en el software de cálculo matemático Matlab como en el software especializado OptSim, el cual constituye un entorno de diseño, simulación y evaluación del desempeño de los sistemas de comunicaciones ópticas. Para cumplir con este objetivo se ha realizado primero un estudio del estado del arte de los sistemas RoF, seguido del estudio de las técnicas y modelos utilizados para simular los enlaces de RoF, para posteriormente implementar dos modelos matemáticos en simuladores para evaluar el desempeño que presentan estos sistemas de comunicaciones, así como sus ventajas y desventajas.

Al final de esta investigación se pretende disponer de un modelo de simulación de enlaces de radio sobre fibra óptica que no solo servirá para la enseñanza de las redes RoF en el pensum de estudio de los estudiantes de la carrera de ingeniería electrónica, sino también de un punto de partida para investigaciones futuras en este campo.

## **ABSTRACT**

Radio over fiber links is important for large integrated high-performance networks. They are called integrated networks because what they look for is the convergence of wired networks with wireless networks.

RoF technology is seen as the most promising solution to meet the demand for new multimedia services ensuring optimal quality, combining the capacity of optical networks with the scalability and mobility of wireless networks which reduces the cost of access networks. RoF networks will allow high transmission rates combined with high bandwidth to achieve high scalability and the ability to change the radius of coverage according to user needs, these are just some of the advantages of these systems.

The project "Analysis and simulation of a radio over fiber link (RoF) at 60 GHz" is a research project that has as main objective to characterize a radio transmission over optical fiber at 60 GHz in both mathematical computing software Matlab as OptSim specialized software, which is a design environment, simulation and performance evaluation of optical communication systems. To meet this objective was first made a study of the state of the art of RoF systems, followed by the study of the techniques and models used to simulate the RoF links, later two mathematical models were implemented on simulators to evaluate the performance presented by these communication systems and analyze their advantages and disadvantages.

At the end of this research is pretend to have a simulation model of radio links over optical fiber that will not only serve to teach this subject in the curriculum of students of electrical engineering career, but also a point basis for future research in this field.

## INTRODUCCIÓN

En el presente escrito se detallará cada uno de los temas teóricos y de simulación que se han considerado para realizar el proyecto de investigación que tiene como tema “Análisis y simulación de un enlace de radio sobre fibra óptica (RoF) a 60 GHz”, para una mejor comprensión del lector acerca de este proyecto de investigación.

El Capítulo 1 consiste en el planteamiento del problema, el cual surge de la necesidad específica de los usuarios de servicios de comunicaciones inalámbricas por adquirir mayores anchos de banda, así como mayores velocidades de transferencia de datos, este planteamiento está compuesto de su respectiva hipótesis y tesis, de las cuales se extrae un objetivo principal y sus objetivos específicos, adicionalmente contiene el alcance de este proyecto de investigación, así como la metodología utilizada para desarrollar el mismo.

El Capítulo 2 contiene el estado del arte de la tecnología RoF, en este capítulo se analiza la evolución de los sistemas RoF, así como su arquitectura, y los distintos dispositivos que se utilizan para su aplicación, todo esto basado en los documentos científicos que abarcan este tema y que han sido publicados recientemente.

El capítulo 3 se centra en la investigación y el desarrollo de dos modelos matemáticos que se utilizarán para modelar una fibra monomodo tomando en cuenta los factores de atenuación y dispersión, y en la simulación de la transmisión de radio sobre fibra óptica a 60GHz con los dos modelos obtenidos tanto en el software de cálculo matemático Matlab como en el simulador especializado OptSim.

En el capítulo 4 se presenta un análisis de resultados, estos se basan en las gráficas resultado de la simulación, así como una comparación de las simulaciones entre el software de cálculo matemático Matlab y el software especializado OptSim.

El capítulo 5 contiene las conclusiones y recomendaciones que se han obtenido del proyecto de investigación.

Adicionalmente se encuentra al final la lista de referencias que sustenta todo el desarrollo tanto teórico como de simulación del presente proyecto.

Finalmente en los anexos se encuentra el desarrollo de los programas utilizados para la simulación de los enlaces de RoF, así como la documentación de relevancia respecto al tema de investigación.

# CAPÍTULO 1

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Introducción

En el presente capítulo se realiza un análisis del problema a resolver, para lo cual inicialmente se plantea la respectiva hipótesis y tesis.

Partiendo de estas premisas, se plantea el objetivo general, sus objetivos específicos, la justificación y alcances del proyecto, así como la metodología de investigación utilizada para la implementación del presente proyecto.

### 1.2. Problema

En la actualidad las comunicaciones requieren cada vez de mayor velocidad y más ancho de banda, demandada por los usuarios quienes hacen uso de dispositivos que pueden conectarse desde cualquier parte y con aplicaciones en tiempo real.

Esto ha obligado a las empresas de telecomunicaciones a migrar a redes que tengan estas características, una de ellas la fibra óptica, con la cual se consiguen velocidades en el orden de los Gbps y anchos de banda en el orden de THz. La fibra óptica tiene niveles de atenuación bajos menores a 0.2db/Km lo que permite cubrir grandes distancias de transmisión, además posee inmunidad al ruido y gran capacidad para adaptarse a las redes inalámbricas.

La combinación de la fibra óptica y las redes inalámbricas en redes de radio sobre fibra óptica, permitirán fusionar lo mejor de ambas tecnologías. El diseño de estas redes aún implican solventar muchos retos tecnológicos, por lo que es necesario estudiar los efectos y fenómenos que se producen y mitigarlos; entonces es necesario el generar

herramientas de simulación que permitan flexibilidad y precisión a la hora de observar los fenómenos que se producen.

### **1.3. Hipótesis**

Es posible realizar un simulador de un enlace de radio a través de fibra óptica monomodo a 60GHz cuyo costo computacional y resultado sean similares al de un software comercial.

### **1.4. Tesis**

La tesis a desarrollarse es el Análisis y Simulación de un enlace de radio sobre fibra óptica (RoF) a 60Ghz.

### **1.5. Objetivos**

A continuación se describe el objetivo general y los objetivos específicos del presente proyecto.

#### **1.5.1. Objetivo General**

- Caracterizar una transmisión de radio sobre fibra óptica (RoF) a 60 Ghz.

#### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Analizar el estado del arte de los enlaces de RoF.
- Determinar dos modelos matemáticos para enlaces de RoF basados en el estado del arte.
- Simular los dos modelos matemáticos en Matlab y en el software comercial.

- Comparar los resultados obtenidos de las simulaciones de los dos modelos matemáticos.
- Escribir un artículo sobre la simulación y comparación de los dos modelos matemáticos.

## **1.6. Justificación**

En la actualidad los sistemas radio sobre fibra, utilizan las prestaciones de la fibra óptica para transmitir señales de radio frecuencia directamente hasta un punto de radiación remoto o estación base. Algunas de las aplicaciones de estos sistemas son:

- Redes satelitales: VSAT (Very Small Aperture Terminals).
- Sistemas inalámbricos de banda ancha punto a multipunto: MMDS (Multichannel Multipoint Distribution System Local Multipoint), LMDS (Local Multipoint Distribution System), MVDS (Multipoint Video Distribution System).
- Sistemas celulares: GSM/DECT o MBS (Mobile Broadband System), LTE (Long Term Evolution).
- Redes de área local inalámbricas y aplicaciones comerciales o militares.

La gran mayoría de dispositivos fotónicos empleados en estos sistemas de comunicaciones ópticas se comportan de forma no lineal ante niveles de potencia óptica elevados. Con lo cual se producen efectos no deseados como atenuaciones, intermodulaciones, entre otros.

Entonces es de interés el estudio de este tipo de tecnología mediante la caracterización de la fibra y simulaciones mediante software ya que estarán presentes en nuestra vida cotidiana. Conocer el estado del arte y como estas no linealidades afecta a la potencia de transmisión y la frecuencia de operación de estos sistemas es menester de los futuros ingenieros de la carrera de ingeniería electrónica de la UPS.

## **1.7. Alcances**

Se pretende disponer dos modelos de simulación de enlaces de radio sobre fibra óptica a 60 GHz que no solo servirá para la enseñanza aprendizaje de este tema en el pensum de estudio de los estudiantes de la carrera de ingeniería electrónica, sino también de un punto de partida para investigaciones futuras en este campo.

Además se dispondrá de un artículo científico que se pondrá en consideración de revistas indexadas para su publicación.

## **1.8. Metodología de la investigación**

Se detallarán los pasos a seguir para la realización del presente proyecto de titulación empezando por la investigación bibliográfica, la obtención de los modelos matemáticos, el desarrollo del software para la simulación de un enlace de radio sobre fibra óptica, y finalmente la documentación del proyecto.

### **1.8.1. Método Lógico Deductivo**

Se realizará una investigación para determinar el funcionamiento de los sistemas de radio sobre fibra, así como su arquitectura y sus principales componentes.

Posteriormente se investigará y analizará los modelos matemáticos para realizar la simulación del enlace de radio sobre fibra.

Luego de verificar la simulación del enlace, se analizará la señal a transmitirse y su comportamiento tanto en el transmisor como en el receptor, de la misma manera se investigará los distintos factores que afectan a la señal a transmitir.

### **1.8.2. Desarrollo del Software**

Se analizará dos arquitecturas diferentes que tengan como objetivo la transmisión de una señal de RoF a 60 GHz.

Partiendo de los dos modelos matemáticos se diseñará el software para la simulación de la fibra monomodo, este diseño deberá tomar en cuenta factores dispersivos y de atenuación propios de la fibra.

Se implementará este diseño del software en la arquitectura de RoF correspondiente, acoplándolo de manera que permita verificar el funcionamiento del enlace.

Se implementará una señal OFDM en banda base, la cual se modulará en la portadora óptica (ondas milimétricas), y de esta de esta manera poder transmitir la señal por la fibra óptica, de la misma manera se implementará el receptor óptico y se verificará la señal de salida.

Luego de realizar la implementación del enlace de RoF con los dos modelos matemáticos y con diferentes arquitecturas en Matlab y OptSim, se realizará pruebas y se extraerán gráficas de los espectros de las señales para verificar el correcto funcionamiento del software.

### **1.8.3. Documentación**

Finalmente, con toda la documentación previamente investigada y el software implementado y funcionando correctamente, se realizará el texto de la monografía correspondiente al proyecto de investigación “Análisis y Simulación de un enlace de radio sobre fibra óptica (Rof) a 60Ghz”.

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DEL ARTE

#### 2.1. Introducción

En este capítulo se presenta la investigación y análisis del estado del arte de la tecnología de radio sobre fibra, el estudio se centra en los aspectos relevantes de esta tecnología como son su arquitectura, las no linealidades de la fibra, los tipos de modulaciones, dispositivos empleados y demás factores que influyen directamente en el posterior análisis y simulación del enlace RoF.

Los dispositivos actuales como portátiles tablets y smartphones, demandan una conexión inalámbrica permanente además de una alta velocidad de transferencia de datos, sin embargo, los sistemas inalámbricos actuales no poseen el ancho de banda ni las velocidades de transferencia que el usuario desearía; es por esto que las redes inalámbricas de banda ancha probablemente se implementarán con una arquitectura basada en la tecnología de radio sobre fibra para proveer conectividad inalámbrica de alta velocidad a los usuarios, así como para satisfacer la demanda creciente de los servicios multimedia, como, redes celulares de datos, comunicaciones satelitales, sistemas móviles de banda ancha, entre otros. (Sharma, Singh, & Sharma, 2012)

Un claro ejemplo de la evolución de las comunicaciones debido a la demanda de los usuarios es el paso de la tecnología de comunicaciones móviles 2G a 3G, en la cual se desarrolló una gran variedad de sistemas inalámbricos, como GPRS, Bluetooth, UWB, Lan Inalámbrica e Hyper Lan, así como se encuentran siendo desarrolladas varias tecnologías para las futuras redes móviles 4G. La tecnología de Radio sobre fibra involucra el uso de componentes y técnicas ópticas para transportar señales de radio frecuencia desde las estaciones de control (Control Station, CS) hacia las estaciones base (Base Station, BS), por lo que esta tecnología hace posible centralizar todo el procesamiento de la señal RF (Radio Frequency, RF) en un solo lugar compartido, la

estación de control, con el uso de fibra óptica monomodo, la cual posee pérdida de potencia muy baja para distribuir las señales de RF hacia la estación base. (Sharma, Singh, & Sharma, 2012)

## **2.2 Perspectiva histórica de los sistemas de comunicaciones ópticas**

Los sistemas de comunicaciones eléctricos se mantuvieron como método de comunicación dominante hasta principios de los años 1980, en esa época la transmisión de señales se la realizaba a través de un conductor metálico como el par trenzado y el cable coaxial, sin embargo su ancho de banda limitado y atenuación, limitaba la mejora en la capacidad de estos sistemas.

Por el año de 1975, se plantea la necesidad de cambiar de los sistemas analógicos que se manejaban por ese entonces a los que se llamarían sistemas digitales, todo esto para mejorar la calidad de las transmisiones y para hacer los sistemas más escalables, lo cual necesitaba de un inmediato incremento del ancho de banda en las transmisiones, razón por la cual durante la década comprendida entre los años 1960 y 1970 se realizaron muchos estudios para tratar de superar los inconvenientes que presentaba el cable coaxial. (Varallyay, 2007)

En el año 1966, Kao y Hockham propusieron el uso de fibra óptica como un medio para transportar las señales ópticas. Cuatro años más tarde, un gran avance se produjo cuando la pérdida por atenuación de la fibra se redujo a aproximadamente 20dB/km, un valor extremadamente bajo para los valores que se conocía hasta ese tiempo de más de 1000dB/km. (Lee, 2000)

Desde ese entonces, la tecnología de comunicación óptica se ha desarrollado rápidamente para lograr una mayor capacidad de transmisión y distancias más largas de transmisión. La capacidad de los sistemas de transmisión se ha incrementado alrededor de 100 veces cada 10 años. (Lee, 2000) Durante las últimas dos décadas se produjeron

los mayores avances tecnológicos en las comunicaciones ópticas, para lograr un rápido desarrollo de la tecnología, sus características principales se resumen en la tabla 2.1.

La primera generación de comunicaciones ópticas, se diseñó con fibras multimodo y con diodos emisores de luz compuestos de GaAs (Arseniuro de Galio), los cuales operaban entre 0.8 a 0.9  $\mu\text{m}$  de longitud de onda, además constituyó un gran avance el pasar de distancias entre repetidores de aproximadamente 1 Km en el cable coaxial a los más de 10 Km en la fibra óptica, sin embargo la dispersión de las fibras multimodo y las pérdidas elevadas en la fibra de 0,8  $\mu\text{m}$  ( $>5\text{dB/km}$ ) limitaba tanto la distancia de transmisión como la velocidad de bits. (Lee, 2000)

Tabla 1 Avances notables en el desarrollo de las comunicaciones ópticas

AÑO	VELOCIDAD DE BITS	DISTANCIA ENTRE REPETIDORES	TECNOLOGÍAS DESARROLLADAS
1980	45 Mb/s	10 Km	$\lambda=0,8\mu\text{m}$ Fibra multimodo LED GaAs
1987	1.7 Gb/s	50 Km	$\lambda=1,3\mu\text{m}$ Fibra monomodo Diodos láser
1990	2.5 Gb/s	60-70 Km	$\lambda=1,55\mu\text{m}$ Fibra de índice gradual
1996	5 Gb/s	33-82 Km	$\lambda=1,55\mu\text{m}$ Amplificadores ópticos

Fuente: (Lee, 2000)

En la segunda generación, las fibras multimodo fueron reemplazadas por fibras de tipo monomodo, y la longitud de onda central de las fuentes de luz se desplazó a 1.3 $\mu\text{m}$ , donde las fibras ópticas tienen mínima dispersión y menor pérdida de alrededor de 0,5 dB / km. Sin embargo, todavía había una fuerte demanda para aumentar aún más la distancia entre repetidores, lo cual podría lograrse operando con una longitud de onda

de 1,55  $\mu\text{m}$ , donde las fibras ópticas tienen una pérdida intrínseca mínima, de alrededor de 0.2dB/km.

El paso de longitud de onda de 1.3 $\mu\text{m}$  a 1,55  $\mu\text{m}$  (1550nm), se retrasó un tiempo debido a que en ese entonces no se tenía disponible aún la fibra de índice gradual, la cual posteriormente redujo los valores elevados de dispersión en la longitud de onda 1550nm, modificando el índice gradual de las fibras mientras que mantenía el beneficio de tener pérdidas muy bajas a esa longitud de onda. (P.Agrawal, 2002)

Sin embargo, el crecimiento del tráfico en las telecomunicaciones y la demanda de un mayor ancho de banda solicitado por cada usuario reveló un importante inconveniente de los sistemas electrónicos de los regeneradores, la inflexibilidad para actualizar y mejorar. Debido a que todos los regeneradores están diseñados para funcionar a una específica velocidad de datos y para un determinado formato de modulación, entonces todos ellos necesitaban ser reemplazados para alcanzar mayor velocidad de datos. La dificultad de la capacidad de actualización, finalmente, se ha eliminado con la aparición de los amplificadores ópticos, lo que llevó a una generación completamente nueva de comunicación óptica. (P.Agrawal, 2002)

Un avance importante fue que un amplificador de fibra monomodo dopada de erbio (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA). Posteriormente la invención de la fibra monomodo dopada de erbio (EDFA) creó un profundo impacto en esta tecnología, ya que a 1550nm poseía características que lo convertían en un medio amplificador ideal de fibra óptica para los sistemas de comunicación modernos. El amplio espectro de ganancia (3 ~ 4THz) de un EDFA, también hace que sea práctico para implementar sistemas con multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM). (Varallyay, 2007)

Es muy probable que los sistemas WDM permitan otro gran salto en la capacidad de la transmisión de los sistemas de comunicación óptica. Por otro lado, la mejora de los

sistemas integrados se mantiene como otro desafío. A partir de finales de 1997, unos 171 millones de km de fibra se han desplegado por todo el mundo, de los cuales 69 millones de kilómetros han sido desplegados en América del Norte, desafortunadamente, la mayoría de las fibras son del tipo monomodo convencionales que tienen una gran dispersión cuando trabajan en la longitud de onda de 1550nm. La actualización de estos sistemas a futuro requerirá de diferentes técnicas que permitan disminuir los factores dispersivos de la fibra para a futuro optimizar el rendimiento de estos sistemas. (Lee, 2000)

### **2.3 Arquitectura de los sistemas RoF**

Dentro de la arquitectura de los sistemas RoF, se debe conocer que es una tecnología que trabajará en la banda de frecuencias EHF (Extremely High Frecuencias, EHF), que corresponden las frecuencias entre los 30 y 300 GHz, también conocida como la banda de ondas milimétricas MMW (millimeter wave), dentro de estas frecuencia se manejan anchos de banda nada despreciables, de alrededor de 7GHz. (Jhon James Granada Torres, 2011)

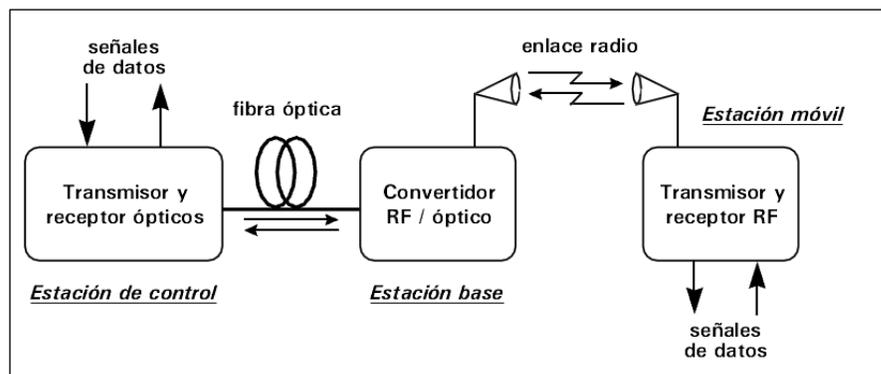
Para el desarrollo de sistemas que trabajen con señales ópticas dentro de los parámetros mencionados, se presentan una serie de inconvenientes, uno de ellos es el valor elevado de los dispositivos electrónicos que se utilizan, ya que la transmisión de señales milimétricas van a necesitar una mayor potencia en el transmisor, esto debido a que las pérdidas en el medio inalámbrico van a ser elevadas en este tipo de señal, lo cual genera inconvenientes en la implementación de esta tecnología.

Es por esta y otras razones que la tecnología radio sobre fibra nace para tratar de dar solución a varios de los inconvenientes que se presentan en la transmisión de señales milimétricas, las ventajas de utilizar fibra óptica para transportar este tipo de señales se detallan a continuación:

- Permite una transmisión de datos a alta velocidad
- Posee un gran ancho de banda (orden de los GHz)
- Posee valores de atenuación bajos (0,2 – 0,5 dB/Km)
- Es inmune a las perturbaciones de tipo electromagnéticas
- No produce interferencias como lo hace el par trenzado o el coaxial.
- Es durable, resistente al calor, el frío y a la corrosión. (Jhon James Granada Torres, 2011)

Los sistemas de radio sobre fibra (Radio-over-Fiber, RoF), transmiten señales de radio a través de la fibra óptica desde un transmisor hasta una estación base, para transmitir las a los consumidores finales mediante un enlace de radio, como se observa en la figura 1:

Figura 1 Configuración de un sistema de comunicaciones de Radio sobre fibra óptica



Fuente: (Pascual, 2000)

El propósito principal de los sistemas RoF, es la distribución de señales de banda ancha a estaciones base (Base Station, BS) para acceso inalámbrico usando una red de acceso óptica. Por lo tanto un sistema RoF consiste de cuatro elementos principales, el transmisor óptico, la red de acceso óptico (canal de fibra óptica), las estaciones base y los receptores móviles o fijos. (R. Herschel, 2011)

En la estación de control (Control Station, CS) o transmisor óptico se realizan las funciones para generar la onda óptica milimétrica así como para detectar la señal del

enlace de subida, la longitud de la fibra para el canal de transmisión se mide desde la oficina central hasta la estación base, generalmente esta distancia está en el orden de las decenas de Kilómetros.

Dentro del canal óptico, se tienen las llamadas no linealidades en las fibras ópticas, las cuales se dividen en dos categorías. Dispersión estimulada (Raman y Brillouin), y el efecto óptico Kerr debido a los cambios en el índice de refracción con la potencia óptica. Mientras que la dispersión estimulada es responsable de la pérdida o ganancia de la intensidad, el índice refractivo no lineal es el responsable del desplazamiento de fase de la señal óptica. Otra diferencia entre la dispersión estimulada y el efecto Kerr es que la dispersión estimulada tiene niveles de potencia de umbral en los cuales los efectos no lineales se manifiestan en la fibra, mientras que en el efecto Kerr no se tiene dichos niveles de potencia. Para reducir la dispersión de la señal óptica en la fibra, se pueden utilizar dos tipos diferentes de fibra por separado, una para la subida y otra para la bajada. (Lee, 2000)

En la estación base, es necesario implementar un detector óptico de alta velocidad para realizar la conversión opto-eléctrica de las señales ópticas milimétricas, para que posteriormente las señales eléctricas de radio sean impulsadas usando un amplificador de RF de alta potencia. Luego se emplea la antena para hacer una difusión de la señal de RF hacia los dispositivos receptores. (Chen, y otros, 2007)

Como se puede observar en la arquitectura de los sistemas RoF, la mayoría del procesamiento de señales (codificación, multiplexación, generación y modulación de radio frecuencia) se llevan a cabo en la estación de control CS (Control Station, CS), lo que hace que la estación base tenga costos menores y sea más eficiente. Entonces la tecnología RoF se convertirá en la tecnología en los sistemas de comunicaciones móviles de próxima generación. Al mismo tiempo, la tecnología de multiplexación OFDM está mostrando grandes ventajas en el aumento de la velocidad de procesamiento de señales, por lo cual también está siendo enfocada en los sistemas móviles 4G. (Linghui RAO, 2006)

Otro punto importante de la tecnología RoF, es que las señales de radio únicamente se transponen en una potadora óptica sin cambiar su formato de modulación. Esta habilidad para transmitir señales de radio en su formato nativo, da una ventaja adicional en la reducción de costos y simplificación de los puntos de acceso.

### **2.3.1 El transmisor óptico**

La función principal que debe cumplir el transmisor óptico, es la de generar las ondas ópticas milimétricas, las cuales serán las responsables de transportar las señales de RF hacia la estación base, la generación de estas señales y la configuración simple de las estaciones base son técnicas clave en la disminución de costos y el aumento del desempeño de las redes de acceso ópticas basadas en RoF. Sin embargo, la generación de las ondas ópticas milimétricas a frecuencias por encima de los 40 GHz supone un desafío mayor ya que esto se encuentra limitado por la respuesta de frecuencia que tienen los moduladores ópticos, por ejemplo el modulador externo Mach- Zehnder, el cual posee buena respuesta por debajo de 40 GHz, por lo tanto es de gran interés en la comunidad científica, un método para la generación de señales ópticas cuya respuesta a frecuencias mayores sea mejor y el costo de los equipos más barato.

Para enlaces de RoF, las portadoras ópticas milimétricas pueden ser generadas a través de osciladores locales, sin embargo la eficiencia disminuye cuando la frecuencia portadora aumenta. También existe otra aproximación para este objetivo, basada en la técnica de heterodinación óptica la cual presenta mayor precisión y bajo ruido de operación. (Zhang Y. , 2011)

A continuación se presentan los métodos conocidos para la generación de estas ondas:

### ➤ **Conversión ascendente en las estaciones base**

En este método no se utilizan señales en la banda de radio frecuencia, en lugar de eso, una señal de frecuencia intermedia es transportada sobre la fibra óptica. La conversión ascendente de frecuencia intermedia a radio frecuencia RF se la realiza al nivel de la estación base, en la cual un oscilador local es el encargado de generar la onda portadora milimétrica. Una ventaja de esta conversión es que los efectos de dispersión cromática no afectan a la señal transportada debido a que su ancho de banda es mucho más estrecho que el que ocuparía la señal de RF. Por otro lado, una clara desventaja está en que para la conversión ascendente de frecuencia intermedia a radio frecuencia se requiere de un mezclador y de un oscilador local para cada una de las estaciones base que sean necesarias en la red, lo cual resultaría en el incremento de equipos y por lo tanto el incremento de costos de implementación. (Zhang Y. , 2011)

### ➤ **Heterodinación óptica**

Básicamente el funcionamiento de esta técnica consiste en que si dos ondas ópticas de diferentes longitudes de onda inciden en un fotodetector, esto generará un pulso eléctrico a la salida del mismo con una frecuencia correspondiente a la longitud de onda que existe de separación entre las señales ópticas incidentes. Esta técnica es capaz de generar señales eléctricas de frecuencias que llegan hasta la banda de los THz pero se ve limitada por el ancho de banda del fotodetector, sin embargo, se presenta una desventaja importante debido a que el hecho de chocar dos ondas ópticas generadas por diodos láser lleva a que la señal microonda que se genera tenga un elevado ruido de fase, ya que las fases de dos señales ópticas no están correlacionadas. Por esta razón, durante los últimos años se han propuesto varias técnicas para generar señales microondas o señales ópticas de bajo ruido de fase con las dos ondas ópticas cerradas en fase. (Zhang Y. , 2011)

➤ **Modulación externa con amplificador óptico semiconductor reflectante (reflective semiconductor optical amplifier, RSOA)**

Esta técnica utiliza la luz de una fuente óptica en el transmisor por lo tanto no requiere de una fuente óptica en la estación base, lo que conllevaría a una disminución de costos de equipos en la estación base, sin embargo, para separar la luz incidente de la reflejada se hace necesaria la implementación de un circulador óptico, lo cual incrementa la complejidad y costo de este tipo de enlaces, además que se necesita de una técnica de filtrado para minimizar el ruido de la emisión óptica.

Este tipo de técnica también provee flexibilidad hablando en términos de longitud de onda y puede ser fácilmente implementada en arquitecturas para fibras de alta capacidad. Otra ventaja importante que presenta esta técnica es que no tiene una longitud de onda de funcionamiento pre establecida, a diferencia de las otras técnicas, lo cual permite que el mismo tipo de dispositivo pueda ser usado para todas las estaciones base, lo cual resultaría bastante efectivo disminuyendo los costos de las redes extensas. Los amplificadores RSOA, pueden ser obtenidos comercialmente, pero aún es una tecnología inmadura, especialmente para aplicaciones analógicas, razón por la cual continua en desarrollo. (Wake, y otros, 2010)

➤ **Modulación externa con moduladores MZM y EAM.**

Un método anterior a la modulación externa consistía en la modulación de intensidad, el cual genera una señal óptica mediante un láser dependiendo de la corriente que circule a través de él. A pesar de la simplicidad que este método presentaba comparado con la modulación externa, se ha verificado que la modulación de intensidad directa, no resulta apropiada cuando se trabaja en la banda de las ondas milimétricas, esto debido a los límites de ancho de banda que presenta la modulación directa del láser. Esto explica porque a frecuencias más altas de trabajo, se deja de utilizar la modulación de intensidad y se pasa a trabajar con modulaciones externos. Esta técnica de modulación por sobre

todos los esquemas conocidos, es una muy buena opción para generar las ondas ópticas milimétricas con una pureza espectral alta (bajo ruido).

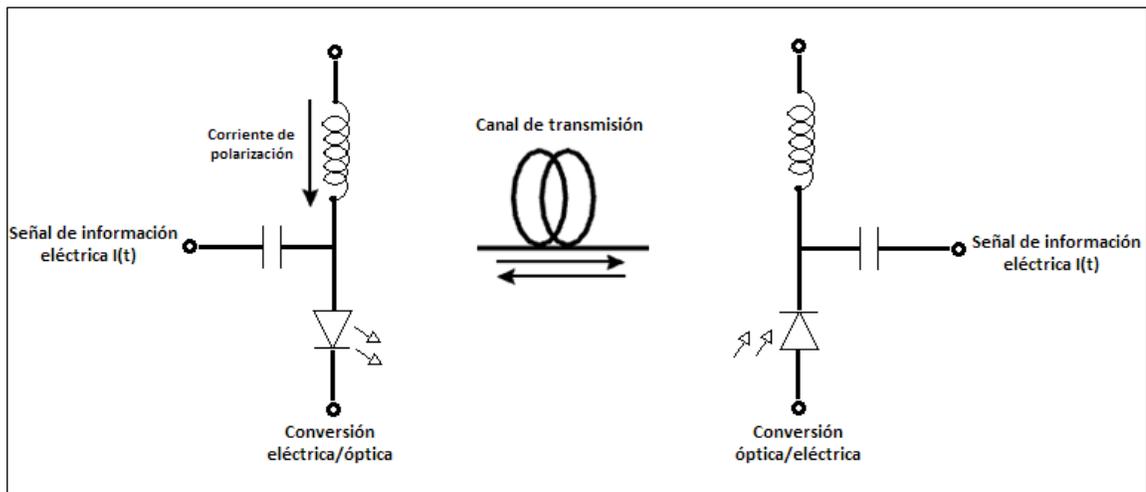
El método de modulación utiliza moduladores externos de alta velocidad, como el modulador Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Modulator, MZM) de tipo interferométrico, o los moduladores de electro-absorción (Electro-Absorption Modulator, EAM). Mientras que los moduladores externos, presentan arquitecturas simples, estos presentan ciertas desventajas como la pérdida de inserción significativa, y más que todo este método sufre de distorsión debido a la no linealidad intrínseca de los moduladores, elevado consumo de energía y complejidad. Debido a esto, se han presentado varias investigaciones hasta la presente, para generar las señales ópticas milimétricas con moduladores externos disminuyendo sus desventajas. (Zhang Y. , 2011)

Para el trabajo presente se ha considerado la arquitectura a presentarse basada en la modulación externa con MZM (Mach-Zehnder Modulator), debido a que en la actualidad ya existen varios métodos para mejorar esta modulación evitando la distorsión, el ruido y los costos elevados de los equipos.

### **2.3.1.1 Modulación de intensidad con detección directa (IM-DD)**

Es la opción de modulación óptica más simple para implementar, la cual utiliza un láser de retroalimentación distribuida (Distributed Feedback, DFB), estos dispositivos están disponibles comercialmente para aplicaciones analógicas con una alta eficiencia, bajo ruido y poca distorsión. Los diodos DFB garantizan un funcionamiento entre 1270nm a 1610nm de longitud de onda, los tipos más comunes que se utilizan son el Fabry-Perot (FP) y el láser de cavidad vertical (Vertical Cavity, VCSEL), debido a que tienen una estabilidad mayor y mejor desempeño ante el ruido.

Figura 2 Esquema de una modulación de Intensidad y Detección Directa



Fuente: (P.Agrawal, 2002)

Su funcionamiento básico se centra en el diodo láser (portadora), el cual es modulado por la señal de datos o información a transmitirse (modulante), de esto se obtiene una señal óptica modulada cuya potencia óptica es proporcional a la información enviada, en el emisor se realiza el proceso eléctrico-óptico.

En el receptor se realiza lo contrario, la conversión óptica-eléctrica de manera directa, mediante los llamados detectores de ley cuadrática, los cuales se componen principalmente de diodos PIN, cuya función principal en el receptor es detectar las variaciones de potencia y transformarlas en variaciones de intensidad.

Se debe tomar en cuenta que el espectro de esta modulación, va a estar compuesto por varias bandas laterales réplicas de la señal principal, esto debido a que no se modula la amplitud del campo eléctrico de la señal que se transmite por la fibra, sino que se modula directamente la intensidad o potencia óptica de la señal. (Wake, y otros, 2010)

### **2.3.1.2 El modulador de electro absorción (EAM)**

Este tipo de modulador está basado en la dependencia con el campo eléctrico de la frontera de la banda de absorción que presentan ciertos materiales, los cuales son capaces de absorber la radiación, por lo tanto permiten controlar cuanta potencia se deja pasar dependiendo de la diferencia de potencial aplicada en sus extremos.

Cuando hablamos de materiales semiconductores, esta propiedad de controlar la potencia que se deja pasar y de absorber radiación se conoce como efecto Franz-Keldysh o efecto Stark, los cuales establecen que las longitudes de onda que absorben estos materiales están controladas por la variación del campo eléctrico aplicado en sus extremos.

Los moduladores de electro absorción EAM, presentan muchas ventajas como son:

- Fácil integración con el diodo láser
- Tensión de activación baja
- Poca acumulación de DC
- Bajo consumo de potencia
- Tamaño pequeño del equipo
- Capacidad de integración con otros dispositivos semiconductores.

Sin embargo, las características de transmisión no lineales propias de este modulador, hacen que sea necesario adoptar técnicas de linealización complejas, como el uso de dos moduladores EAM en paralelo, métodos para compensar la distorsión, entre otros, los cuales resultan bastante complicados de implementar y aumentan los costos de los dispositivos. (Hraimel, y otros, 2011)

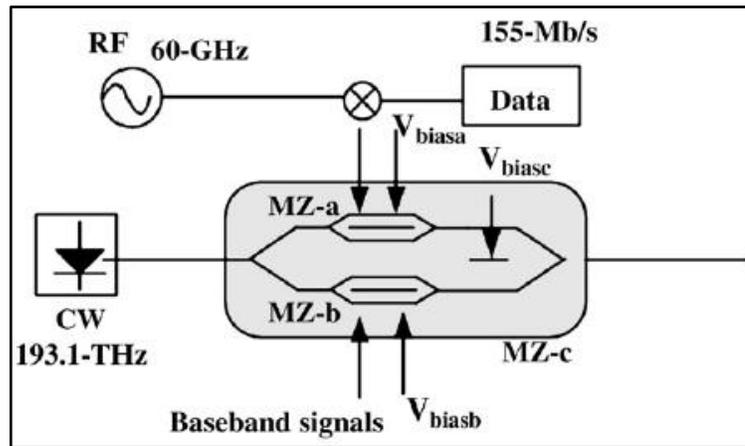
### **2.3.1.3 El modulador Mach-Zehnder (MZM)**

El modulador externo más conocido y ampliamente usado en la actualidad es el modulador Mach-Zehnder, conocido así porque su funcionamiento se basa en los interferómetros Mach-Zehnder y en ciertos materiales con propiedades electro ópticas. Para entender el funcionamiento del modulador MZM, se parte de la explicación del funcionamiento del interferómetro Mach-Zehnder, el cual se basa en el fenómeno de la interferencia entre ondas. La señal de entrada es dividida en dos partes iguales, cada una de estas dos partes viaja por caminos distintos, y posteriormente se vuelven a combinar, ahora, se conoce que como resultado de esta combinación se puede obtener una interferencia constructiva si no existe diferencia entre las fases de ambas señales, de esta manera se reconstruye la señal original de entrada, pero si la diferencia de fase de las señales combinadas no es nula, se crea una interferencia destructiva, con lo cual no es posible obtener la señal original nuevamente.

Basados en una estructura similar al interferómetro MZI, y fabricados comúnmente en Niobato de Litio ( $\text{LiNbO}_3$ ), aunque a veces se fabrican también en Arseniuro de Galio ( $\text{GaAs}$ ), los moduladores Mach-Zehnder suponen una gran ventaja debido a que aumentan la velocidad de modulación a la vez que reducen la modulación de fase residual, más conocida como chirp.

La razón para que los moduladores Mach-Zehnder en su estructura contengan Niobato de Litio ( $\text{LiNbO}_3$ ), es debido a que este tipo de cristal, posee una propiedad conocida como efecto electro óptico, el cual dependiendo del campo eléctrico que se le aplique varía su índice de refracción, con lo cual se puede controlar a la señal óptica que viaja por este cristal, siguiendo las variaciones de campo eléctrico que se le aplican. (Dong, y otros, 2007)

Figura 3 Esquema de modulación de la señal banda base y RF con modulador MZM



Fuente: (Lv, Yang, Hua, Shen, Cui, & nan Sun, 2010)

La figura 3 muestra un ejemplo de un sistema con modulador externo Mach-Zehnder y su simbología, en este caso se utiliza el principio de modulación simultánea de banda base y RF, este ejemplo utiliza un modulador Mach-Zehnder de NiNbO<sub>3</sub>, comprendido por tres electrodos MZM dobles, lo cual en este caso es la clave para generar la señal óptica RF y banda base. (Lv, Yang, Hua, Shen, Cui, & nan Sun, 2010)

### 2.3.2 Efectos no lineales en la fibra óptica

En el canal de transmisión de los sistemas de radio sobre fibra, aparecen efectos no lineales que influyen directamente en la capacidad de transmisión de las señales, dichos efectos se producen en los materiales dieléctricos cuando son expuestos a campos electromagnéticos de gran intensidad. (Sharma, Singh, & Sharma, 2012) Estos efectos en la actualidad son cada vez más importantes ya que con la aparición de los amplificadores ópticos, se generan potencias luminosas muy fuertes que ingresan a los núcleos de las fibras, haciendo aún más notorios dichos efectos no lineales. (Lee, 2000)

### 2.3.2.1 Dispersión estimulada Brillouin (SBS)

Esta dispersión es producida debido a la interacción que existe entre las ondas ópticas y acústicas en una fibra. En este tipo de dispersión, una onda óptica de gran potencia que va hacia una dirección (hacia adelante), genera una ganancia en banda estrecha para la propagación de la luz en la dirección opuesta a su dirección (hacia atrás). Esto provoca que una cantidad de la señal que se propaga hacia adelante sea redireccionada hacia el sentido contrario (hacia atrás), lo cual resulta en pérdidas de intensidad de la potencia en el receptor.

Si el umbral de la dispersión SBS se define como la potencia de entrada en la cual la potencia dispersiva se incrementa tanto como lo hace la potencia de entrada, el umbral SBS resulta proporcional a:

$$P_B^{Th} \sim \frac{1}{G_B} \left( 1 + \frac{\Delta V_S}{\Delta V_B} \right) \quad (2.1)$$

Dónde:  $G_B$  es el coeficiente de ganancia Brillouin,  $\Delta V_S$  es el ancho de línea de la fuente y  $\Delta V_B$  es el ancho de línea Brillouin. (Lee, 2000)

De esta ecuación se puede observar que la potencia umbral se incrementará proporcionalmente al ancho de línea de la fuente. Para fibras ópticas trabajando en la banda de frecuencias ópticas milimétricas 1550nm, el ancho de línea Brillouin es de 20MHz, lo cual implica que si se modulan señales ópticas a tasas de transmisión más elevadas, se experimentará menos efectos de la SBS.

Una característica de la dispersión estimulada Brillouin en comparación con los demás efectos no lineales que se verán a continuación, es que el umbral de SBS no disminuye en un sistema amplificado extenso, esto debido a que los amplificadores ópticos prácticos tienen uno o más aisladores ópticos, los cuales evitan la acumulación de la luz

dispersada hacia atrás generada por el SBS, lo cual ayuda a que el umbral SBS se mantenga constante a lo largo de todo el sistema. (P.Agrawal, 2002)

Aun cuando la dispersión estimulada de Brillouin puede ser un factor que afecte a las transmisiones ópticas en los enlaces de Radio sobre fibra, las limitaciones en las comunicaciones usualmente son producidas por otros factores no lineales que se ven a continuación.

### **2.3.2.2 Dispersión estimulada Raman (SRS)**

Este tipo de dispersión se produce debido a la interacción de los fotones de la luz incidente con las vibraciones moleculares de la fibra óptica, esta dispersión, a diferencia de la SBS, dispersa las ondas de luz en ambas direcciones (hacia adelante y hacia atrás). Sin embargo la luz que se dispersa hacia atrás, puede ser atenuada e incluso eliminada con el uso de aisladores ópticos, razón por la cual la luz que se dispersa en sentido de la transmisión (hacia adelante) es la que se debe tomar en cuenta en esta dispersión. (P.Agrawal, 2002)

El coeficiente de ganancia de Raman es casi tres magnitudes menor de lo que es el coeficiente de ganancia de Brillouin, y la potencia umbral de Raman ronda el 1W para sistemas de canal simple, en estos sistemas la potencia umbral más alta hace que la SRS sea un efecto despreciable, sin embargo, la ganancia en ancho de banda de SRS es de cerca de 12THz, lo que comparado con el SBS es de cerca de seis ordenes de magnitud más que la ganancia del SBS. Esta mayor ganancia en ancho de banda permite acoplar canales diferentes en los sistemas WDM (multiplexación por división de longitud de onda, Wavelength Division Multiplexing), lo que causaría un menor desempeño debido al cross talk ocasionado por la degradación de la tasa de señal a ruido (Signal to Noise Ratio, SNR) en un sistema amplificado debido a la SRS. (Lee, 2000)

Todo esto indica que la dispersión estimulada de Raman, vendrá a imponer un límite fundamental en la capacidad de transmisión de las futuras redes ópticas de comunicación, sin embargo, el umbral SRS es lo suficientemente elevado en comparación con otros efectos no lineales que limitan las transmisiones ópticas.

### 2.3.2.3 El efecto óptico kerr

Este efecto se produce debido a que el índice de refracción de las fibras de sílice resulta ser dependiente de la intensidad óptica como se observa en la ecuación 2.2:

$$n = n_0 + n_2 I(t) \quad (2.2)$$

Donde  $n_0 \approx 1.5$ ,  $n_2 \approx 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  e  $I(t)$  es la intensidad óptica. (Lee, 2000).

Cabe recalcar que aunque el índice de refracción es una función que depende muy débilmente de la intensidad óptica, ya no se le puede considerar despreciable actualmente, esto debido a la elevada potencia de los amplificadores ópticos y las grandes distancias de transmisión que presentan los sistemas de comunicación ópticos actuales. La modulación de fase debido al índice refractivo dependiente de la intensidad, induce otros efectos no lineales, los cuales se verán a continuación:

#### 2.3.2.3.1 Modulación de la misma fase (SPM)

Como se dijo anteriormente, debido al índice refractivo dependiente de la intensidad se crean varios efectos no lineales, uno de ellos es la SPM (Self-Phase Modulation, SPM), la cual provoca un cambio de fase no lineal en una señal determinada mientras que se propaga a través de una fibra óptica, este desplazamiento de fase no lineal está dado por:

$$\phi_{NL} = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 I(t) z \quad (2.3)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la onda óptica, y  $z$  es la distancia de propagación. (Lee, 2000)

Se denomina modulación de misma fase, puesto que el desplazamiento de fase no lineal es dependiente de su propia forma de pulso. Si la amplitud del espectro es significativa, puede causar interferencias entre canales adyacentes en un sistema de multiplexación por división longitud de onda densa (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM). Incluso en un sistema de canal simple, el espectro ampliado podría causar una ampliación temporal de los pulsos ópticos significativa en presencia de la dispersión cromática. (P.Agrawal, 2002)

#### **2.3.2.3.2 Modulación de fase cruzada (CPM)**

El efecto Kerr provoca un segundo desplazamiento de fase no lineal, el cual es conocido como modulación de fase cruzada (Cross-Phase Modulation, CPM). CPM es un efecto de fase no lineal que se produce debido a los pulsos ópticos en otros canales (canales adyacentes). Por lo tanto, CPM se produce solamente en los sistemas de múltiples canales. En un sistema multicanal, el desplazamiento de fase no lineal de la señal en el centro de la longitud de onda es descrito por: (P.Agrawal, 2002)

$$\phi_{NL} = \frac{2\pi}{\lambda_i} n_2 z [I_i(t) + 2 \sum_{i \neq j} I_j(t)] \quad (2.4)$$

Como se observa en la ecuación, el primer término claramente corresponde a la SPM, mientras que el segundo es el que describe la modulación de fase cruzada CPM.

El efecto CPM es únicamente afecta a las transmisiones de señales cuando los pulsos en los otros canales están sincronizados con la señal se necesita transmitir. Cuando los pulsos en cada canal viajan a diferentes velocidades de grupo debido a la dispersión, los pulsos se deslizan sobre los otros mientras se propagan, de manera que no afectan a la

señal. La distancia de transmisión relativa para que dos pulsos de canales diferentes colisionen entre ellos se llama distancia walk-off ( $L_w$ ) y viene dada por la expresión:

$$L_w \approx \frac{T_0}{|D\Delta\lambda|} \quad (2.5)$$

Donde  $T_0$  es el ancho del pulso,  $D$  es el coeficiente de dispersión y  $\Delta\lambda = |\lambda_1 - \lambda_2|$ . (Lee, 2000)

Cuando el coeficiente de dispersión es elevado, la distancia walk-off es relativamente corta, y la interacción entre los pulsos de canales adyacentes no será significativa, lo que conlleva a un efecto reducido de modulación de fase cruzada. Sin embargo, la ampliación del espectro debido a la CPM induce a más distorsión temporal de la forma del pulso cuando se tiene una gran dispersión, lo que hace más complicado al efecto de dispersión en la CPM.

### **2.3.2.3.3 Mezcla de cuatro ondas (FWM)**

Un tercer efecto no lineal producido debido al índice refractivo dependiente de la intensidad es el conocido como mezcla de cuatro ondas (Four Wave Mixing, FWM), un efecto también conocido como mezcla de cuatro fotones. Este efecto se ve descrito por una interacción paramétrica entre ondas ópticas de manera muy parecida a la distorsión de intermodulación que se produce en los sistemas eléctricos. (P.Agrawal, 2002)

El efecto FWM igualmente es producido únicamente en sistemas multicanal, en los cuales, los choques entre dos o más canales causa la generación de una o más frecuencias a expensas de la pérdida de potencia de los canales originales. Para explicar claramente el funcionamiento de esta no linealidad se supone que se tiene tres ondas ópticas a frecuencias  $f_i$ ,  $f_j$  y  $f_k$ , que ingresan al núcleo de una fibra óptica, esto generará nuevos componentes de frecuencia definidos como  $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$ . El

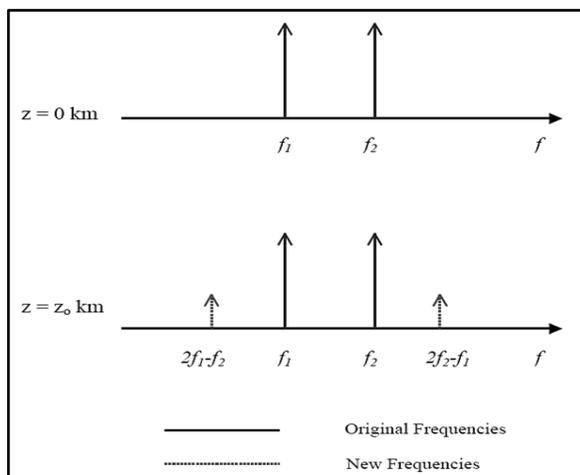
número de bandas laterales debido a la FWM se incrementa geométricamente de acuerdo a la expresión:

$$M = \frac{1}{2}(N_{ch}^3 - N_{ch}^2) \quad (2.6)$$

Donde M es el número de las bandas laterales creadas, y  $N_{ch}$  es el número de canales. (Lee, 2000)

De esta expresión se puede verificar que si se tienen 8 canales, esto generaría 224 bandas laterales adicionales, que podrían afectar directamente en los canales con señal óptica útil, es por eso que se hace necesaria una supresión de la mezcla de cuatro señales FWM, para evitar interferencias importantes entre los canales de señal y los componentes de frecuencia FWM. El ejemplo más simple para ilustrar este ejemplo es cuando se tienen únicamente dos señales continuas a las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  que ingresan a una fibra, en la gráfica siguiente se puede observar las bandas laterales adicionales que se generan.

Figura 4 Generación de bandas laterales debido FWM en un sistema de dos canales



Fuente: (Lee, 2000)

Estos efectos no lineales citados anteriormente, en un sistema real, especialmente en sistemas donde los canales se encuentran muy apegados entre ellos, la ampliación o ensanchamiento del espectro debido a los efectos no lineales resulta usualmente casi despreciable. Las degradaciones en el desempeño del sistema son en general evaluables mediante la solución de la ecuación no lineal de Schrödinger (NLSE), la cual se presentará en el tercer capítulo de la presente investigación.

## **2.4 Evolución y tendencia de la tecnología RoF**

La evolución de la red de área doméstica (HAN home area network) se determina por varias tendencias. Una de las principales es la proliferación de dispositivos conectados en el hogar, a través de la conexión de alta velocidad inalámbrica. En el futuro, la velocidad en la red de área doméstica (HAN) deberá llegar a 10 Gb/s. (Guillory, y otros, 2010)

La generación actual de los sistemas Wi-Fi (IEEE 802.11n) puede alcanzar teóricamente 600Mb/s y abordan la banda de ondas milimétricas no licenciadas comprendidas en la banda de frecuencia de 57 a 66 GHz. (MarcadorDePosición1) A estas velocidades de transmisión, las redes se pueden implementar con tecnologías alámbricas, pero en la actualidad se observa que los usuarios finales prefieren la conectividad inalámbrica para el enlace final, ya que la gran mayoría de equipos que se utilizan en la actualidad se manejan con conexiones inalámbricas. (Guillory, y otros, 2010)

Recientemente el estándar IEEE 802.11ad ha sido creado por el consorcio WiGig, el cual provee un ecosistema inalámbrico mundial de dispositivos de alto rendimiento interoperables y permite la creación de redes de área local inalámbrica y certificación de la alianza Wi-Fi. Como consecuencia, IEEE 802.11ad debe liderar la carrera multigigabit de sistemas inalámbricos. Sus aplicaciones y productos se encuentran disponibles desde el año 2011. (Joffray Guillory & Li, 2011)

Sin embargo, la limitación de los sistemas de red de área doméstica (HAN) es su corto alcance debido a la atenuación y al hecho de que las señales en la banda de 60 GHz no pueden atravesar las paredes, en consecuencia, su cobertura se ve limitada por este factor. El principal reto es encontrar soluciones para garantizar la cobertura de la red HAN, y para interconectar todos los dispositivos situados en habitaciones diferentes. Para resolver este problema se propone el uso de la tecnología de radio-sobre-fibra (ROF) para la distribución de señal de radio de 60 GHz a varios puntos de acceso. (Joffray Guillory & Li, 2011)

Para ampliar la cobertura, las tecnologías de *radio* sobre fibra (ROF) proporcionan una opción más prometedora. El alcance de red óptica pasiva (PON) y un sistema de ROF/PON híbrido se han propuesto para formar redes más eficientes y que provean multiservicios, el alcance requerido de una señal a 60 GHz es de 60 ~ 100 km.

Estos sistemas transportan señales ópticas sobre cableado de fibra hacia el usuario final, dependiendo de dónde termine la PON, el sistema puede ser descrito como “fibra hasta la acera” (Fiber-to-the-curb) o “fibra hasta el hogar” (Fiber-to-the-home). El sistema consta de una terminación de línea óptica (Optical Line Termination) en la central local, y de diversas unidades de red ópticas (Optical Network Units) próximas al cliente.

Recientemente, la implementación de redes PON utilizando multiplexación por división ortogonal de frecuencia (OFDM) es el objeto de numerosos trabajos de investigación. Debido a la alta eficiencia espectral de la modulación de amplitud en cuadratura (QAM) que se utiliza en la señal OFDM, se pueden utilizar componentes ópticos de bajo ancho de banda. Por otra parte, la transmisión de la señal OFDM permitiría una simple compensación capaz de mitigar eficazmente la dispersión cromática de la fibra. (B. Ftaich-Frigui & Carsenat, 2011)

La multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) ha sido ampliamente utilizada en las comunicaciones inalámbricas y consideradas como un esquema visible en las aplicaciones de 60 GHz. (Chia-Chien Wei & Jiang, 2012) En los últimos años, la

técnica OFDM ha emergido como un candidato prometedor para mejorar la eficiencia del espectro en un sistema de comunicaciones, esta técnica de multiplexación ha sido rápida y ampliamente adoptada en los sistemas inalámbricos, cableados y de difusión, para tratar de manera eficiente con las distorsiones lineales de la señal encontradas cuando se transmite a través de canales con un desvanecimiento dispersivo.

OFDM es una tecnología de modulación digital de las nuevas generaciones de productos y servicios de radio frecuencia de alta velocidad, siendo hoy en día el pilar fundamental de los sistemas móviles de cuarta generación (4G). (Dewar Willmer Rico Bautista\*, 2011)

La técnica de modulación OFDM, surge como alternativa para su uso en la red de acceso del tipo XDSL tanto de naturaleza alámbrica como inalámbrica, para poder cumplir con los nuevos requerimientos de ancho de banda, fiabilidad y seguridad exigidos por la próxima generación de productos y servicios principalmente en la radiofrecuencia de alta velocidad. Actualmente es utilizada en las redes inalámbricas 802.11a, 802.11g, en comunicaciones de alta velocidad por vía telefónica ADSL y en la difusión de la televisión digital terrestre. (Dewar Willmer Rico Bautista\*, 2011)

El uso de la tecnología OFDM se ha extendido recientemente a las comunicaciones ópticas debido a que la evolución en el procesamiento digital de señales DSP hace que sea factible el procesamiento de las señales a velocidades ópticas. La técnica de OFDM que la hace idónea para las transmisiones ópticas es que esta divide el flujo de datos de alta velocidad en una serie de flujos de datos de baja velocidad que se transmiten simultáneamente a través de un número de subportadoras de banda estrecha que se encuentran relacionadas armónicamente.

La multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) ha atraído mucho interés recientemente debido a su eficiencia espectral y la mejor tolerancia a daños de transmisión como la dispersión cromática (CD). La tecnología convencional OFDM tiene una subportadora que distribuye igualmente a la tasa de símbolos por subportadora

y usa formatos de dos cuadraturas para alcanzar la tasa de Nyquist, una de las condiciones requeridas para acercarse al límite de Shannon para maximizar el rendimiento de la información.

Los servicios inalámbricos para la comunicación de área personal (PAN) están evolucionando de la banda actual 2,4 / 5 GHz a la banda de 60GHz en respuesta a la creciente y rápida demanda de ancho de banda para diferentes aplicaciones de red emergentes. Con el fin de mejorar la capacidad del canal de comunicación inalámbrica, la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) se propone como una técnica de modulación líder para la próxima generación de la comunicación inalámbrica, debido a su gran ancho de banda, eficiencia y la facilidad de ecualización de canal. Aunque las comunicaciones inalámbricas funcionan a 60 GHz tienen menos trayectos múltiples a interferencias debido a la atenuación atmosférica alta, OFDM todavía está propuesto en algunos estándares inalámbricos tales como IEEE 802,16 por su alta eficiencia. Para conseguir capacidades de transmisión mayores a altas frecuencias en señales inalámbricas, la técnica de radio-sobre-fibra (ROF) se ha considerado por ser un método que presenta una atenuación de RF baja.

En la actualidad, los usuarios de telecomunicaciones demandan cada vez servicios innovadores (HDTV, vídeo bajo demanda, videoconferencia, etc.), y que sean ofrecidos sobre la misma infraestructura a unos precios cada vez más competitivos, y la fibra óptica es el medio de transmisión más avanzado y el único capaz de soportar los servicios de nueva generación. Las principales ventajas de tener un bucle de abonado de fibra óptica son muchas: mayores anchos de banda, mayores distancias desde la central hasta el abonado, mayor resistencia a la interferencia electromagnética, mayor seguridad, menor degradación de las señales, etc.

Varios estudios se han realizado sobre los sistemas de ROF para aplicaciones de 60 GHz, principalmente en temas relacionados a largo plazo, tales como la conversión ascendente de frecuencia óptica para la generación de señales de ondas milimétricas y de alta velocidad de los moduladores Mach- Zehnder. (Joffray Guillory & Li, 2011) Con

estas tecnologías, la señal óptica transmitida va a experimentar una pérdida tan baja como 0,2 dB / km si la ventana de comunicación estándar utiliza fibra monomodo (SMF) en un rango de longitud de onda de 1530-1560 nm.

Para sistemas con modulación externa usando el MZM, se han alcanzado transmisiones hasta de 14 Gbps con portadoras de 60 GHz utilizando modulaciones de desplazamiento en fase binaria (BPSK, Binary phase shift keying) y con portadoras hasta 40 GHz utilizando modulaciones de amplitud (m-ASK, amplitude shift keying).

Como una tendencia de la tecnología de RoF, se tiene la tecnología de la comunicación de la banda de los TeraHertz (THz), la cual se ha convertido en una parte fundamental de todos los sistemas de comunicación como la fibra óptica, la comunicación inalámbrica y RoF (Radio-over-Fiber). La comunicación THz tiene una tasa de transmisión de datos efectivos de 1 Tbit/sec, es decir, se comunican con una onda portadora en THz, con un rango de frecuencia de 100 GHz a 10 THz. Las señales en THz son generadas por transiciones cuánticas de la luz, que genera una intensidad muy alta tanto para la transición entre las fuentes eléctricas y las fuentes fotónicas. La tecnología en THz se está convirtiendo en la parte importante en la comunicación de alta velocidad, uno de ellos es ROF, donde la red inalámbrica (Wi-Fi) se incorpora con la comunicación óptica y la radiofrecuencia con WDM y las ondas milimétricas. La arquitectura de una onda mm de fibra inalámbrica se compone de la oficina central (CO), la cual está conectada a un gran número de antenas en la estación base (BS) a través de una red de fibra óptica, tales como RF-sobre-fibra, IF-sobre-fibra y banda base-sobre-fibra. Estas técnicas se utilizan para la transmisión mediante un modulador Mach-Zehnder (MZ) que se utiliza para generar la frecuencia de la portadora óptica requerida para proporcionar el enlace punto-a-punto y enlaces punto a multipunto. (S. Pipatsarta, 2011).

Los sistemas de RoF se están utilizando para muchas aplicaciones inalámbricas, tales como la fibra al hogar (fiber-to-the-home FTTH), el sistema universal de telecomunicaciones móviles (UMTS), la red vehicular ad-hoc (VANET) y el sistema

microcelular. El sistema microcelular propone el uso de ROF para sistemas celulares mediante el intercambio de una fuente óptica a la BS entre todas las microcélulas, donde la reutilización de frecuencias se realiza mediante la modulación externa de la portadora óptica para mejorar la capacidad del canal. El sistema RoF para VANET es utilizado por el sistema de transporte inteligente (ITS), que sirve a numerosas aplicaciones en el área de sistema de monitoreo vehicular, como el tráfico, las condiciones del tráfico, alertas de tráfico, y el servicio en carretera. Estas aplicaciones funcionan para diferentes tecnologías como la red de área local (WLAN) o (WiFi), y la red WiMAX o celulares, en el que estos modelos vinculan tanto alambre y medios inalámbricos. La frecuencia en THz del sistema RoF ofrece tecnologías para mejorar aún más la capacidad y la seguridad en los futuros sistemas de comunicaciones. (S. Pipatsarta, 2011)

## **2.5 Dispositivos y pruebas experimentales recientes**

En la actualidad, la tecnología de radio sobre fibra se encuentra en desarrollo, esto debido a que posee varios factores que limitan directamente este tipo de transmisiones, como son los factores físicos de la fibra óptica, la modulación óptica, la atenuación que sufren las ondas milimétricas, entre otros. Existen varias publicaciones de artículos científicos respecto a este tema de investigación en la actualidad, las cuales buscan solucionar estas limitaciones y mejorar las comunicaciones basadas en RoF, y aunque adicionalmente existen estudios experimentales de este tipo de tecnología, pocos estudios buscan analizar esta tecnología mediante simulaciones en software, razón por la cual en la presente investigación se busca realizar una simulación específica de radio sobre fibra mediante software, ya que este tipo de investigación no ha sido publicado hasta la presente.

Los últimos estudios referentes a esta tecnología se revisan brevemente a continuación:

Se ha demostrado de manera experimental, un enlace bidireccional de radio sobre fibra (RoF), con modulación de banda lateral única (Single Side Band, SSB), con señales OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), Multiplexación por división de

frecuencias ortogonales para el enlace de bajada y reutilizando la longitud de onda para el enlace de subida, en el cual una de las dos portadoras es débilmente modulada y filtrada para la reutilización de la longitud de onda.

La transmisión de la señal QAM (Quadrature amplitude modulation), modulación de amplitud en cuadratura, o la 64-QAM en la portadora óptica se demuestra hasta la distancia máxima de 56 km, cabe recalcar que en este estudio no se toma en cuenta compensaciones por atenuación y dispersión cromática. (Zhang, y otros, 2011)

Ya que la modulación óptica constituye un pilar fundamental para los enlaces de radio sobre fibra, se ha presentado un trabajo que consiste en la generación de frecuencia de portadora variable y una técnica para la conversión de subida de los datos en los enlaces RoF para lo cual, se utiliza un modulador Mach-Zehnder dual en paralelo para la modulación de modo simple (Simple Mode Modulation, SSM), mientras que para la generación de frecuencias de portadora variable, se utiliza el factor dispersivo estimulado Brillouin (SBS) con 3 configuraciones distintas. Con esta investigación se consigue que la señal portadora pueda ser ajustada en el transmisor para alcanzar una mejor sensibilidad en el desempeño del receptor en el sistema de RoF, simplemente modificando la potencia en el proceso SBS. (Li, Zhu, Wang, Qi, & Xie, 2011)

Además siempre se ha buscado alcanzar mayor ancho de banda y más capacidad en los enlaces RoF, por lo cual se ha publicado una investigación en la cual se busca generar una señal óptica de banda lateral única (Single Side Band,SSB) de ondas milimétricas, para duplicar la frecuencia que se obtiene mediante el uso del modulador de Mach-Zehnder (MZM), e investigar el principio generador de SSB. En este trabajo, los datos full dúplex, se transmiten sobre 40 km de fibra monomodo a 2.5 Gb/s con una atenuación de 2 dB. Los resultados obtenidos muestran que esta técnica para generar señales ópticas es factible y que se puede obtener una configuración muy eficiente en costos y en distancias de transmisión. (Xiao & Yu)

Existen varios factores no lineales que producen distorsión en las comunicaciones sobre fibra óptica, para reducir esta distorsión no lineal en dispositivos eléctricos, moduladores ópticos y en la fibra óptica, se ha presentado un trabajo en el que se adopta una técnica de codificación para reducir la potencia del pico al promedio mediante el uso de la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) en un sistema de radio sobre fibra OFDM. Con esta técnica, los resultados experimentales muestran que la sensibilidad del receptor es relativamente baja para una transmisión de la señal OFDM a 2.98 Gb/s sobre una fibra monomodo de 50 km (Li, Yu, Cao, Xiao, Chen, & Chen, 2012)

Es en los últimos años de investigación de las comunicaciones ópticas en los que se ha ido adoptando a la multiplexación OFDM como la más apta para implementar la tecnología RoF a futuro. Esto no resulta una sorpresa, ya que la técnica OFDM se utiliza ya en varias tecnologías de comunicación inalámbrica como son las normas de televisión digital terrestre DVB-T e ISDB-T, la radio digital, el protocolo de red de área local IEEE 802.11 a/g/n también conocido como Wireless Lan, Wimax, LTE, entre otros. Debido a esto, las investigaciones de la tecnología de radio sobre fibra se han ido orientando a las señales con multiplexación OFDM como se verá a continuación en los artículos que se han ido publicando.

Para mejorar la transmisión de las señales OFDM en un sistema RoF a 60 GHz sobre una fibra óptica monomodo de 100 km, se ha propuesto un algoritmo de carga de bits adaptativo. Considerando el ruido de fase por dispersión inducida, se han investigado las capacidades máximas después de transmitir la señal por diferentes distancias de fibra tomando en cuenta la supresión de ruido de fase y sin tomarla en cuenta mediante el algoritmo presentado.

Cuando un láser DFB (distributed – feedback) con ancho del haz de 1.3 a 4.1 MHz se modula para portar las señales de radio, el algoritmo para la supresión de ruido de fase PNS, que no necesita de tonos piloto que consumen ancho de banda, puede alcanzar hasta un 15.3 % de incremento en la capacidad. (Wei, Lin, I Chao, & Jiang, 2012)

Entre las últimas investigaciones relevantes de la tecnología RoF, está la transmisión de señales de radio OFDM-UWB, en sistemas de comunicaciones ópticas basados en detectores IM-DD (Detectores directos de modulación de intensidad), en la cual se trata de optimizar esta transmisión de manera teórica y con una simulación numérica, para dicha optimización, se utiliza dos moduladores Mach-Zehnder (MZM), en paralelo para la conversión electro-óptica de la señal, es decir, para modular la señal de radio en las ondas ópticas milimétricas, como resultado de esto se obtiene mayor robustez en el sistema y menor sensibilidad a los componentes de dispersión de segundo y tercer orden. (Alves & Cartaxo, 2013)

La técnica de OFDM divide el flujo de datos de alta velocidad en una serie de flujos de datos de baja velocidad que se transmiten simultáneamente a través de un número de subportadoras de banda estrecha que se encuentran relacionadas armónicamente. La reducción de la separación entre las subportadoras OFDM da como resultado una mejora en la eficiencia del ancho de banda; Para este propósito se ha propuesto la técnica de multiplexación fast-OFDM (FOFDM) con el principal objetivo de reducir los costos de los componentes del transceptor (DAC y ADC). El diseño de la arquitectura de FOFDM reduce los esfuerzos de ingeniería en hardware y software, al mismo tiempo que reduce la complejidad mediante operaciones reales sin sacrificar el rendimiento del sistema, además debido a su simplicidad FOFDM ofrece no solo cálculos simples, sino también una disminución correspondiente en la potencia de procesamiento. (E. Giacomidis & Tomkos, 2012)

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS Y SIMULACIÓN

#### 3.1. Introducción

El presente capítulo se centra la investigación y análisis de los dos modelos matemáticos elegidos para modelar una fibra monomodo tomando en cuenta los factores de atenuación y dispersión, para posteriormente implementarlos mediante software en una arquitectura de Radio sobre fibra RoF. Cada modelo matemático se implementará con una arquitectura diferente, es decir, se tienen dos arquitecturas RoF, una por cada modelo matemático elegido, lo cual posteriormente permitirá realizar una comparación en el desempeño de los dos modelos matemáticos elegidos, para verificar cuál de los dos se ve menos afectado por atenuación y factores dispersivos, además se verificará cuál de las dos presenta una implementación más sencilla, menor costo de implementación y menor costo computacional (tiempo de simulación).

La simulación del enlace RoF se la realiza en dos simuladores distintos, Matlab y OptSim. Matlab es un entorno que maneja un lenguaje de alto nivel para el cálculo numérico, visualización y programación, esta herramienta permite analizar datos, desarrollar algoritmos así como crear modelos y aplicaciones que pueden ser implementadas en un sinnúmero de áreas, como son la investigación científica, sistemas de control, computación financiera, procesamiento de señales, comunicaciones. etc.

El software especializado OptSim, está construido sobre un poderoso entorno de simulación de sistemas que incluye una interfaz gráfica de usuario (GUI), múltiples motores de simulación, poderosas utilidades de post proceso de datos y sofisticados modelos de componentes para el diseño y simulación de sistemas de comunicaciones ópticos.

### 3.2. Análisis de modelos matemáticos para fibra óptica monomodo

A continuación se presenta el análisis de los dos modelos matemáticos utilizados para la simulación de una fibra óptica tomando en cuenta los factores de atenuación y dispersivos. El desarrollo de los modelos parte de la ecuación no lineal de Schrödinger, la cual rige la propagación de las ondas de luz en una fibra óptica, estos modelos representan algoritmos numéricos que permiten solucionar dicha ecuación; entre los más comunes se tienen el método Split-Step Fourier (SSF), el método Split-Step Fourier Simétrico (SSSF) y el método Time Domain Split Step (TDSS), los cuales se analizan con más detalle en el presente capítulo. (Lee, 2000)

#### 3.2.1 Modelos matemáticos basados en la ecuación no lineal de Schrödinger

La propagación de las ondas electromagnéticas está gobernada por las ecuaciones de Maxwell, estas ecuaciones en el caso de la propagación de ondas en una fibra monomodo permiten obtener la ecuación de onda que se presenta a continuación:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

Donde E es el vector de campo eléctrico,  $\mu_0$  es la permeabilidad en el vacío, c es la velocidad de la luz y P es el campo de densidad de polarización. Esta ecuación es la que muestra cómo se propaga una onda óptica en una fibra monomodo. (Lee, 2000)

Para resolver esta ecuación, primero se debe determinar la relación existente entre el vector de campo de densidad de polarización P y el vector de campo eléctrico E. En general, para realizar esto se utiliza una aproximación de mecánica cuántica, pero si la frecuencia óptica aplicada está lo suficientemente alejada de las resonancias medias, lo que implica que la longitud de onda del campo está entre 0.5 y 2.2  $\mu m$  ( $140 \text{ THz} < f_c < 600 \text{ THz}$ ), solo entonces se puede aproximar como que si se tratara de un dipolo

eléctrico, con lo cual el vector de polarización  $P$  a bajas potencias ópticas muestra una relación lineal con el vector de campo eléctrico  $E$ :

$$\begin{aligned}
 P_L(r, t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} X^{(1)}(t - t_1) E(r, t_1) dt_1 \\
 + \varepsilon_0 \iint_{-\infty}^{\infty} X^{(2)}(t - t_1, t - t_2) E(r, t_1) E(r, t_2) dt_1 dt_2 \\
 + \varepsilon_0 \iiint_{-\infty}^{\infty} X^{(3)}(t - t_1, t - t_2, t - t_3) E(r, t_1) E(r, t_2) E(r, t_3) dt_1 dt_2 dt_3 ..
 \end{aligned}$$

(3.2)

Donde  $\varepsilon_0$  es la permitividad del vacío,  $X^{(1)}$  es la susceptibilidad de primer orden,  $X^{(2)}$  es la susceptibilidad de segundo orden y así sucesivamente.

- $X^{(1)}$  - Es la susceptibilidad lineal. Sus efectos se incluyen en el índice de refracción lineal  $n_0$  y el coeficiente de atenuación  $\alpha$ . (Varallyay, 2007)
- $X^{(2)}$  - Es la susceptibilidad de segundo orden, esta susceptibilidad es responsable de la generación del segundo armónico y la generación de suma de frecuencias. Es distinto de cero sólo para los medios de comunicación que tiene una falta de simetría en nivel molecular. El silicio ( $\text{SiO}_2$ ) es una molécula simétrica, por lo tanto  $X^{(2)}$  se anula para cristales de silicio. (Varallyay, 2007)
- $X^{(3)}$  - Es la susceptibilidad de tercer orden, es responsable de la generación del tercer armónico, la mezcla de cuatro ondas FWM y la refracción no lineal. (Varallyay, 2007)

Para tener en cuenta las no linealidades de la fibra, el vector de polarización se puede escribir en dos partes:

$$P = P_L + P_{NL} \quad (3.3)$$

Donde  $P_L$  denota la parte no lineal del vector, mientras que  $P_{NL}$  corresponde a la parte no lineal y están definidos de la siguiente manera:

$$P_L = \varepsilon_0 X^{(1)} E \quad (3.4)$$

$$P_{NL} = \varepsilon_0 X^{(3)} E E E \quad (3.5)$$

Como se puede observar en la ecuación (3.5), la parte no lineal de la polarización usualmente viene determinada por la susceptibilidad de tercer orden en las fibras de sílice, y corresponde al tercer término de la ecuación (3.2). (Varallyay, 2007)

$$P_L(r, t) = \varepsilon_0 \iiint_{-\infty}^{\infty} X^{(3)}(t - t_1, t - t_2, t - t_3) E(r, t_1) E(r, t_2) E(r, t_3) dt_1 dt_2 dt_3 \quad (3.6)$$

Esta susceptibilidad de tercer orden podría tener hasta 81 términos diferentes, sin embargo, en un medio isotrópico como la fibra óptica monomodo operando muy alejado de algún tipo de resonancia, el número de términos independientes en la susceptibilidad de tercer orden se reduce a uno. Para resolver la ecuación de la propagación de onda (3.1), generalmente se hacen una serie de simplificaciones como:

- La parte no lineal del vector de polarización  $P_{NL}$  es tratada como una perturbación pequeña comparada con la parte lineal  $P_L$  (los efectos no lineales son débiles en fibras de sílice).
- Se asume que el campo óptico mantiene su polarización a lo largo de la fibra óptica.
- Se asume que la diferencia entre los índices del núcleo y el revestimiento de la fibra es muy pequeña.

- Se asume que la frecuencia central de la onda es mucho más grande que la anchura espectral de la misma, es decir que el campo óptico es cuasi-monocromático ( $\Delta\omega/\omega_0 \ll 1$ , donde  $\omega_0$  es la frecuencia central y  $\Delta\omega$  es la anchura espectral).

El hecho de asumir un campo óptico cuasi-monocromático, es análogo al modelado equivalente pasa bajos de los sistemas eléctricos pasa banda. Finalmente, la constante de propagación  $\beta(\omega)$ , se aproxima mediante los primeros términos de la expansión de las series de Taylor acerca de la frecuencia portadora  $\omega_0$ , y se escribe como: (Lee, 2000)

$$\beta(\omega) = \beta_0 + (\omega - \omega_0)\beta_1 + \frac{1}{2}(\omega - \omega_0)^2\beta_2 + \frac{1}{6}(\omega - \omega_0)^3\beta_3 + \dots \quad (3.7)$$

Dónde:

$$\beta_n = \left[ \frac{d^n \beta}{d\omega^n} \right]_{\omega=\omega_0}$$

La constante de propagación de segundo orden  $\beta_2$  [ $\text{ps}^2/\text{km}$ ], es la que toma en cuenta los efectos dispersivos en los sistemas de comunicación por fibra óptica. Dependiendo del signo de  $\beta_2$ , la región de dispersión se puede clasificar en dos regiones, normal cuando ( $\beta_2 > 0$ ) y anómala cuando ( $\beta_2 < 0$ ). Cuantitativamente en la región de dispersión normal, las componentes de frecuencia más alta de una señal óptica viajan más lento que los componentes de frecuencia más baja, en cambio en la región de dispersión anómala, ocurre lo contrario. (Lee, 2000)

La dispersión en la fibra es a menudo expresada por otro parámetro, D [ $\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ], conocido como parámetro de dispersión, el cual tiene el signo opuesto a  $\beta_2$  y se define como:

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{1}{V_g} \right) \quad (3.8)$$

Y la relación entre  $\beta_2$  y D está dada por:

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda y  $V_g$  es la velocidad de grupo. (Lee, 2000)

Los términos de orden mayor a  $\beta_2$  en la ecuación (3.7) son generalmente despreciables mientras se asuma el campo óptico cuasi-monocromático.

Si se asume que el campo eléctrico de entrada se propaga en la dirección del eje z positivo y se encuentra polarizada en la dirección x, la ecuación (3.1) se convierte en: (Lee, 2000)

(3.9)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} e(z, t) &= -\frac{\alpha}{2} E(z, t) \quad (\text{Atenuación lineal}) \\ +j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} E(z, t) &\quad (\text{Dispersión de segundo orden}) \\ + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial z^3} E(z, t) &(\text{Dispersión de tercer orden}) \\ -j\gamma |E(z, t)|^2 E(z, t) &\quad (\text{Efecto Kerr}) \\ -j\gamma T_R \frac{\partial}{\partial t} |E(z, t)|^2 E(z, t) &\quad (\text{Dispersión SRS}) \\ -\frac{\gamma}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} |E(z, t)|^2 E(z, t) &\quad (\text{Efecto self-steepening}) \end{aligned}$$

Dónde:

$A(z,t)$ = el entorno lentamente variable del campo eléctrico.

$z$ = distancia de propagación.

$t=t'-z/V_g$  ( $t'$ =tiempo físico,  $V_g$ =velocidad de grupo en la longitud de onda central)

$\alpha$ = el coeficiente de atenuación de la fibra [1/km]

$\beta_2$ = la constante de propagación de segundo orden [ $\text{ps}^2/\text{km}$ ]

$\beta_3$ = la constante de propagación de tercer orden [ $\text{ps}^3/\text{km}$ ]

$\gamma$ = el coeficiente no lineal =  $2\pi n_2/(\lambda_0 A_{\text{eff}})$

$n_2$ = el coeficiente del índice no lineal

$A_{\text{eff}}$ = el área efectiva del núcleo de la fibra

$\lambda_0$ = la longitud de onda central

$\omega_0$ = la frecuencia angular central

$T_R$ = La pendiente de la ganancia de Raman ( $\sim 5\text{fs}$ ).

La ecuación (3.9) es conocida como la ecuación no lineal generalizada de Schrödinger, y es conocida porque puede ser aplicada en propagación de pulsos de duración corta de aproximadamente  $\sim 50\text{fs}$ . Esto corresponde a una anchura espectral de  $\sim 20\text{THz}$ . Cuando el ancho del pulso es mayor a 1ps, la ecuación (3.9) puede ser considerablemente simplificada debido a que el término del coeficiente Raman y el término del efecto de auto empinamiento (self-steepening) resultan despreciables comparados con el término del efecto Kerr, de esta manera la ecuación (3.9) queda de la siguiente manera: (Varallyay, 2007)

$$\frac{\partial E(z,T)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}E - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} + i\gamma|E|^2E \quad (3.10)$$

La ecuación diferencial obtenida (3.10), describe la propagación de la luz en una fibra no lineal dispersiva con atenuación, esta ecuación a menudo se conoce como la ecuación no lineal de Schrödinger en el caso de que  $\alpha = 0$ .

El primer término de la ecuación describe a la atenuación en la fibra, el segundo término describe la dispersión por velocidad grupo mientras que la no linealidad o el efecto SPM (modulación de misma fase) está determinado por el tercer término con dependencia de la intensidad. (Varallyay, 2007)

### 3.2.1.1 Método Split-Step Fourier

La ecuación lineal de Schrödinger, no permite su resolverla de manera analítica cuando están presentes los factores de dispersión y la no linealidad en la fibra, es por esta razón que varios algoritmos numéricos han sido desarrollados para resolver la ecuación. El método Split-Step Fourier es uno de ellos, y es uno de los más populares ya que requiere de un costo de procesamiento relativamente bajo y presenta una muy buena precisión.

Considerando una ecuación NLS simple, la cual contiene los términos de atenuación, dispersión y no linealidad, la solución de esta ecuación por el método SSF, se la realiza de la siguiente manera:

Se escribe la ecuación (3.10) en la siguiente forma: (Varallyay, 2007)

$$\frac{\partial E(z,t)}{\partial z} = |\mathbf{L} + \mathbf{N}|E(z, t) \quad (3.11)$$

Siendo  $\mathbf{L}$  y  $\mathbf{N}$  son las partes lineales y no lineales de (3.10), respectivamente, donde:

$$\mathbf{L} = -\frac{\alpha}{2}E - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} \quad (3.12)$$

$$N = i\gamma|E|^2E \quad (3.13)$$

Posteriormente, integrando la ecuación (3.11) a lo largo de  $z$ , usando un intervalo de espacio  $\Delta z$ , se obtiene la solución escrita de la siguiente manera:

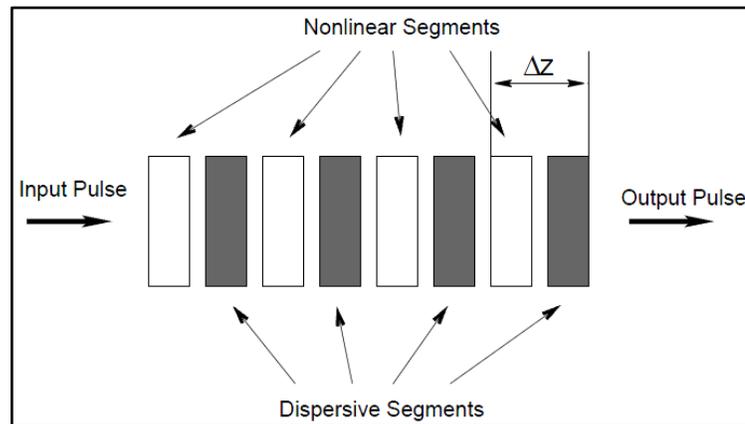
$$E_m = (z + \Delta z, t) = \exp[\Delta z(L + N)]E(z, T) \quad (3.14)$$

En esta ecuación se pueden implementar fácilmente los efectos del operador lineal  $L$ , porque las derivadas respecto al tiempo se transforman en multiplicaciones en el espacio de Fourier con:  $(i\omega)^n$  donde  $n$  es el orden  $n$ -ésimo de la derivada.

$$\exp[\Delta zL]E(z, T) = \{F^{-1}\exp[\Delta zL(i\omega)]F\}E(z, T) \quad (3.15)$$

Donde  $F$  denota la transformada de Fourier,  $F^{-1}$  la transformada inversa de Fourier y  $L(i\omega)$  la transformada de Fourier de  $L$  que se obtiene de la ecuación (3.12). (Varallyay, 2007)

Figura 5 Ilustración esquemática del cálculo método Split-Step Fourier



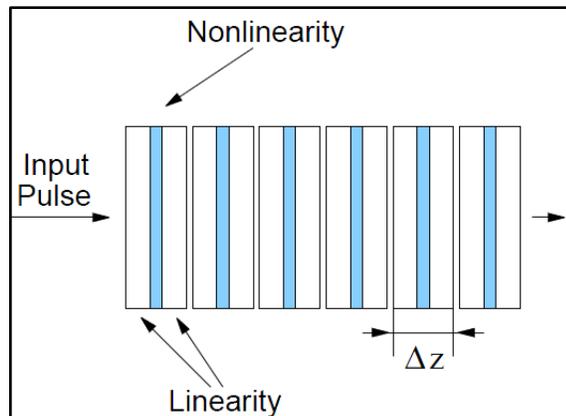
Fuente: (Varallyay, 2007)

### 3.2.1.2 Método Split-Step Fourier Simétrico o de segundo orden

Dentro del método Split-Step Fourier existen dos variantes del mismo, el SSF de primer orden, y el SSF de segundo orden. El método que es de interés en esta investigación es el de segundo orden o simétrico, ya que es el que será implementado en software.

El método Split-Step Fourier simétrico o de Segundo orden incluye el efecto de la no linealidad en la mitad de los segmentos lineales como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 6 Ilustración esquemática del método SSF simétrico, se observa que la no linealidad actúa en el centro del segmento



Fuente: (Varallyay, 2007)

En el procedimiento SSF simétrico, la ecuación (3.14) es reemplazada por: (Varallyay, 2007)

$$E(z + \Delta z, T) \cong \exp \left[ \frac{\Delta z}{2} \mathbf{L} \right] \exp \left[ \int_z^{z+\Delta z} \mathbf{N}(z') dz' \right] \exp \left[ \frac{\Delta z}{2} \mathbf{L} \right] E(z, T) \quad (3.16)$$

Donde L y N son los operadores lineales y no lineales respectivamente, la integral en la ecuación anterior, puede ser aproximada por la regla trapezoidal de la siguiente manera:

$$\int_z^{z+\Delta z} N(z') dz' \approx \frac{\Delta z}{2} [N(z) + N(z + \Delta z)] \quad (3.17)$$

Este método se lo puede realizar en siete pasos dentro de un paso espacial  $\Delta z$ :

- Paso 1. Transformada rápida de Fourier FFT:  $E_1 = FE(z, t)$
- Paso 2. Paso semi lineal:  $E_2 = e^{\frac{\Delta z}{2}L}E_1$
- Paso 3. Transformada inversa de Fourier IFFT:  $E_3 = F^{-1}E_2$
- Paso 4. Paso no lineal:  $E_4 = e^{\Delta z N}E_3$
- Paso 5. Transformada rápida de Fourier:  $E_5 = FE_4$
- Paso 6. Paso semi lineal:  $E_6 = e^{\frac{\Delta z}{2}L}E_5$
- Paso 7. Transformada inversa de Fourier IFFT:  $E_7 = F^{-1}E_6$

Este método da la posibilidad de calcular el operador no lineal con la ayuda de un proceso de iteraciones de manera precisa. Usualmente dos iteraciones son suficientes en cada segmento Split-Step para alcanzar una buena precisión. (Varallyay, 2007)

### 3.2.1.3 Método Time Domain Split Step TDSS

Para el método TDSS, se parte igualmente de la ecuación NLSE (3.10), y a diferencia del SSF, el método TDSS toma en cuenta la dispersión de tercer orden, de esta manera las ecuaciones (3.12) y (3.13) quedan de la siguiente forma:

$$L = -\frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 E}{\partial T^3} \quad (3.18)$$

$$N = i\gamma e^{-\alpha z} |E|^2 E \quad (3.19)$$

En la ecuación (3.18), el término  $\beta_2$  describe la dispersión de tercer orden, para este caso se asume que los dos operadores  $\mathbf{L}$  y  $\mathbf{N}$  actúan independientemente, y el cálculo se realiza en dos pasos, en el primer paso solo existe la dispersión ( $\mathbf{N}=0$ ) y en el segundo paso solo existen los efectos no lineales ( $\mathbf{L}=0$ ), con lo cual la solución a (3.10) está dada por: (Xun Li, 2005)

$$A'(z + \Delta z, w) = H_D(w)F[A(z, T)] \quad (3.20)$$

$$A(z + \Delta z, T) = \exp(i\Delta z \gamma e^{-\alpha z} |F^{-1}[A'(z + \Delta z, w)]|^2) F^{-1}[A'(z + \Delta z, w)] \quad (3.21)$$

En la ecuación (3.20),  $F$  denota la transformada de Fourier y en la ecuación (3.21),  $F^{-1}$  denota la transformada inversa de Fourier. La función de transferencia en frecuencia  $H_D(w)$  esta dada por: (Xun Li, 2005)

$$H_D(w) = e^{i(\frac{1}{2}\beta_2\Delta z\omega^2 - \frac{1}{2}\beta_3\Delta z\omega^3)} \quad (3.22)$$

Las ecuaciones (3.20) y (3.22) forman el algoritmo Frequency Domain Split Step (FDSS). Para cambiar este proceso al dominio de tiempo sin sacrificar su precisión, primero se construye la función polinomial: (Xun Li, 2005)

$$H_F(\omega) = \sum_{k=0}^M h_k e^{i\omega\Delta k} \quad (3.23)$$

Donde  $\Delta$  denota el intervalo de muestreo en el dominio de tiempo y  $h_k$  los coeficientes a ser determinados que deben concordar con la función de transferencia  $H_F(\omega)$ . Luego se reemplaza (3.22) en (3.23) y se obtiene:

$$A'(z + \Delta z, w) = \sum_{k=0}^M h_k e^{i\omega\Delta k} F[A(z, T)] \quad (3.24)$$

Si se convierte la ecuación (3.24) al dominio del tiempo, se obtiene: (Xun Li, 2005)

$$F^{-1}[A'(z + \Delta z, w)] = \sum_{k=0}^M h_k A(z, T - k\Delta) \quad (3.25)$$

Finalmente las ecuaciones (3.21) y (3.25) forman el algoritmo Time Domain Split Step donde la propagación lineal es evaluada mediante un filtro digital FIR con longitud  $M+1$ . Para el proceso de propagación solo se abarcan operaciones de suma y multiplicación, de la misma manera, los coeficientes del filtro digital solo necesitan ser calculadas una vez para un sistema determinado.

El método TDSS utiliza el filtrado digital en lugar de la transformada de Fourier para evitar el procesamiento en el dominio de la frecuencia, ya que a diferencia de los métodos que trabajan en frecuencia, el método de filtrado digital solo necesita procesar la cantidad exacta de la señal de entrada evitando cargas de procesamiento innecesarias. (He & Li, 2010)

### 3.2.2 Funcion de transferencia de la fibra óptica

La función de transferencia que modela la propagación del campo eléctrico a lo largo de una fibra de longitud  $L$  viene dada por: (Pascual, 2000)

$$H(\omega) = \exp [(-\alpha/2 - j \beta(\omega))L] \quad (3.26)$$

Donde  $\alpha$  representa las pérdidas (expresadas normalmente en dB/Km) y  $\beta(\omega)$  es la constante de propagación.

Desarrollando en series de Taylor este último término alrededor de la frecuencia central  $\omega_0$  se obtiene:

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6}\beta_3(\omega - \omega_0)^3 + \dots \quad (3.27)$$

Con:

$$\beta_m = \left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega = \omega_0} \quad (m=0,1,2,3,\dots) \quad (3.28)$$

Los coeficientes  $\beta_m$  con  $m \geq 2$  son los responsables de la dispersión cromática,  $\beta_1$  determina la velocidad a la cual se propaga la información.  $\beta_2$  suele utilizar el parámetro  $D$  para caracterizar el primer orden de las fibras. La relación entre ambos es la siguiente:

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (3.29)$$

Con  $\lambda$ : la longitud de onda óptica y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío. Para las fibras monomodo operando en tercera ventana se tiene un valor típico  $D = 17$  ps(km-nm).

Para modelar la fibra puede utilizarse la función de transferencia. Despreciando los efectos dispersivos de segundo orden caracterizados por el coeficiente  $\beta_3$ , así como el retardo constante  $\beta_1 L$  que introduce la fibra y que no distorsiona la señal, se llega finalmente a la expresión. (Pascual, 2000)

$$H(\omega_e) = \exp\left[-\frac{\alpha}{2} + j \frac{\lambda^2 D}{4\pi c} \omega_e^2\right] L \quad (3.30)$$

Donde además se ha realizado el cambio de variable  $\omega_e = \omega - \omega_0$  para desplazar el origen de la función de transferencia hasta la frecuencia de la portadora óptica.

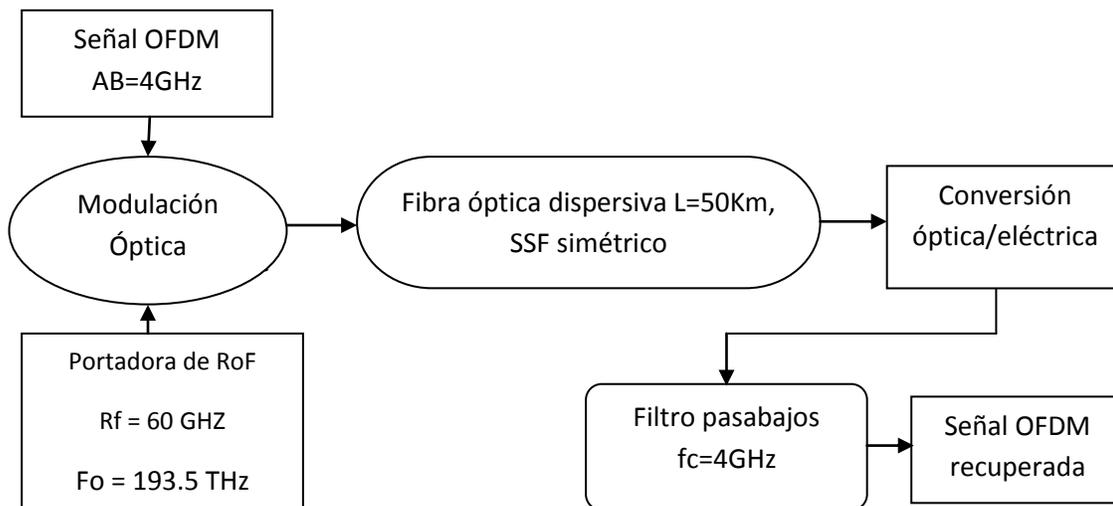
En la ecuación de la función de transferencia (3.30) se observa que el retardo de grupo depende con la frecuencia de la forma  $\tau(\omega_e) = -\lambda^2 D L \omega_e / 4\pi c$ , esto ocasiona que la señal multicanal recuperada no sea exactamente igual a la señal transmitida, ya que se generan productos de intermodulación que degradan la calidad del sistema. La función de transferencia es un parámetro importante para caracterizar los sistemas de comunicaciones ópticas analógicas.

### 3.3 Arquitectura y simulación del enlace RoF a 60 GHz

#### 3.3.1 Arquitectura y simulación del modelo basado en el método Split-Step Simétrico

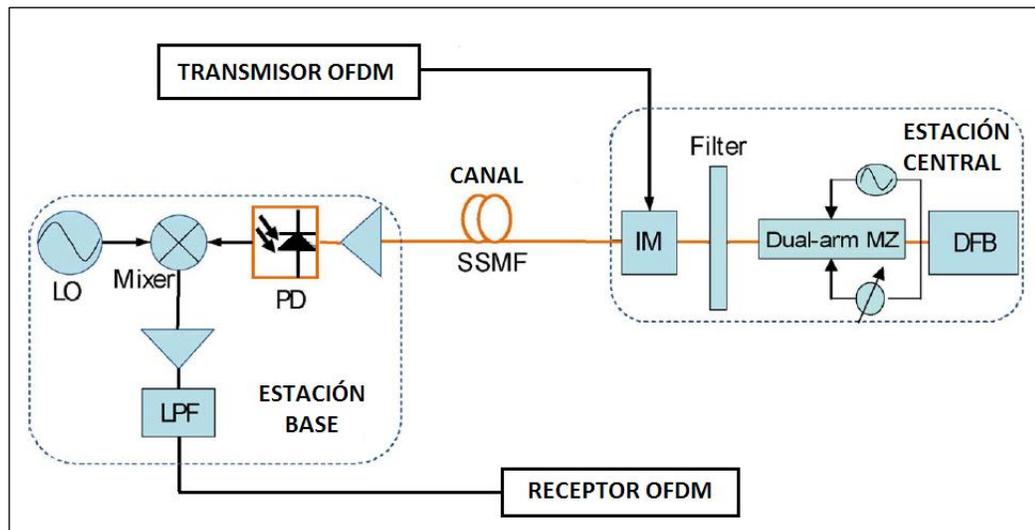
La simulación del enlace RoF en el software de cálculo matemático Matlab basado en el método Split-Step Simétrico, consiste en generar una señal OFDM en banda base y modularla en una portadora óptica milimétrica a 1550nm de longitud de onda, para posteriormente transmitirla por una fibra óptica tomando en cuenta los efectos dispersivos y de atenuación que se producen en este tipo de enlaces. La longitud de fibra óptica simulada para la transmisión es de 50Km, y para su simulación en Matlab, se utiliza un algoritmo que sigue los pasos del punto 3.2.1.2, es decir se modela a la fibra óptica mediante el algoritmo del método Split-Step de segundo orden o simétrico. Posteriormente a la transmisión de la señal por medio de la fibra, se realiza la conversión óptica – eléctrica de la señal recibida, y se le aplica un filtro pasa bajos para recuperar la señal OFDM original y poder verificar su atenuación y los cambios que presenta respecto a la señal original. Para ilustrar esto a continuación se muestra un diagrama de bloques del programa implementado.

Figura 7 Diagrama de bloques del modelo RoF implementado en Matlab



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Figura 8 Arquitectura del sistema RoF a 60GHz detallada con sus elementos principales



Fuente: (Zizheng Cao & Chen, 2010)

El modelo implementado en Matlab está basado en la arquitectura de radio sobre fibra presentada en la figura 8 en la cual se muestra detalladamente cada una de las partes que componen este enlace, además se muestra que elementos componen el transmisor, la estación central, la estación base y el receptor.

La arquitectura RoF, se basa en la modulación externa y utiliza un modulador externo Mach-Zehnder, el cual es encargado de modular a la señal OFDM en la portadora óptica a 193.5THz con bandas laterales a 60GHz. Este modulador realiza la ambas modulaciones, simplificando notablemente el transmisor, esta es la razón principal por la que se ha escogido esta arquitectura para la implementación del modelo Split-Step Simétrico, ya que posee una arquitectura sencilla con pocos elementos, lo cual reflejaría costos bajos de implementación de la red. Cada una de las etapas más importantes de la simulación se detalla a continuación junto con los resultados obtenidos.

**Señal a transmitirse:** La generación de la señal OFDM transporta la información en sus subportadoras a diferentes frecuencias, en este caso la información que se genera es aleatoria, es decir está basada en un conjunto de bits aleatorios y modulada en 4-QAM (modulación de amplitud en Cuadratura), el ancho de banda de la señal es de 4GHz. La

tabla 2 muestra todos los parámetros de la señal OFDM que se ha utilizado para la transmisión. (Dr. Mary Ann Ingram, 2000)

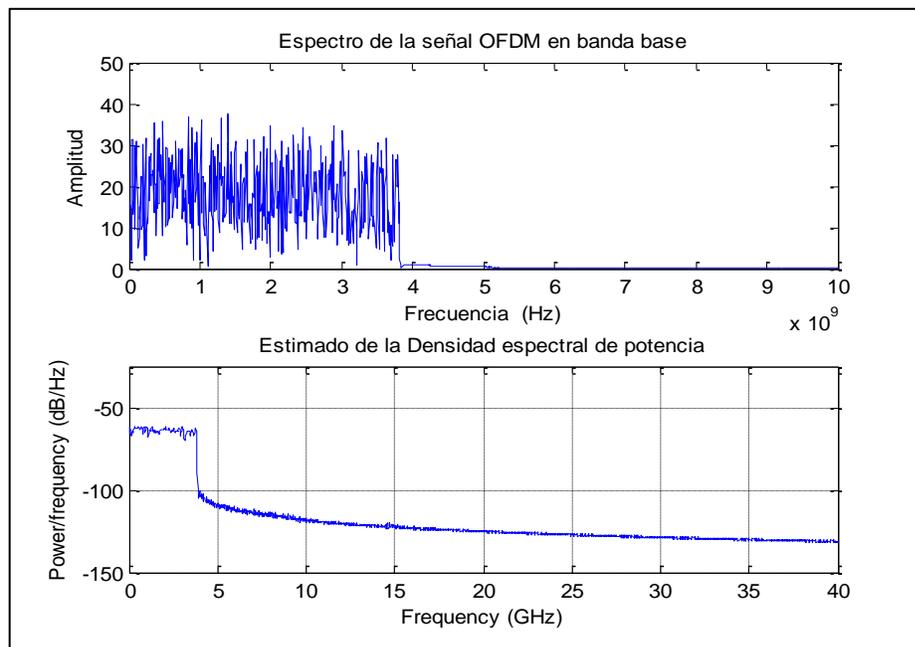
Tabla 2 Parámetros de la señal OFDM a transmitirse

Parámetros numéricos de la señal OFDM	
Período útil del símbolo OFDM [ns]	224
Número de subportadoras de la señal	1705
Símbolos OFDM por cada trama	68
Tipo de modulación	4-QAM
Espaciamiento entre portadoras [MHz]	4,464
Duración del intervalo de guarda [ns]	14
Duración del símbolo OFDM [ns]	238
Prefijo cíclico	No

Fuente: (Dr. Mary Ann Ingram, 2000)

El espectro de la señal obtenido en Matlab, así como un estimado de la densidad espectral de potencia se muestra a continuación:

Figura 9 Espectros de la señal OFDM generada en Matlab



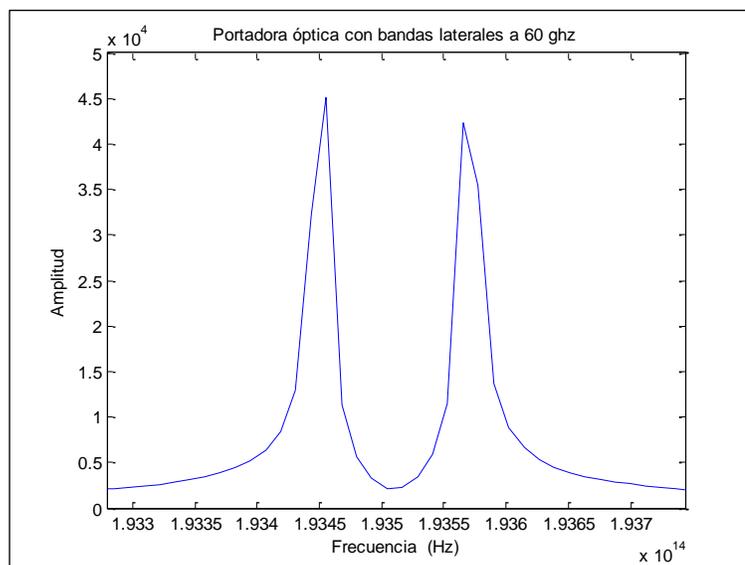
Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

**Modulación de RoF:** Para realizar la modulación de la señal OFDM, en esta arquitectura se genera la portadora de RoF mediante la generación directa de la señal óptica a 193,5THz con las bandas laterales rf a 60 GHz, siguiendo la ecuación de la portadora:

$$E_{opt-mmw}(t) = [A_+ \cos(\omega_0 + \omega_{RF}) t + A_- \cos(\omega_0 + \omega_{RF}) t] \quad (3.31)$$

Donde A es la amplitud de las bandas laterales,  $\omega_0$  es la velocidad angular óptica y  $\omega_{RF}$  la velocidad angular de rf. De esta ecuación se obtiene la portadora óptica como se muestra: (Zizheng Cao & Chen, 2010)

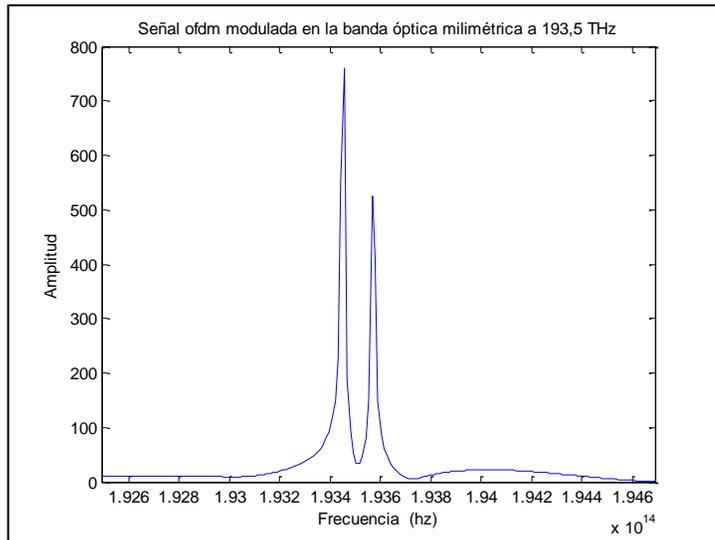
Figura 10 Portadora óptica con bandas laterales de RF a 60GHz



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Posteriormente se realiza la modulación de la señal OFDM con la portadora obtenida, en el caso de que ambas señales se encuentren expresadas en función del tiempo, se realiza la convolución de las mismas, mientras que si están en función de la frecuencia, basta con multiplicarlas para que se realice la modulación.

Figura 11 Señal OFDM modulada en la portadora óptica



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

En la figura 11 se hace imposible la visualización de la señal OFDM en la portadora óptica, esto debido a la diferencia de las escalas en las que se grafica las señales, por un lado se grafica la portadora en una escala comprendida en los THz, mientras que la señal OFDM está en GHz, es por esto que se procede a la detección de la señal mediante el fotodetector y al filtrado de la misma para verificar si efectivamente es posible recuperar la señal OFDM original a 4GHz.

**Canal de transmisión:** El canal de transmisión corresponde a una fibra monomodo que ha sido modelado con el método Split-Step Fourier simétrico. Los parámetros físicos de la fibra monomodo han sido establecidos tomando en cuenta la la recomendación ITU-T G.655 la cual especifica las características de las fibras pensadas para transmitir en la tercera ventana entre 1530nm y 1565nm, con valores bajos de dispersión, aunque se ha previsto que puedan soportar transmisiones en longitudes de onda mayores de 1625 y menores de 1460nm. Para nuestra simulación se ha tomado como canal de transmisión la fibra monomodo con el estándar G.655.B, sus principales características están detalladas en la tabla 3: (TELNET, 2009)

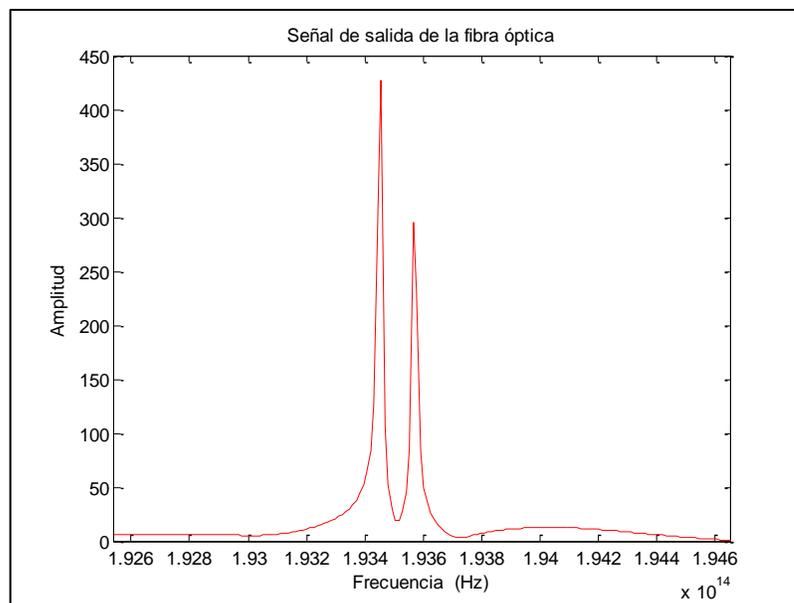
Tabla 3 Parámetros característicos de la fibra monomodo G.655.B

Características de la fibra monomodo G.655.B		
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1550 nm
	Rango	8 - 11 $\mu\text{m}$
	Tolerancia	$\pm 0,7 \mu\text{m}$
Coeficiente de dispersión cromática de 1530 - 1565 nm.	$\lambda_{\text{min}}$ y $\lambda_{\text{max}}$	1530 - 1565 nm
	Dmin	1,0 ps/nm.km
	Dmax	10,0 ps/nm.km
	Dmax - Dmin	$\leq 5,0$ ps/nm.km
Coeficiente de atenuación	Max a 1550 nm	0,35 dB/Km
	Max a 1625 nm	0,4 dB/Km
Coeficiente de PMD	M	20 cables
	Q	0,01%
	Max PMD	0,50 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

Fuente: (TELNET, 2009)

Para la simulación del modelo se han tomado una dispersión de 10,0 [ps/nm.km], y una atenuación de 0,2 [dB/Km], además la distancia de transmisión se ha especificado en 50 Km. Luego de simular la transmisión de la señal a través de la fibra y de aplicar un amplificador óptico, se obtiene la señal de salida que se muestra a continuación:

Figura 12 Señal de salida de la fibra óptica dispersiva



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

**Receptor óptico:** Como se observa, efectivamente se puede recuperar la señal que se transmite por la fibra, la misma que se encuentra atenuada, ya que después de ser amplificada, aún tiene menos amplitud que la señal que ingresa en la fibra óptica. Posteriormente a esta señal se le aplica un fotodetector, el cual convierte la señal óptica en eléctrica. A la salida del fotodetector no solo se obtiene la señal modulada que ingreso a la fibra, sino que se obtiene la señal modulante en banda base, una componente de DC, una componente de ISI, y otras señales como se muestra matemáticamente a continuación, según la ecuación del fotodetector de ley cuadrática:

$$I(t) = \mu ATT(z)|E_{out}(t)|^2 \quad (3.32)$$

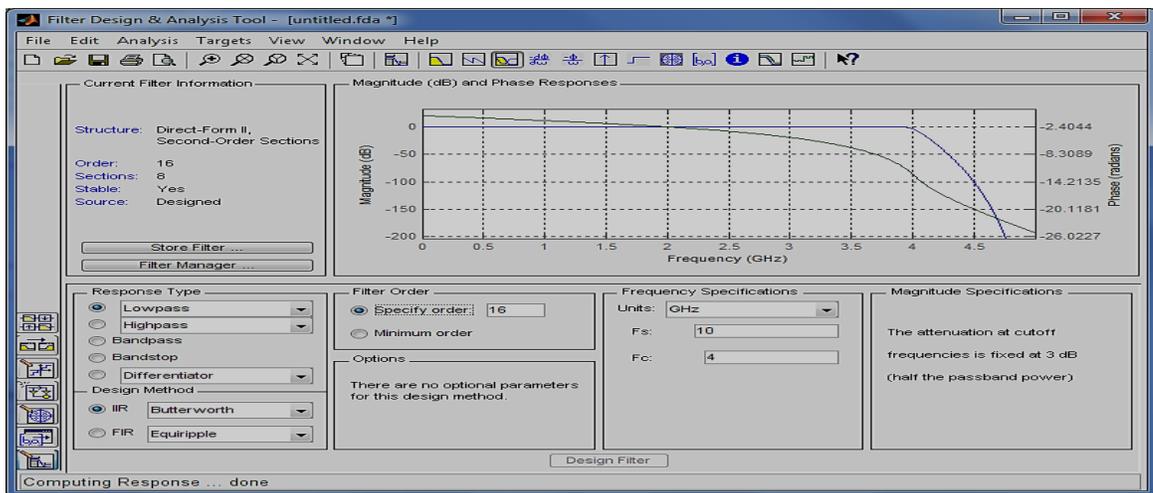
Donde  $\mu$  es la responsividad del fotodetector, que para nuestro estudio es de 0.6 [A/W], ATT es la atenuación y  $E_{out}(t)$  corresponde al campo de salida de la fibra óptica. Desarrollando la ecuación del fotodetector, se obtienen todas las componentes de señal que se muestran a continuación: (Zizheng Cao & Chen, 2010)

$$\begin{aligned}
 I(t) = \mu ATT(z)(A^2 + B^2 + C^2 + D^2) & \text{-----DC} \\
 +2\mu ATT(z)(AB + CD) & \text{-----OFDM Banda base} \\
 +2\mu ATT(z)(BC + AD) & \text{-----MMW OFDM} \\
 +2\mu ATT(z)AC & \text{-----ISI} \\
 +2\mu ATT(z)BD & \text{-----onda milimétrica (3.33)}
 \end{aligned}$$

En este desarrollo A y C denotan las subportadoras de la señal OFDM óptica, mientras que B y D denotan la onda óptica milimétrica. Las componentes de más interés de esta expresión son la componente de ISI (interferencia inter símbolo), la cual permitirá saber de la existencia de ISI antes y después de la fibra, una segunda componente sería la onda milimétrica OFDM, ya que al estar modulada en rf, simplemente bastaría con enviarla a

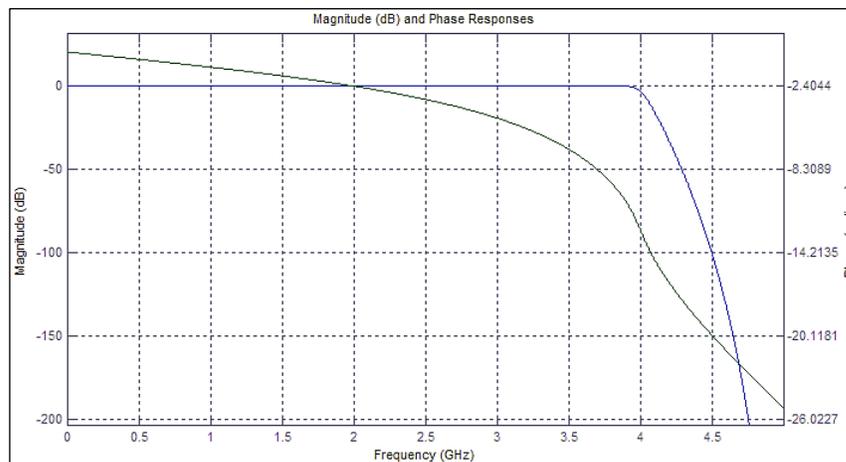
la antena para transmitir dicha señal. Sin embargo la componente de importancia en esta investigación es la señal OFDM en banda base, ya que esta es la señal original que se ha transmitido por la fibra óptica, y de la cual conocemos su espectro y frecuencia, por lo tanto se procede a realizar un filtrado de las demás componentes mediante un filtro butterworth pasa bajos de orden 16 con frecuencia de corte  $f_c=4\text{GHz}$  para obtener únicamente la señal de nuestro interés. Los parámetros de diseño del filtro y la respuesta en fase y frecuencia del mismo, se muestran a continuación:

Figura 13 Parámetros de diseño del filtro pasa bajos



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

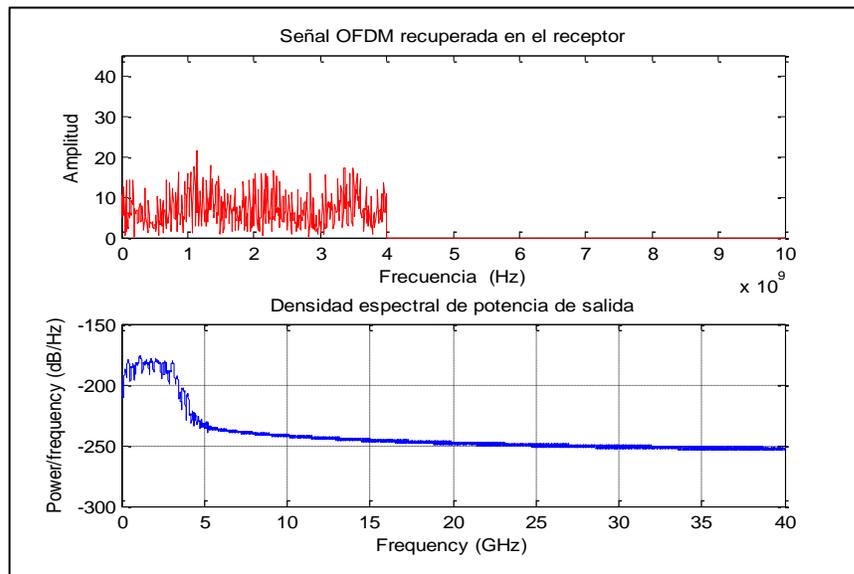
Figura 14 Gráfica de respuesta en fase y frecuencia del filtro pasa bajos



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Finalmente, luego de aplicar el filtro pasa bajos a la señal de salida del fotodetector y eliminar las demás componentes, se obtiene la señal OFDM en banda base, cuyo espectro se muestra a continuación:

Figura 15 Señal OFDM en banda base recuperada en el receptor



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

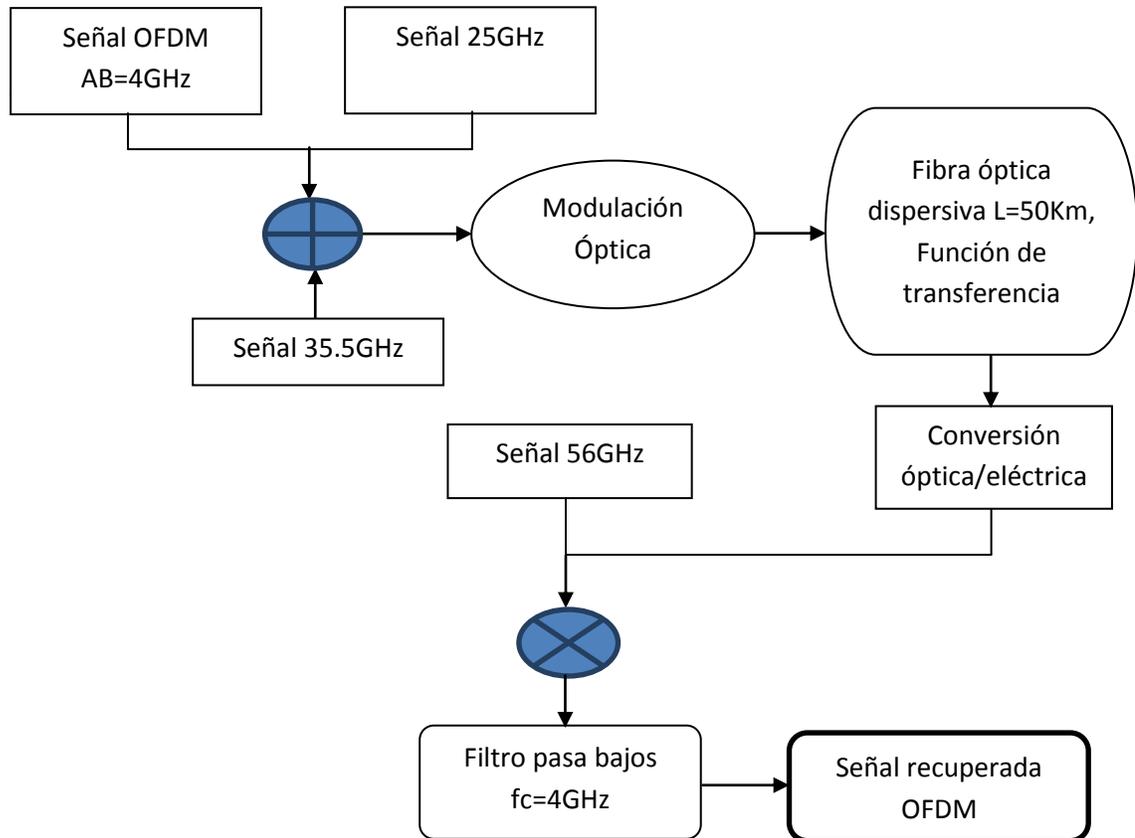
Se puede verificar que efectivamente se consigue recuperar la señal OFDM en banda base.

### 3.3.2 Arquitectura y simulación del modelo basado en la función de transferencia de la fibra

A continuación se presenta la simulación de la segunda arquitectura RoF implementada en Matlab, en este caso, el comportamiento de la fibra óptica se lo realiza con el modelo lineal de la fibra basado en la función de transferencia. Un diagrama de bloques de la arquitectura implementada se muestra en la figura 3.13. Se consideró esta arquitectura porque dentro de los enlaces RoF, las portadoras con frecuencias mayores a 40 GHz resultan más complicadas de generar y por lo tanto más costo en los equipos, es por esto que en la arquitectura presentada para evitar este costo en los equipos, la modulación se

la realiza mediante un oscilador de 25GHz y seguidamente se genera un tono a 35.5 GHz para generar la mezcla de frecuencias adecuadas (suma de frecuencias) que permitan generar en el receptor la frecuencia de 60GHz deseada.

Figura 16 Diagrama de bloques del modelo RoF mediante la función de transferencia implementado en Matlab

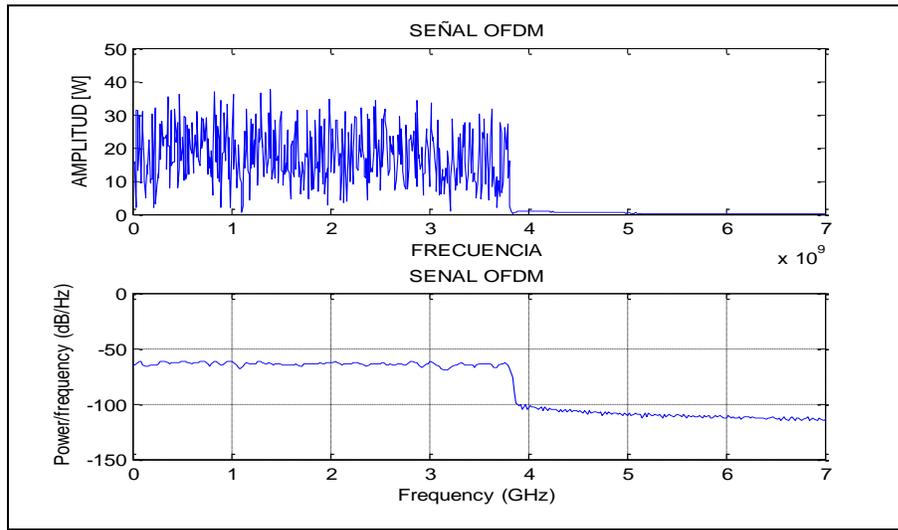


Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

**Señal a transmitirse:** Los datos digitales transmitidos fueron generados aleatoriamente, los símbolos obtenidos fueron modulados usando multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) siguiendo los mismos parámetros que se muestran en la tabla 2.

El espectro de la señal OFDM obtenido en Matlab, así como un estimado de la densidad espectral de potencia se muestra a continuación:

Figura 17 Espectro de la señal de entrada OFDM



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua.

**Modulación de RoF:** Para realizar la modulación óptica de la señal OFDM, en esta arquitectura nos basamos en el campo óptico de entrada de un Mach-Zehnder (MZM) con un solo electrodo el cual está definido como: (Jiang, y otros, 2010)

$$E_{in}(t) = E_o \cos(\omega c t), \quad (3.34)$$

Donde  $E_o$  y  $\omega c$  son la amplitud y frecuencia angular del campo óptico respectivamente. La conducción de la señal de RF  $V(t)$  que consta de dos señales senoidales en diferentes frecuencias del MZM es: (Jiang, y otros, 2010)

$$V(t) = V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t, \quad (3.35)$$

Donde  $V_1$  y  $V_2$  son las amplitudes de la señal en frecuencia  $\omega_1$  y  $\omega_2$  respectivamente.

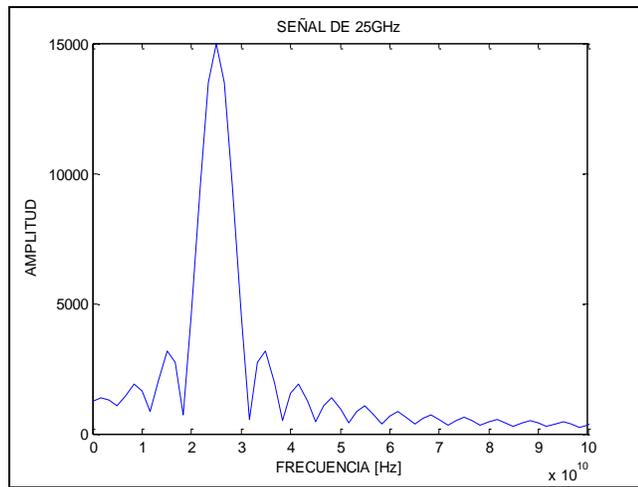
Para simplificar el análisis, la relación de división de potencia de la MZM se establece como 0,5. Con el fin de suprimir la portadora óptica no deseada, el MZM con un solo electrodo es parcial en el punto nulo. El campo óptico en la salida del MZM se da entonces por: (Jiang, y otros, 2010)

$$E_{out} = E_o \cos \omega ct$$

$$\cos[(\pi/2V\pi)(V\pi + V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t)] \quad (3.36)$$

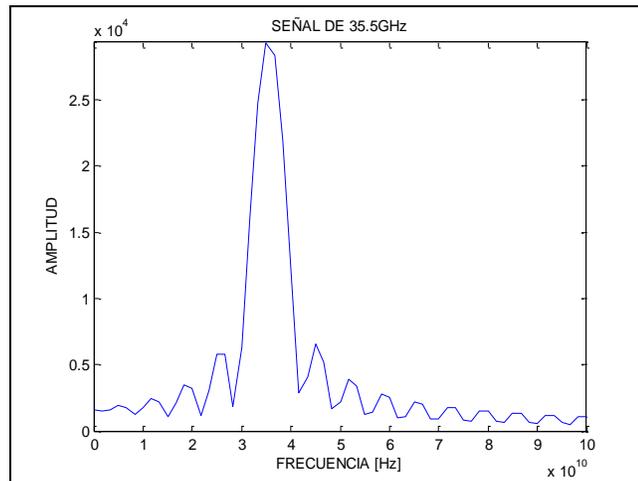
Para esta arquitectura la señal óptica de onda continua se generó utilizando dos señales a frecuencias de 25 GHz y 35.5GHz, con lo cual mediante los armónicos que se generan se puede obtener la señal a 60 GHz que resulta de la suma de las dos frecuencias.

Figura 18 Espectro de la señal de 25GHz



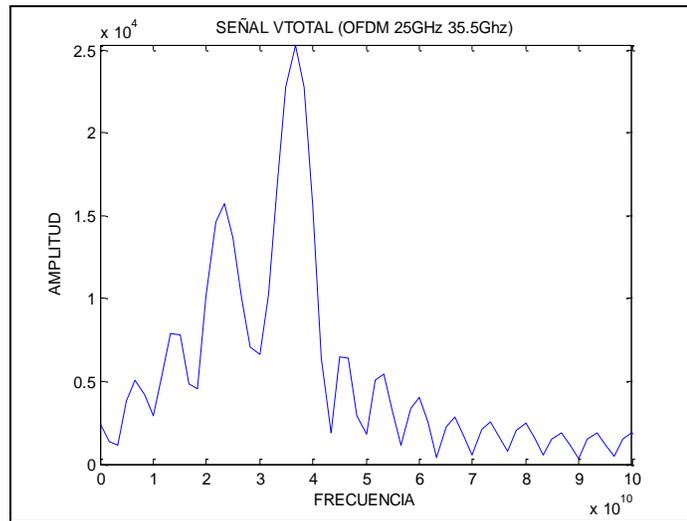
Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Figura 19 Señal de 35.5 GHz



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

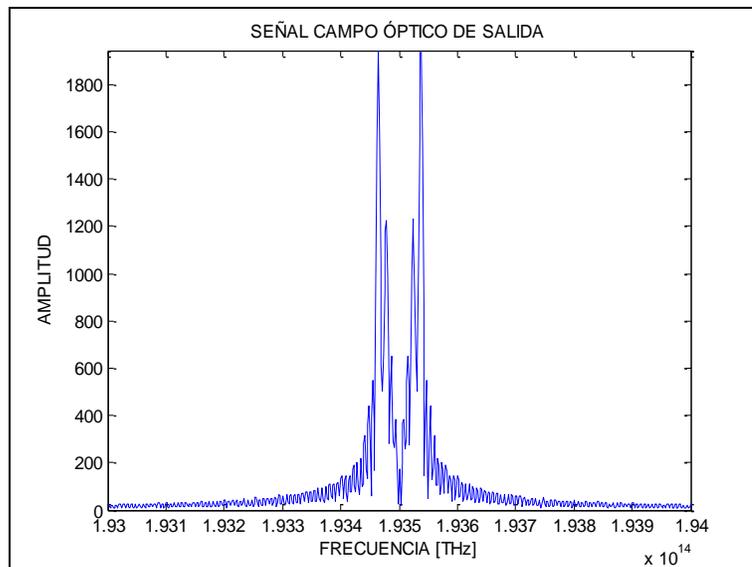
Figura 20 Señal modulada (señal OFDM modulada con señal de 25GHz + señal de 35.5GHz)



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

La mezcla de señales se modulan usando una portadora óptica mediante modulación externa usando un MZM en la longitud de onda de 1550nm (193.5 THz) como se observa en la figura 21:

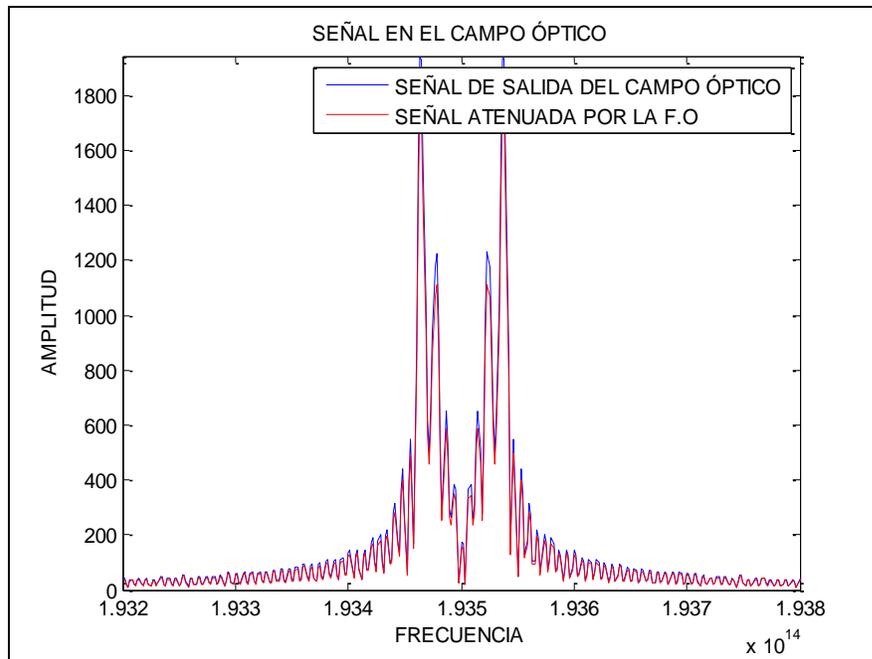
Figura 21 Espectro de la señal del campo óptico de salida del MZM



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Luego de realizar la simulación y obtener el campo óptico de entrada a 193.5THz se transmite la señal por la fibra dispersiva y se obtiene una señal muy similar en frecuencia y atenuada, esto debido a la atenuación de 0,2 dB/Km que se especifica en la fibra.

Figura 22 Espectro de la señal óptica de entrada y salida de la fibra

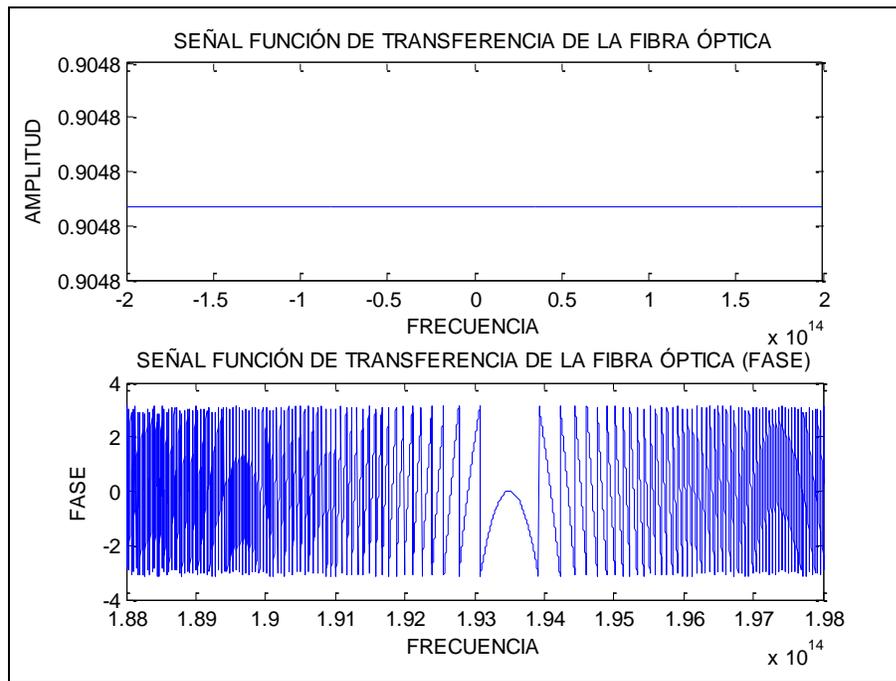


Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

**Canal de transmisión:** El canal de transmisión corresponde a una fibra monomodo que ha sido modelado con el modelo lineal basado en la función de transferencia de la fibra. Los parámetros físicos de la fibra monomodo han sido establecidos tomando en cuenta la recomendación ITU-T G.655, y se indican en la tabla 3.

El gráfico de la función de transferencia que modela la propagación del campo eléctrico a lo largo de una fibra de longitud  $L$  expresada en la ecuación (3.26) se muestra a continuación:

Figura 23 Módulo y Fase de la función de la transferencia de la fibra óptica

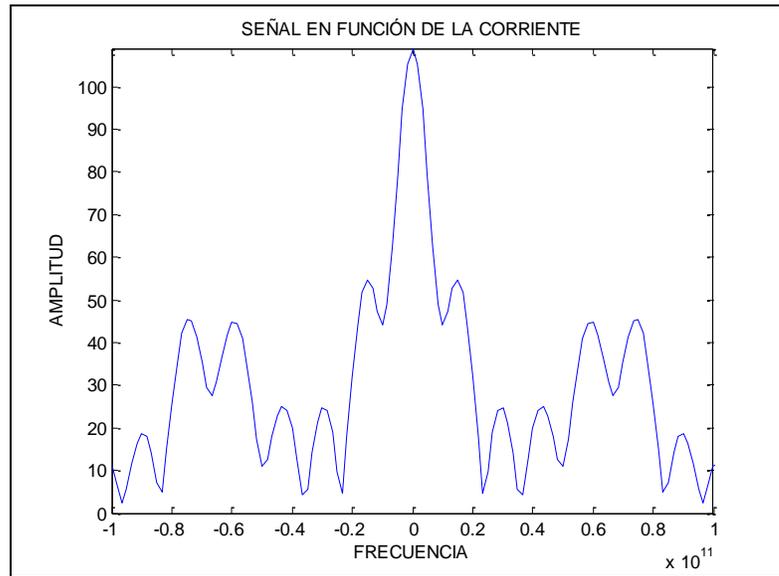


Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

La figura 3.20 representa la función de transferencia de la fibra donde se observa la amplitud y la fase de la misma, observándose que la fase varía de manera parabólica, lo cual implica que exista un desplazamiento en la fase de la señal transmitida y por ende retardo en la transmisión.

**Receptor óptico:** Al realizar la simulación en Matlab se verifica que se obtiene la señal recuperada OFDM a 4Ghz, esta señal es atenuada comparada a la señal que fue ingresada en la fibra óptica. En el receptor, la señal óptica se convierte en eléctrica, siguiendo la ecuación del fotodetector de ley cuadrática (3.32). Este fotodetector permite la conversión óptica a eléctrica de la señal, y debido a que es un elemento no lineal genera nuevos armónicos permitiendo tener la señal OFDM modulada a 60GHz como se muestra en la figura 24.

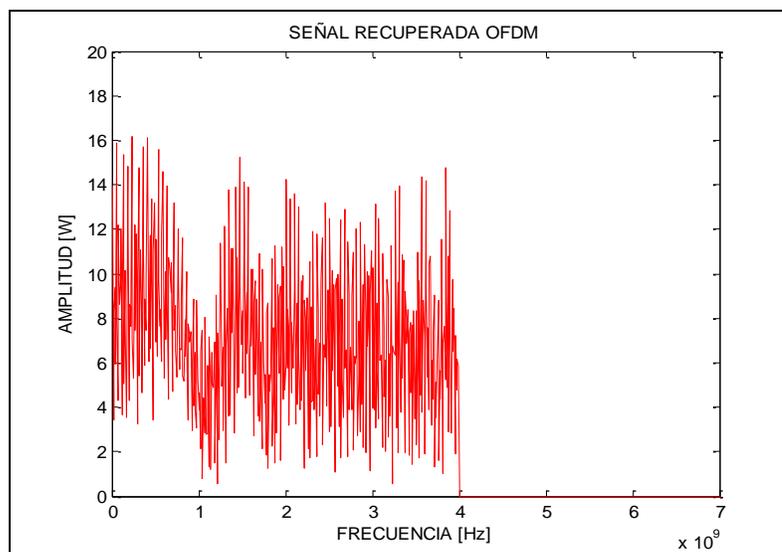
Figura 24 Espectro de la señal de salida del fotodetector en función de la corriente



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Se ha realizado un enlace de fibra de 50km de longitud, la señal modulada se ha obtenido por medio de un modulador Mach-Zehnder, y la señal recuperada se muestra a continuación:

Figura 25 Espectro de la señal OFDM en banda base recuperada en el receptor



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

La señal OFDM a la salida fue amplificada 10 dB, con un amplificador de respuesta lineal sin ruido el mismo que se utilizó en la primera arquitectura. La señal útil no solo presenta atenuación, sino que adicionalmente se observa un desplazamiento de fase, el cual es producido por la dispersión, la cual genera un retraso en el tiempo de la llegada de los datos al receptor.

### **3.4 Simulación del enlace RoF mediante el simulador comercial OptSim.**

OptSim™, es un entorno de simulación y modelado intuitivo, que soporta el diseño y la evaluación de desempeño del nivel de transmisión de los sistemas de comunicaciones ópticas. Posee una interfaz gráfica de usuario muy amigable así como la simulación de instrumentos similar a los de un laboratorio. OptSim™ tiene una curva de aprendizaje rápido, con lo cual los usuarios potenciales alcanzan las máximas potencialidades que ofrece en un corto tiempo. OptSim™ ha sido ampliamente validado, demostrando la fiabilidad con un gran número de canales WDM, y posee una gran base instalada en organizaciones de investigación e industriales.

OptSim es ideal para diseños guiados por computadora de:

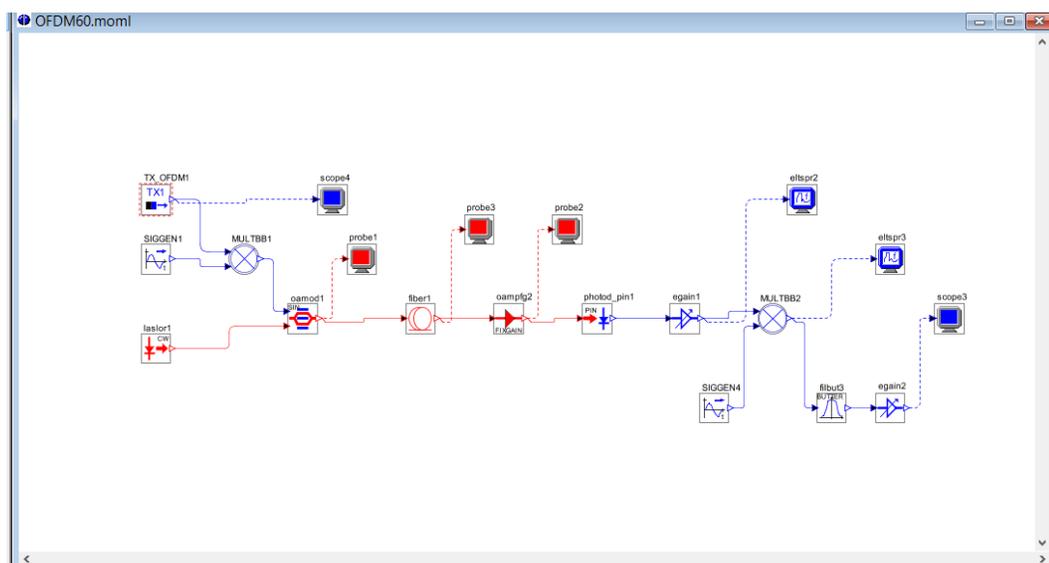
- Sistemas DWDM/CWDM amplificados (ej: EDFA, MultiPump Raman, SOA, Amplificador Híbrido).
- Sistemas FTTx/PON.
- Sistemas OTDM / OCDMA.
- Sistemas analógicos y digitales de CATV.
- Redes completamente ópticas. (ALL Optical Networks).
- Sistemas terrestres y submarinos de largo alcance.
- Sistemas Soliton.
- LAN's Ópticas.
- Interconexiones ópticas.
- Sistemas ópticos en el espacio libre (FSO).

### 3.4.1 Simulación del sistema RoF basado en la primera arquitectura.

La arquitectura del enlace RoF en OptSim que se describe a continuación es la misma que se basó en el método Split-Step Simétrico realizada en Matlab, por lo tanto consiste en generar una señal OFDM en banda base y modularla en una portadora óptica milimétrica para posteriormente transmitirla por una fibra óptica tomando en cuenta los efectos dispersivos y de atenuación que se producen en este tipo de enlaces. Optsim al ser un software especializado en enlaces ópticos, permite simular el comportamiento de la fibra óptica de manera mucho más sencilla ya que basta con ingresar los parámetros de atenuación, dispersión y longitud de la fibra para para que simule el comportamiento de la misma mediante el algoritmo TDSS.

OptSim utiliza una interfaz gráfica de usuario, la cual permite un aprendizaje rápido de su entorno de simulación, con lo cual la implementación de la arquitectura y el procesamiento de las señales resultan mucho más sencillos, además posee bloques de funciones para generar señales, con lo cual se facilita la obtención de la señal OFDM que va a transmitirse. La arquitectura RoF implementada en OptSim se muestra a continuación:

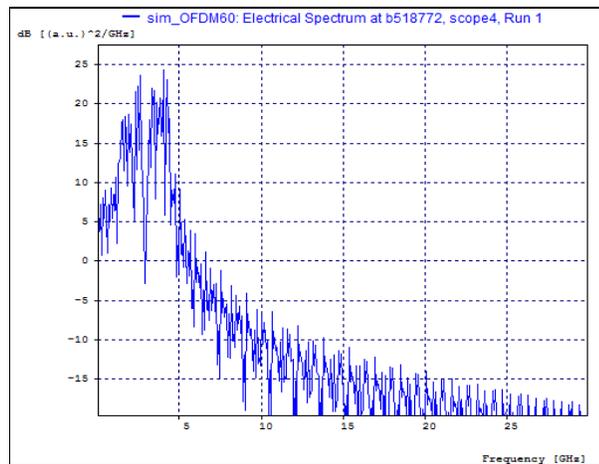
Figura 26 Arquitectura RoF de la primera arquitectura implementada en OptSim™



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

La generación de la señal OFDM con un ancho de banda de 4GHz, se la realiza como se muestra en la arquitectura, con un bloque generador de señales en el que se ingresan los parámetros de la señal, amplitud, ancho de banda, numero de subportadoras y tipo de modulación, para finalmente generar la señal de entrada cuyo espectro se muestra a continuación:

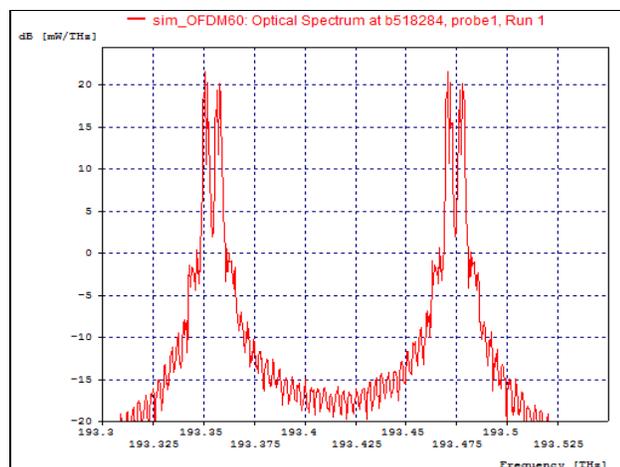
Figura 27 Espectro de la señal OFDM generada



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

La modulación de la señal en la portadora óptica, se la realiza mediante un modulador externo Mach-Zehnder, el cual realiza la conversión eléctrica-óptica de la señal y la modula en una portadora óptica a 193,41THz, esta señal se muestra a continuación:

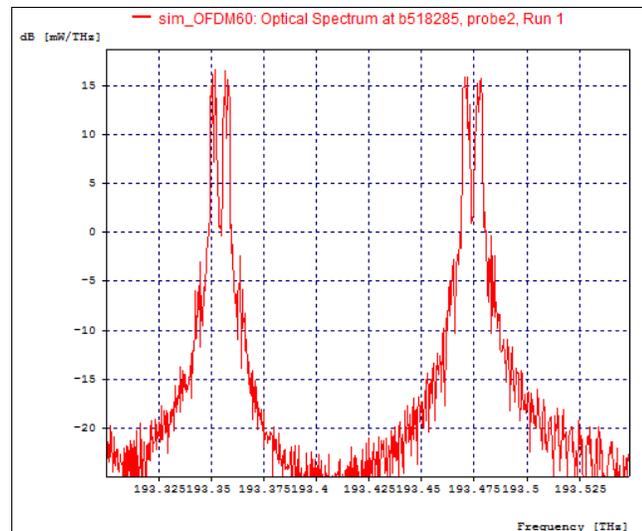
Figura 28 Espectro de la señal de entrada a la fibra



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

El canal de transmisión (fibra), tiene una longitud de 50km, con una atenuación de 0,2 dB/Km y toma en cuenta los factores de dispersión hasta de tercer orden, al pasar la señal modulada OFDM a través de esta fibra, se obtiene la señal atenuada que se muestra a continuación:

Figura 29 Espectro de la señal de salida de la fibra



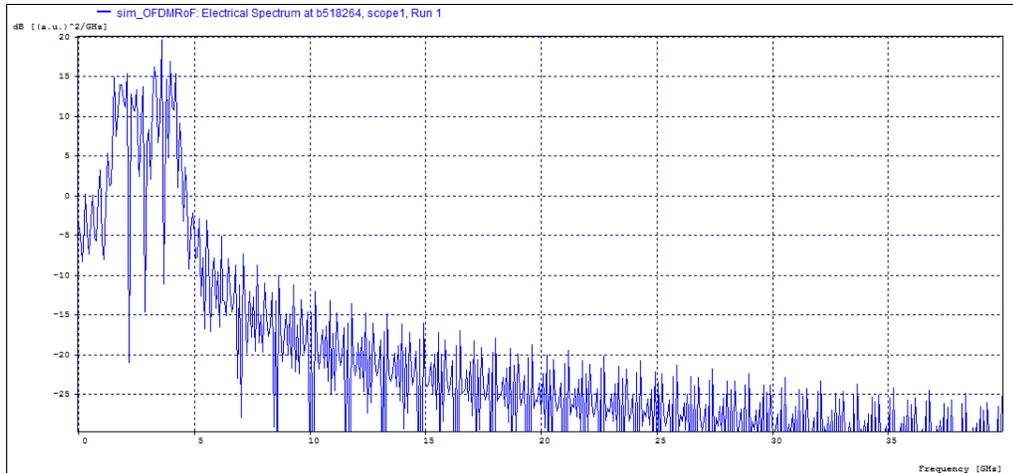
Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

La señal que se obtiene se atenúa 0,2 dB/Km, por lo cual la gráfica anterior corresponde a la señal de salida de la fibra amplificada mediante un amplificador óptico. Finalmente se realiza la conversión óptica-eléctrica de la señal mediante un fotodetector, y se procede a filtrarla mediante un filtro butterworth pasa bajos similar al que se ha utilizado en Matlab para realizar el filtrado de la señal, de manera que se obtiene la señal OFDM en banda base recuperada. El espectro de esta señal OFDM recuperada se puede observar en la figura 31, en la cual se puede verificar que efectivamente se consigue recuperar la señal OFDM en banda base, y que esta se encuentra atenuada debido a la atenuación de cerca de 8dB que sufre en los 50 km de fibra.



Ingresa una señal OFDM de 4GHz, la cual se realiza mediante la interfaz gráfica con un bloque generador de señales en el que se ingresan los parámetros de la señal, amplitud y ancho de banda, para generar la señal de entrada cuyo espectro se muestra a continuación:

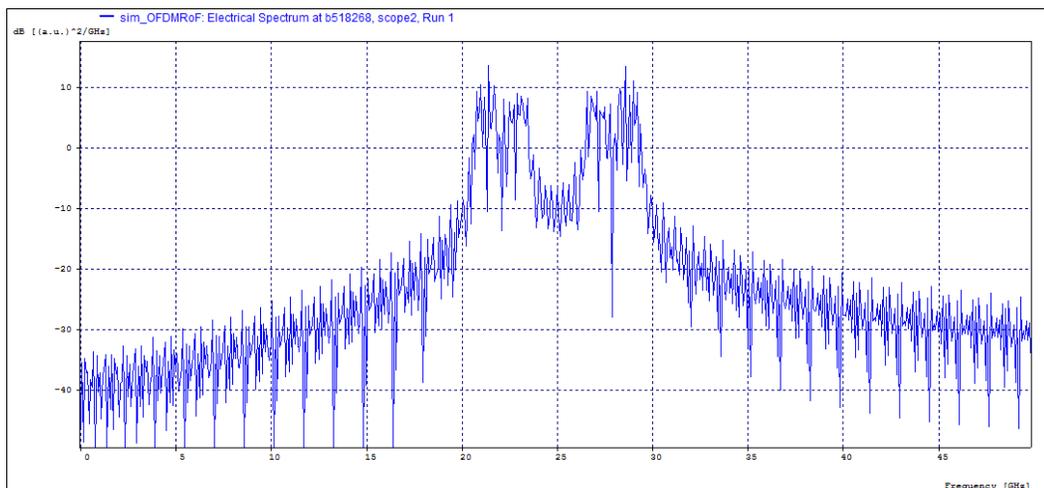
Figura 32 Espectro de la señal OFDM



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Posteriormente se ingresa una señal senoidal a 25GHz para ser modulada con la señal OFDM a transmitirse en el enlace óptico.

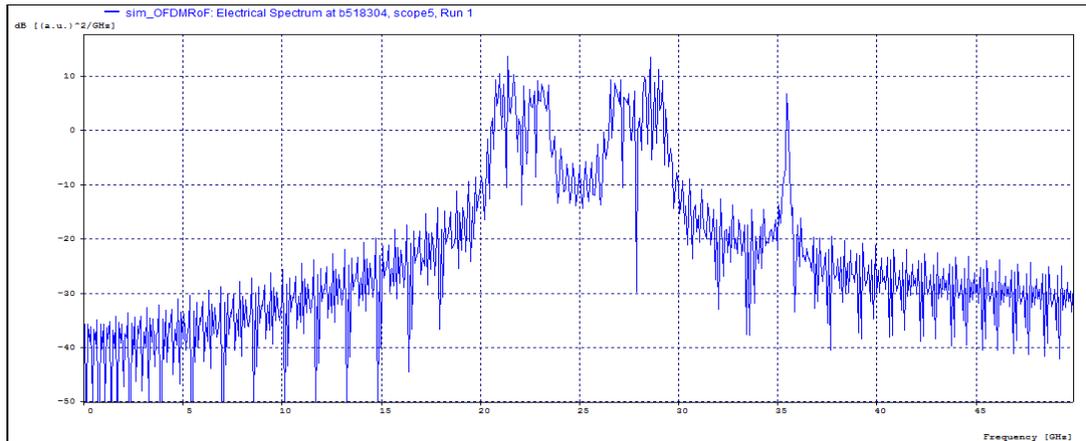
Figura 33 Espectro de la señal que ingresa de 25GHz



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Se ingresa la señal de 25Ghz y la señal OFDM para así realizar la modulación de esta señal, y posteriormente se suma una señal senoidal a 35Ghz.

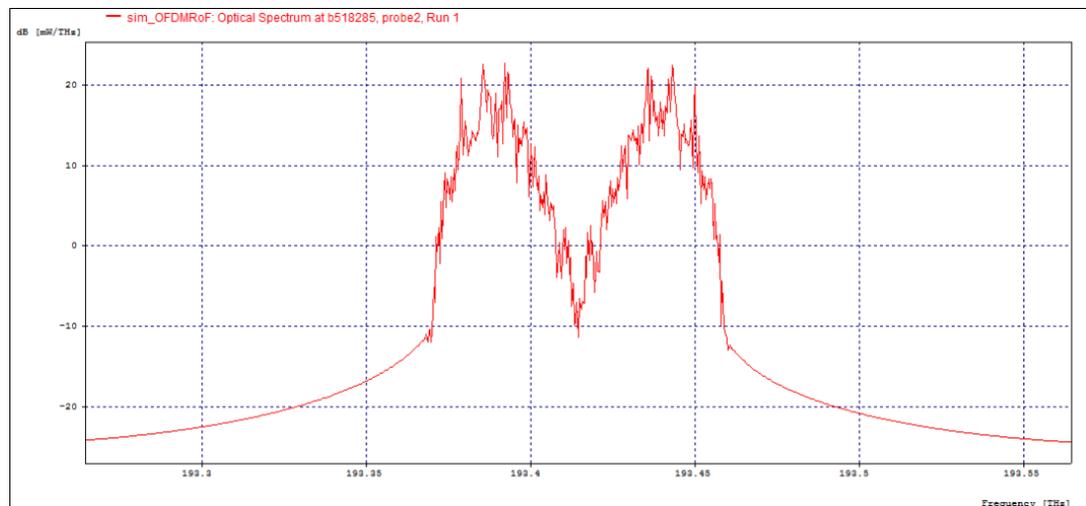
Figura 34 Señal total, suma de las señales que ingresan OFDM, 25Ghz y 35.5Ghz



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

La modulación de la señal OFDM en la portadora óptica, se la realiza mediante un modulador externo Mach-Zehnder, donde se obtiene la señal óptica en 193.5 Thz:

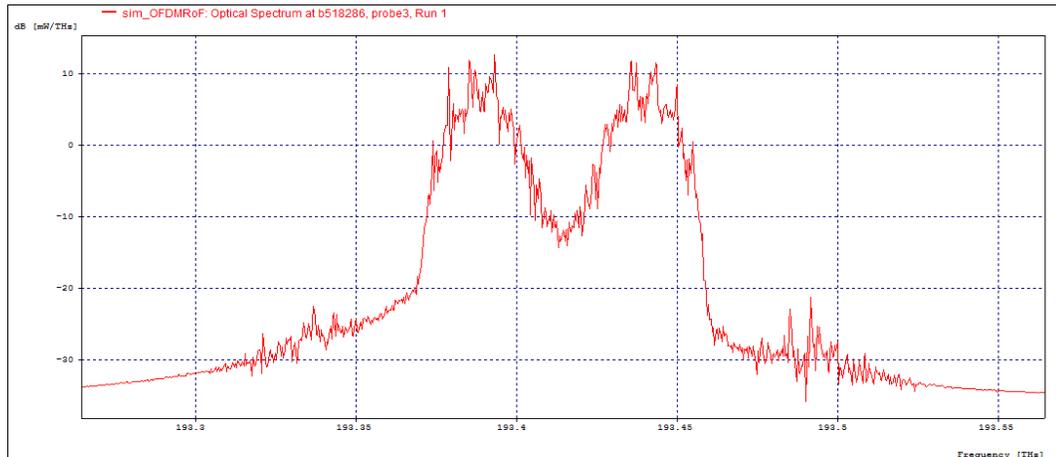
Figura 35 Señal del campo óptico de entrada



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Al realizar la transmisión del enlace óptico a través de la fibra óptica se obtiene la señal atenuada en 193.5 Thz, con una atenuación de 0,2 dB/Km.

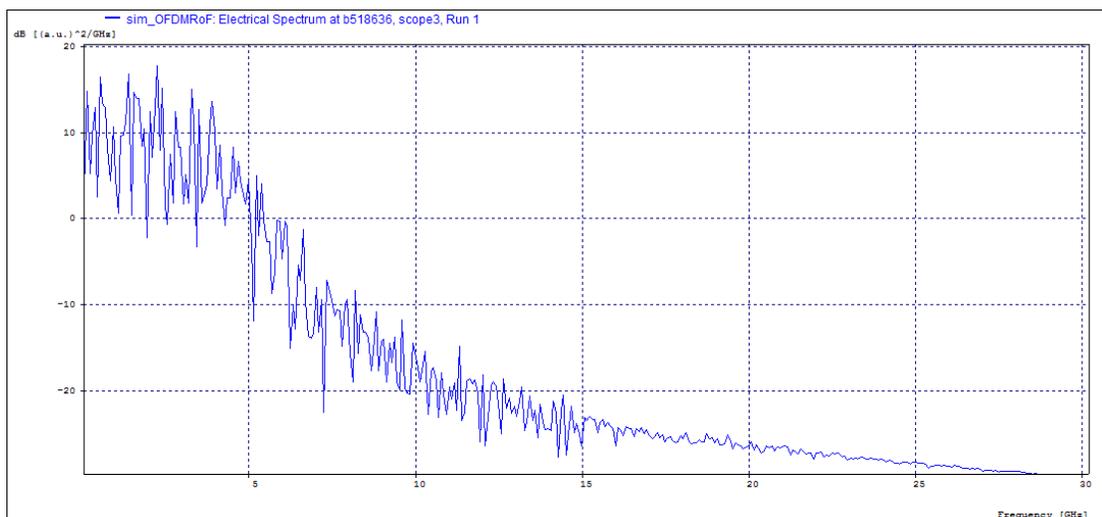
Figura 36 Señal atenuada de salida del campo óptico



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Al finalizar la simulación se realiza la conversión óptica-eléctrica de la señal mediante un fotodetector, y se procede a filtrarla mediante un filtro butterworth pasa bajos para de esta manera obtener la señal recuperada OFDM en banda base.

Figura 37 Espectro de la señal recuperada OFDM



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Al finalizar la simulación en el software OptSim se verifica que permite la implementación de enlaces ópticos complejos de una manera sencilla basada en una interfaz gráfica de fácil entendimiento para el usuario.

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo muestra el análisis de los sistemas RoF simulados, se verifica los parámetros de entrada y salida, se analiza cómo afecta la atenuación y dispersión de la fibra a este tipo de enlaces, además se realiza una comparación de funcionamiento entre el simulador comercial OptSim y Matlab respecto al tiempo de simulación, así como los resultados que se obtienen de estos simuladores, adicionalmente se verifica cuál de las dos arquitecturas presenta una implementación más sencilla, menor costo de implementación y menor costo computacional (tiempo de simulación).

#### 4.1 Análisis comparativo de los enlaces de RoF

Para la primera arquitectura que utiliza el método Split-Step simétrico, se presentan los siguientes parámetros de simulación:

Tabla 4 Parámetros de simulación de la primera arquitectura

<b>Parámetros de simulación de la Arquitectura basada en el método SSSF</b>	
Frecuencia de la señal portadora [GHz]	60
Frecuencia de la señal óptica [THz]	193.5
Frecuencia de muestreo [THz]	500
Longitud de onda central [nm]	1550
Atenuación [dB/Km]	0.2
Dispersión [ps/nm.km]	10
Longitud de la fibra monomodo [Km]	50

Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Para la segunda arquitectura basada en la función de transferencia de la fibra óptica, se presentan los siguientes parámetros de simulación:

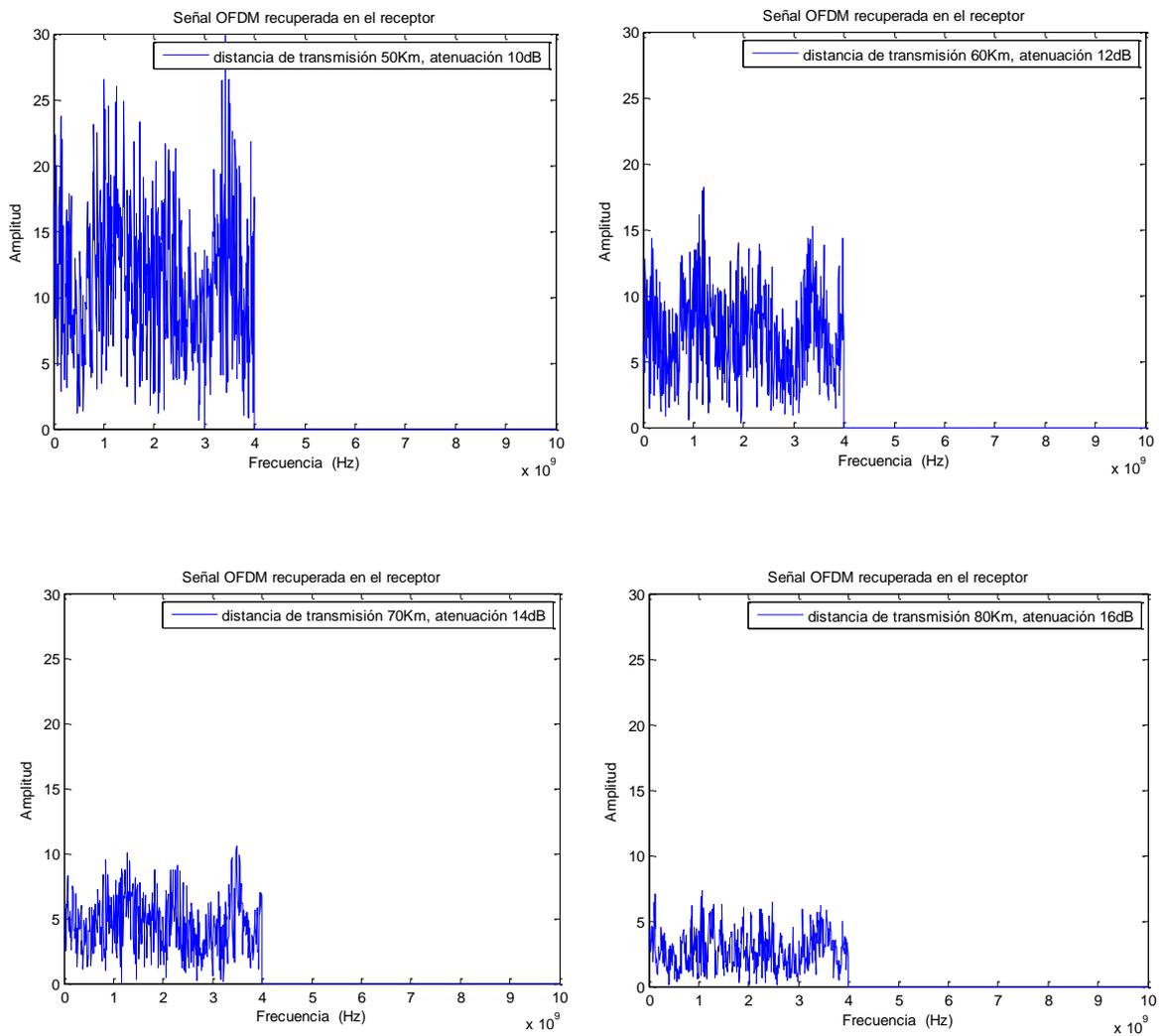
Tabla 5 Parámetros de simulación de la segunda arquitectura

<b>Parámetros de simulación de la Arquitectura basada en el método SSSF</b>	
Frecuencia de las señales portadoras [GHz]	25 35.5
Frecuencia portadora obtenida de la suma de armónicos [GHz]	60.5
Frecuencia de la señal óptica [THz]	193.5
Frecuencia de muestreo [THz]	400
Longitud de onda central [nm]	1550
Atenuación [dB/Km]	0.2
Dispersión [ps/nm.km]	10
Longitud de la fibra monomodo [Km]	50

Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

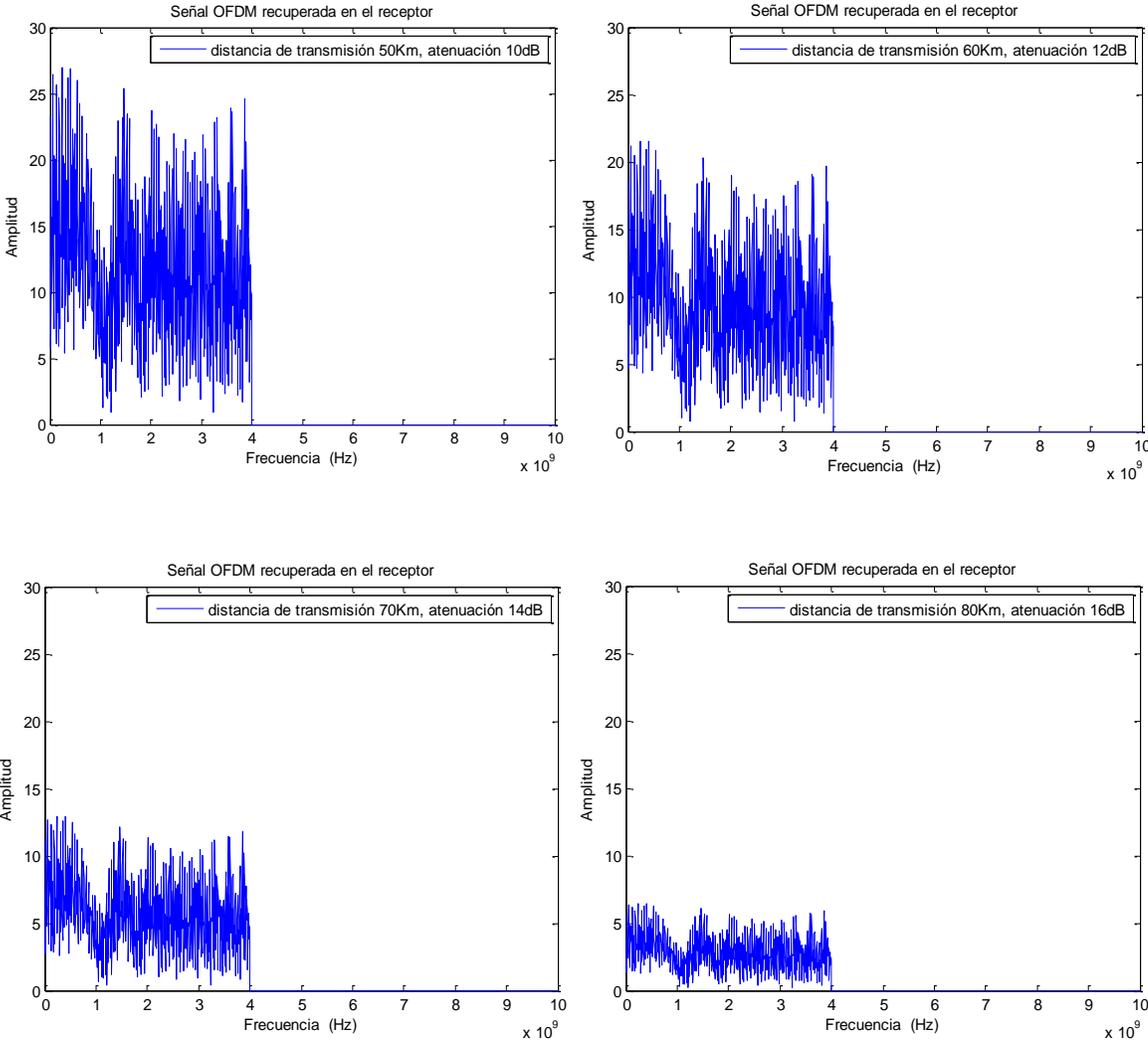
Para comprobar cómo afecta la atenuación de la fibra en ambas arquitecturas, se realiza un gráfico que muestra cómo se comporta la señal OFDM en el receptor respecto a la variación de la longitud de la fibra monomodo. Para realizar esta comparación, el valor de la dispersión se mantiene constante mientras que la longitud de la fibra se va aumentando en pasos de 10km partiendo de la longitud inicial. Los resultados obtenidos de esta comparación se muestran a continuación:

Figura 38 Variación de la señal OFDM respecto a diferentes valores de atenuación (Primera arquitectura)



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Figura 39 Variación de la señal OFDM respecto a diferentes valores de atenuación (Segunda arquitectura)

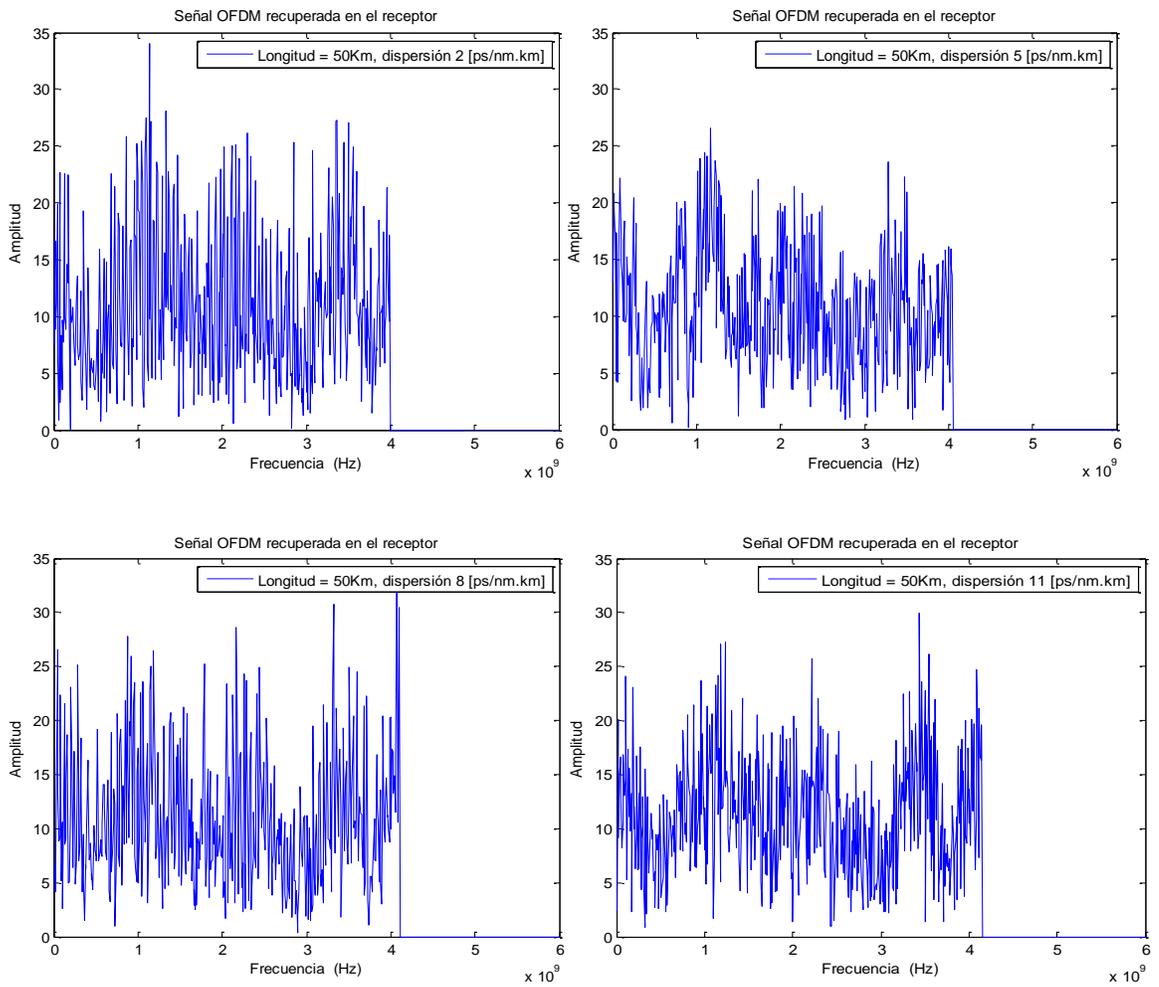


Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

En la figura 38 y 39 se pueden verificar como se ven afectadas las amplitudes de las señales OFDM a la salida de manera similar en ambas arquitecturas debido a la atenuación de la fibra de 0.2 dB/Km, la cual se incrementa de manera lineal de acuerdo a la longitud de la fibra, para esta comparación, la atenuación se va incrementando en 2dB por cada 10Km de fibra, lo cual provoca que la amplitud de la señal vaya disminuyendo. Se puede notar para estos enlaces que en una variación de 30 Km de fibra, se hace necesaria la implementación de una etapa de amplificación adicional que permita recuperar la señal original.

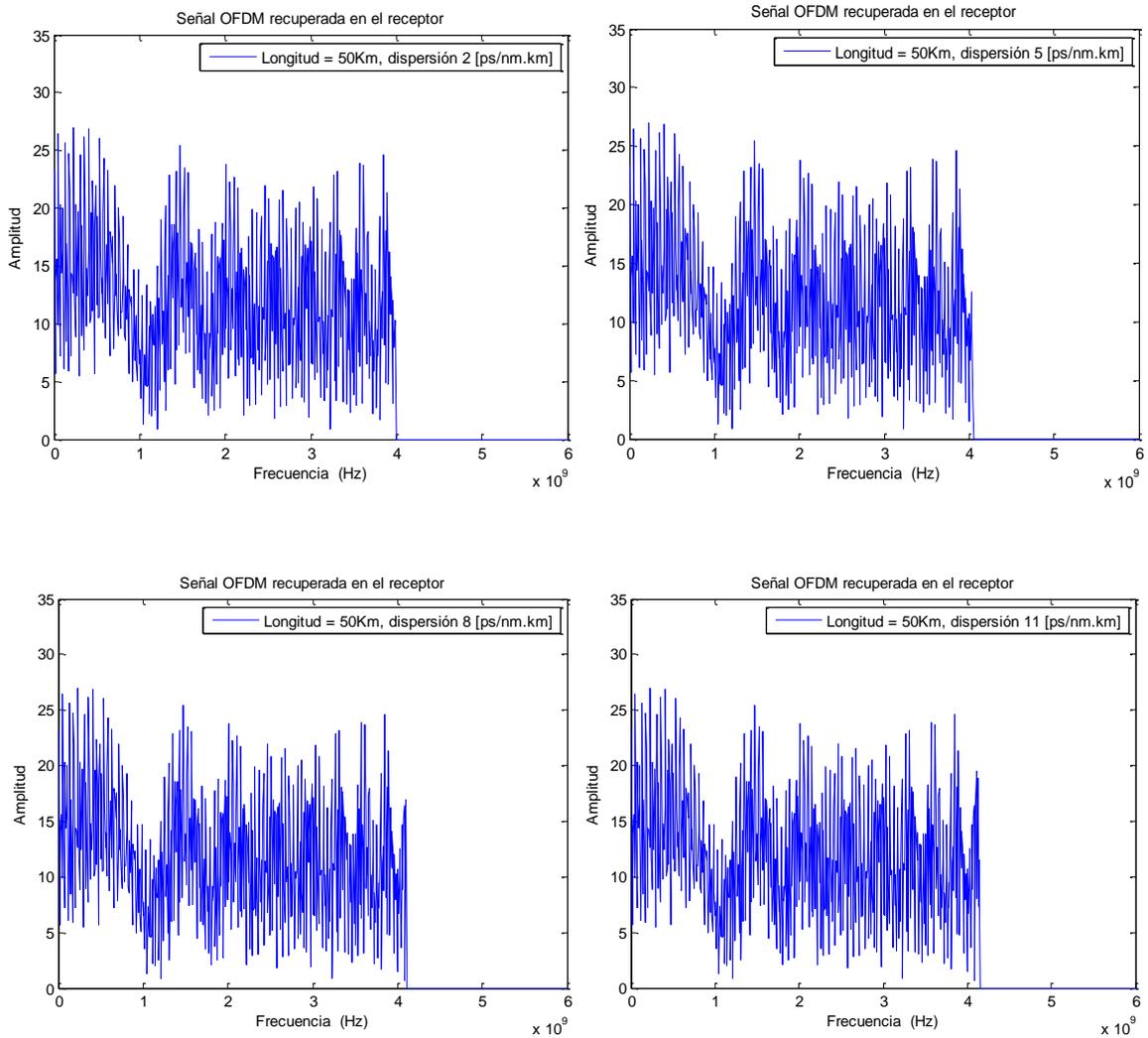
Para verificar cómo afecta la dispersión de segundo orden de la fibra en ambas arquitecturas, se realiza un gráfico que muestra cómo se comporta la señal OFDM en el receptor respecto a la variación del parámetro numérico de la dispersión. Para realizar esta comparación, la distancia de transmisión se mantiene constante por ende el valor de la atenuación no cambia, mientras que el parámetro de la dispersión se va incrementando en 3.0 [ps/nm.km] a partir de un valor de 2.0 [ps/nm.km]. Los resultados obtenidos de esta comparación se muestran a continuación:

Figura 40 Variación de la señal OFDM respecto a diferentes valores de dispersión (Primera arquitectura)



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Figura 41 Variación de la señal OFDM respecto a diferentes valores de dispersión (Segunda arquitectura)



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

La dispersión cromática medida en [ps/nm.km], representa el retraso, o incremento de tiempo (en ps), para una fuente con una anchura espectral de 1 nm que viaja en 1 kilómetro de la fibra. Esto depende del tipo de fibra, y limita la velocidad o la distancia de transmisión para una buena calidad de servicio. Las fibras monomodo, usadas en redes ópticas, están sujetas a la Dispersión Cromática, que causa un ensanchamiento de los pulsos de luz según la longitud de onda, y a la Dispersión de Modo de Polarización (PMD) que provoca un ensanchamiento del pulso según la polarización. Un ensanchamiento excesivo provocará una superposición de los pulsos y errores en la decodificación. (P.Agrawal, 2002)

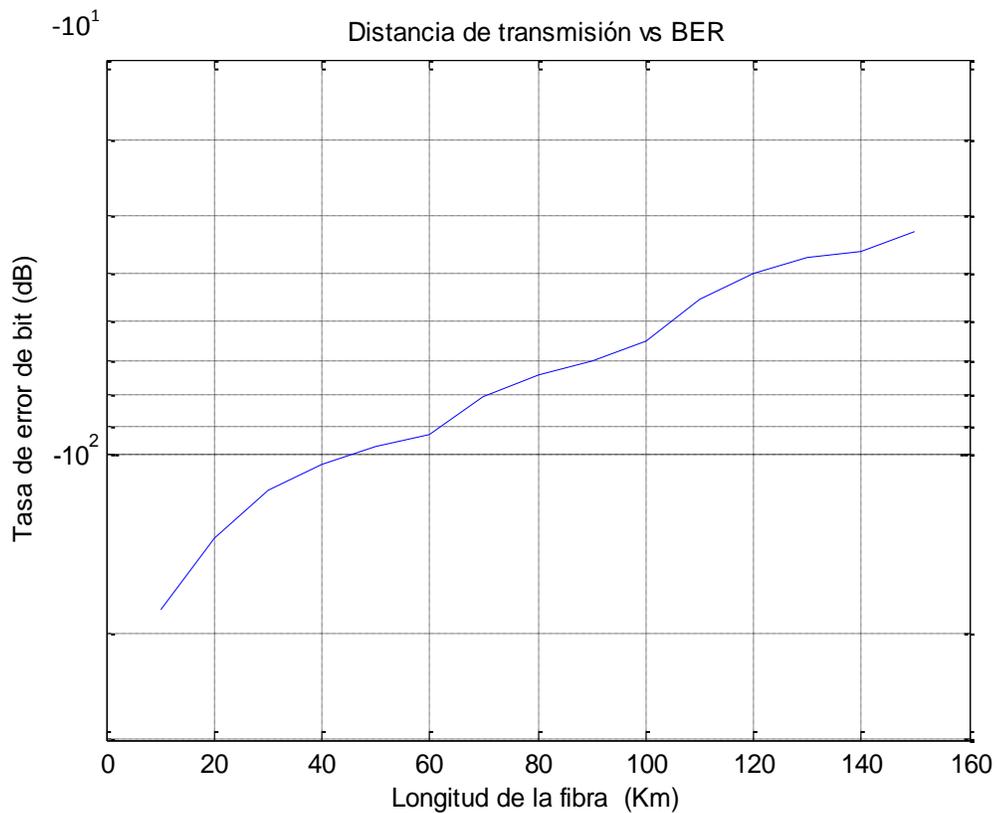
En las figuras 40 y 41 se puede observar el ensanchamiento de la señal OFDM recibida, según varía el parámetro numérico de la dispersión, se observa que mientras se va aumentando este parámetro, el espectro de la señal se ensancha cada vez más, con lo cual se verifica cómo afecta el fenómeno de la dispersión en un enlace de RoF.

Adicionalmente, para verificar los errores producidos en la transmisión de la señal en el enlace RoF, se procede a calcular la tasa de error de bit (Bit Error Rate, BER), de las dos arquitecturas presentadas. Aunque algunas veces el BER se puede definir como el número de errores que ocurren por segundo, esta definición hace que el BER sea dependiente de la velocidad binaria. Por lo tanto resulta más habitual definir el BER como la probabilidad media de identificación de bits correctos. Por lo tanto, una BER de  $10^{-6}$  corresponde a un promedio de un error por cada millón de bits. La mayoría de los sistemas de ondas de luz especifican una BER de  $10^{-9}$  como el requisito de funcionamiento. (P.Agrawal, 2002)

Para transmisiones RoF, los valores de BER se encuentran comprendidos entre valores de  $10^{-3}$  hasta  $10^{-12}$ , con una distancia de transmisión máxima de 50 Km, para longitudes de fibra mayores a esta, el BER se va incrementando, llegando a valores mucho mayores a los especificados. (Zizheng Cao & Chen, 2010)

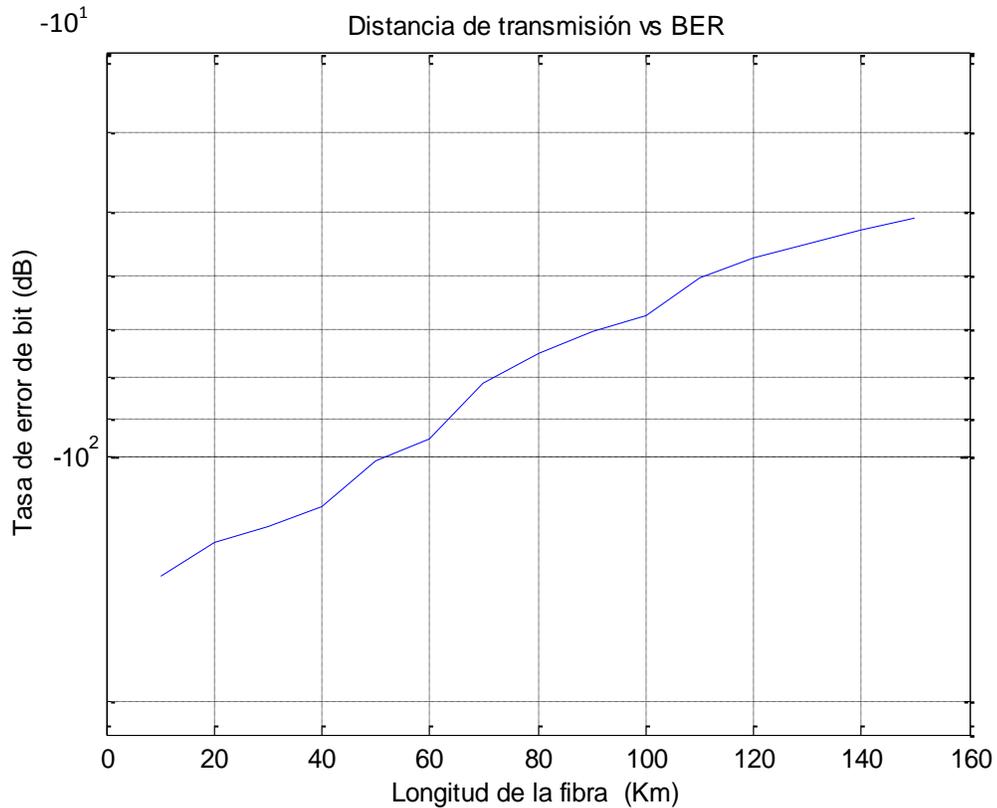
Al realizar el cálculo del BER en la arquitectura que emplea el modelo SSSF, se ha obtenido un BER de  $4.03E-05$  para una distancia de transmisión de 50 Km, mientras que para la segunda arquitectura que utiliza el modelo lineal de la fibra, se ha obtenido un BER de  $1.23E-05$  en la misma longitud de fibra óptica, con lo que se comprueba que la tasa de error de bit para ambas arquitecturas se encuentra dentro del rango permisible. El cálculo del BER se lo ha realizado tomando en cuenta las características de la fibra monomodo con el estándar ITU-T G.655.B, cuyos parámetros se encuentran detallados en la tabla 3 de la presente investigación. A continuación se muestra el gráfico del BER (dB) versus la distancia de transmisión (Km) del enlace para cada arquitectura.

Figura 42 Distancia de transmisión vs BER (Primera arquitectura)



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Figura 43 Distancia de transmisión vs BER (Segunda arquitectura)



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

La gráfica del BER vs distancia se lo ha realizado en una escala semilogarítmica, esto nos muestra una curva típica del BER en una transmisión por fibra óptica, en las figuras 42 y 43 se puede observar claramente que si se va aumentando la distancia de transmisión, es decir la longitud de la fibra, la tasa de error de bit va incrementándose de manera logarítmica. El BER que se obtiene en la primera arquitectura basada en el método SSSF es ligeramente mayor al que se obtiene en la arquitectura basada en el modelo lineal de la fibra, el motivo principal a que se generen más errores es que el método SSSF toma en cuenta dispersión de hasta segundo orden y además su atenuación es mucho mayor que la que se presenta para el modelo lineal, por lo tanto la mayor atenuación y los factores dispersivos hacen que se genere un mayor número de bits errados en la arquitectura basada en el modelo SSSF.

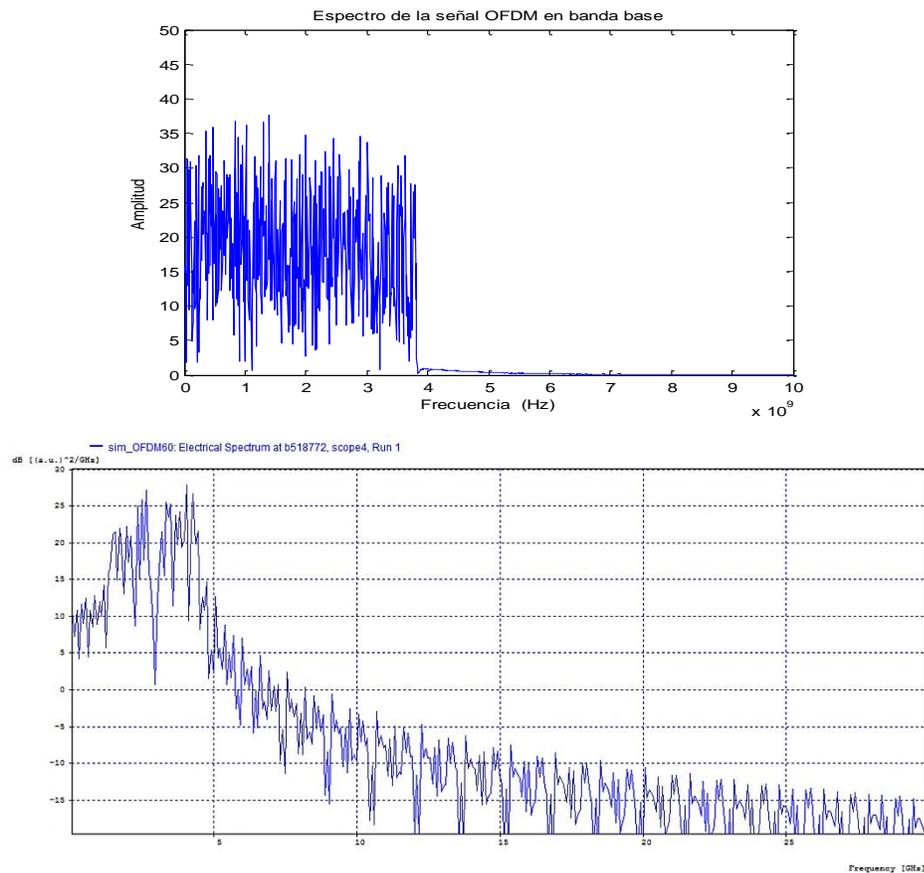
## 4.2 Comparación de los parámetros del enlace del modelo elegido y los obtenidos mediante el software comercial.

A continuación se realiza una comparación de los parámetros obtenidos en el software de cálculo matemático Matlab y en el software especializado OptSim, se verifica los espectros obtenidos de las señales de ambos programas, se verifica su precisión y facilidad de implementación.

### 4.2.1 Comparación del enlace RoF basado en el método Split-Step simétrico.

La figura 44 muestra la comparación en la generación de la señal OFDM a 4 GHz mediante Matlab y OptSim.

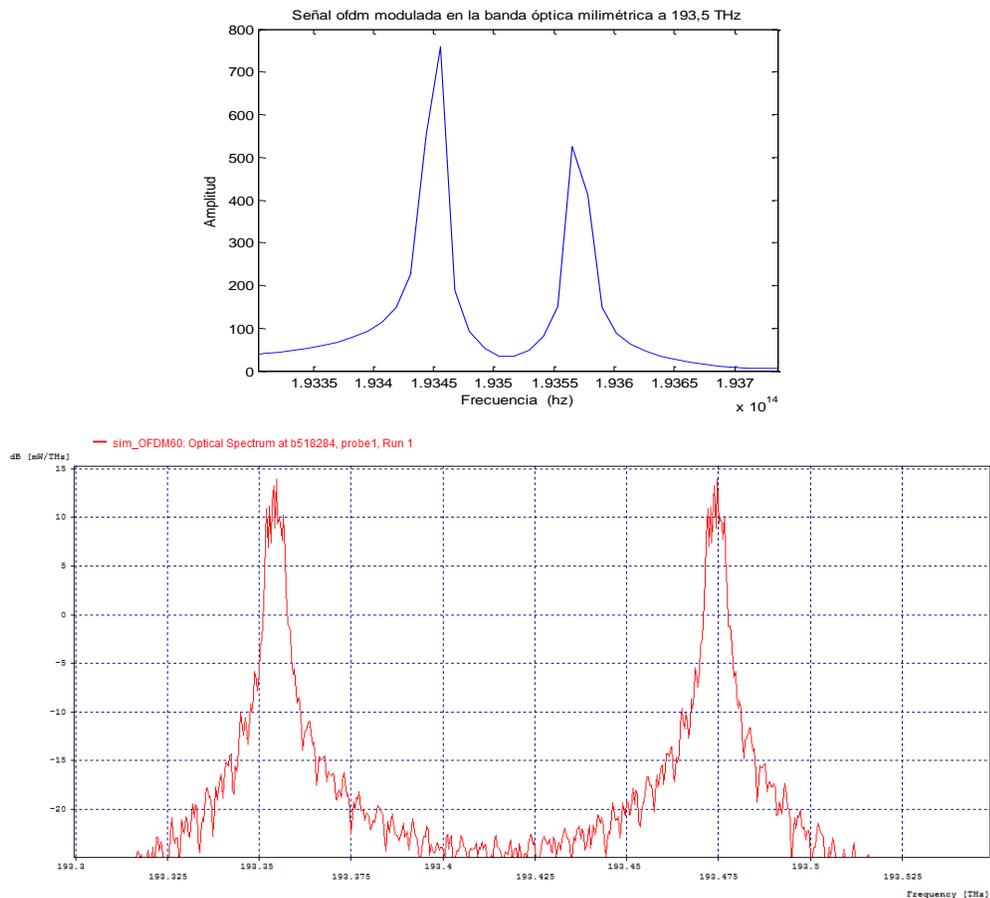
Figura 44 Comparación de la señal OFDM de entrada generada en Matlab y OptSim™



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

La figura muestra la comparación en la generación de la señal OFDM a 4GHz mediante Matlab y OptSim. Se puede observar que en el caso de Matlab, al tratarse de un software de cálculo matemático que trabaja con operaciones exactas para realizar el procesamiento de señales, genera los espectros de las señales con atenuaciones bastante pronunciadas o que caen a cero de manera repentina, por lo cual nos presenta un modelo que puede servir para el estudio de este enlace pero no representa los espectros reales de las señales. OptSim, por su parte al ser un software especializado en enlaces de fibra óptica, genera espectros de señales que se acercan bastante a lo que se obtendría en la vida real, ya que las atenuaciones de las señales se hacen de manera suave y su espectro posee más detalle en la gráfica resultado, con lo cual se puede apreciar de mejor manera las señales que son de interés en el estudio de este enlace.

Figura 45 Comparación de la señal óptica de entrada generada en Matlab y OptSim™



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Como se puede apreciar de mejor manera en la gráfica anterior, Matlab nos indica en que frecuencia está la señal de interés mientras que OptSim permite observar de mejor manera el espectro de la señal así como la modulación realizada. Estos cálculos como es de esperar demoran más tiempo en compilar, es por esto que se midió los tiempos de ejecución en un pc con las mismas características de hardware obteniendo los siguientes tiempos:

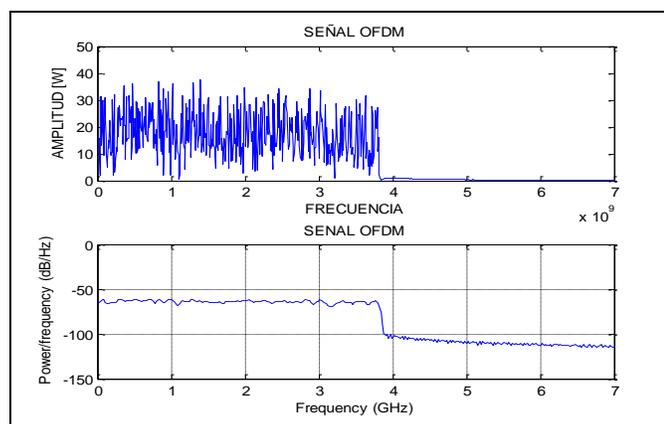
- Tiempo de compilación del programa en Matlab: 60.611 ps.
- Tiempo de compilación del programa en OptSim: 9 s.

Como se puede observar, OptSim tarda más tiempo en compilar el programa, pero esto se justifica en la calidad de resultados que ofrece y en la gran cantidad de parámetros de entrada que acepta para la simulación de la red.

#### 4.2.2 Comparación del enlace RoF basado en el método de la función de transferencia de la fibra óptica.

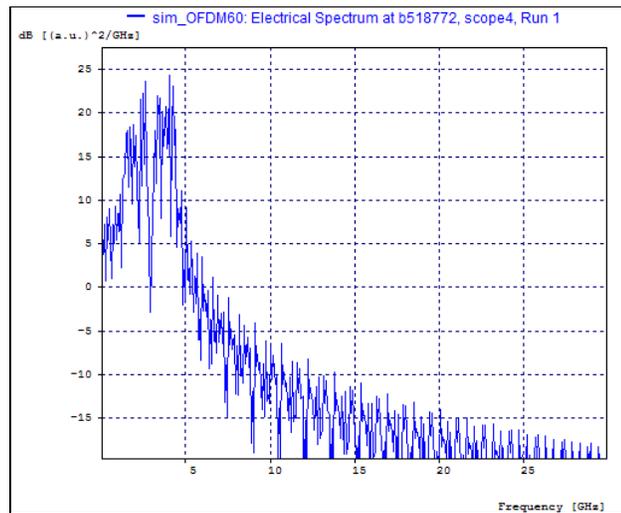
Se procede con la comparación de las señales obtenidas en el software Matlab como el software OptSim, la siguiente figura representa la señal de entrada en los dos programas en banda base a 4GHz:

Figura 46 Espectro de la señal OFDM generada en Matlab



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

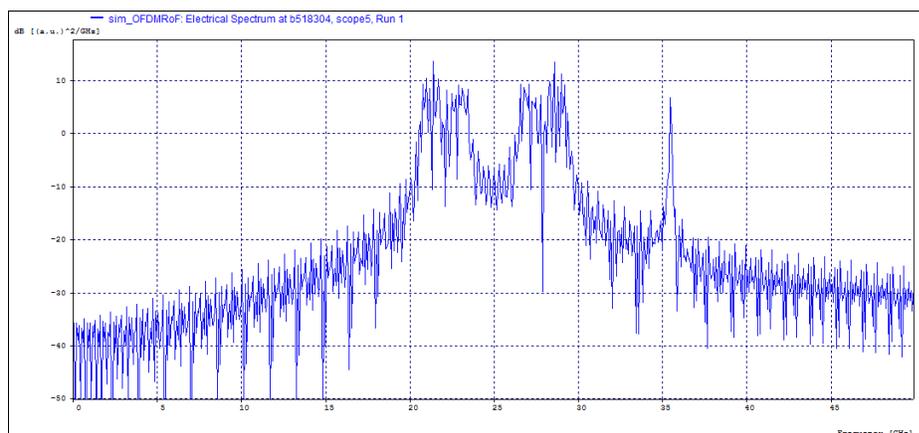
Figura 47 Espectro de la señal OFDM generada en OptSim



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

El símbolo OFDM fue desplazado en frecuencia mediante un oscilador de 25GHz como se indica en la figura 48 Seguidamente se generó un tono a 35.5 GHz para generar la mezcla de frecuencias adecuadas que permitan generar en el receptor la frecuencia de 60GHz deseada.

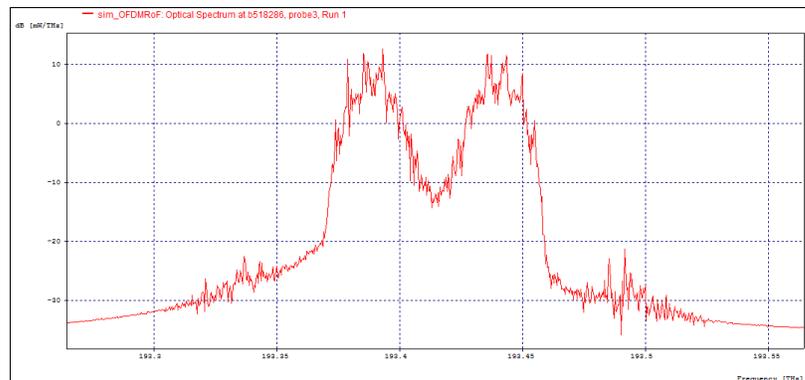
Figura 48 Señal total, suma de las señales que ingresan OFDM, 25Ghz y 35.5Ghz (Matlab)



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

La mezcla de señales se modulan usando una portadora óptica mediante modulación externa usando un MZM en la longitud de onda de 1550nm (193.41 THz), como se observa:

Figura 49 Señal atenuada de salida del campo óptico (OptSim)



Elaborado por: Andrés Mogro y Elizabeth Amagua

Al igual que en el primer modelo puede observar que en el caso de Matlab se genera los espectros de las señales con atenuaciones bastante pronunciadas o que caen a cero de manera repentina, mientras que OptSim, genera espectros de señales que se acercan bastante a lo que se obtendría en la vida real, ya que las atenuaciones de las señales se hacen de manera suave y su espectro posee más detalle, además que permite una correcta visualización de los armónicos de las señales.

Igualmente en este modelo, se midió los tiempos de ejecución en un pc con las mismas características de hardware obteniendo los siguientes tiempos:

- Tiempo de compilación del programa en Matlab: 90.611  $\mu$ s.
- Tiempo de compilación del programa en OptSim: 12 s.

En este segundo caso se comprueba igualmente que OptSim tarda más en la compilación pero presenta mejores resultados.

La segunda arquitectura presenta un mayor tiempo computacional, ya que realiza un mayor número de cálculos, debido a que no modula directamente la señal OFDM en la banda óptica, sino que se basa en la suma de armónicos para generar la señal de 60GHz, lo cual implica tiempo de procesamiento adicional ya que se deben realizar primero la suma de las señales de 25 GHz y 35.5 GHz y después la modulación de la señal OFDM en la suma de estas señales. Este tipo de generación de señal milimétrica involucra el uso de más componentes en el transmisor, lo cual se puede verificar en el diagrama de bloques de la segunda arquitectura en la figura 17.

La primera arquitectura, mostrada en la figura 9, modula directamente la señal OFDM en la banda óptica, con lo cual en el número de componentes empleados en esta arquitectura es menor, lo cual implica que la implementación de esta arquitectura sea más sencilla y tenga un menor tiempo computacional.

OptSim es un software muy poderoso en el procesamiento de señales ya que permite la implementación de enlaces ópticos que trabajan en bandas de frecuencias muy elevadas, con una interface gráfica de fácil aprendizaje para el usuario, y permite el estudio de las señales que se obtienen aproximando estas señales a las que se obtienen en realidad, por lo tanto OptSim resulta de gran utilidad en la simulación de redes ópticas, ya que permite evaluar la factibilidad en la implementación de un sistema de telecomunicaciones y mejorar ciertos parámetros del enlace antes de realizar todo el tendido de la red, evitando así costos innecesarios y optimizando el tiempo.

#### **4.3 Redacción de un artículo científico en base a los resultados obtenidos.**

La redacción del artículo científico se encuentra en el Anexo 1 del presente documento, este artículo se fundamenta en la investigación realizada del estado del arte de la tecnología RoF, en los modelos matemáticos obtenidos, además presenta un análisis de resultados obtenidos de las simulaciones implementadas en software.

## CONCLUSIONES

Las redes de radio sobre fibra óptica (RoF), son una tecnología de gran capacidad, muy versátiles y con gran escalabilidad. Estas redes, a futuro permitirán una mejor integración de las redes cableadas con las inalámbricas, lo cual permitirá al usuario tener varios servicios multimedia de calidad a costos relativamente bajos.

El comportamiento de una fibra óptica monomodo se simuló mediante el modelado matemático de la función de transferencia y el modelo SSSF obtenidos de la NLSE, que toman en cuenta los parámetros intrínsecos de la fibra, como son la atenuación y dispersión. Obteniéndose un tiempo de cómputo de  $90.611\mu\text{s}$  para la función de transferencia y  $60.611\text{ps}$  para el SSSF, verificando que el método SSSF requiere de un menor costo de procesamiento respecto de la función de transferencia y presenta una mayor precisión debido a que toma pasos diferenciales de la fibra óptica más pequeños.

Se ha verificado como se ve afectada la amplitud de la señal OFDM a la salida de la fibra debido a la atenuación de  $0.2\text{ dB/Km}$ , se ha comprobado además que la atenuación es independiente del tipo de arquitectura implementada, y que solo depende de la distancia de la fibra. Se puede notar para estos enlaces que en una variación de  $30\text{ Km}$  de fibra, la señal se atenúa cerca de  $6\text{ dB}$ , lo que se hace necesaria la implementación de una etapa de amplificación óptica adicional en el receptor que permita recuperar la señal original sin pérdidas.

Se ha verificado los efectos que produce la dispersión cromática de la fibra cuando se transmiten señales con frecuencias muy elevadas (ondas milimétricas), los cuales generan un desplazamiento de fase en la señal, además de un retraso en el tiempo de llegada de la señal útil al receptor, lo que provoca un ensanchamiento del espectro de la señal recibida y pérdida de datos en el receptor.

La arquitectura basada en el modelo SSSF presentaría un costo mayor a la arquitectura basada en el modelo de la función de transferencia de la fibra, debido a que el costo de los equipos utilizados para generar directamente una señal de 60GHz es mucho mayor que el costo que se tendría en equipos que generen señales a frecuencias menores (25 y 35.5 GHz), y que permiten obtener los mismos resultados de modulación.

Los resultados obtenidos al comparar los modelos implementados en Matlab con lo obtenidos con OptSim™ permiten comprobar la validez de los mismos, permitiendo tener una herramienta válida y versátil pues su código permite simular cualquier tipo de fibra óptica monomodo y para cualquier señal de entrada generada en Matlab no limitándose a realizar estudios de sistemas de RoF.

## RECOMENDACIONES

Para compensar la atenuación que se produce para distancias de transmisión mayores a 50 Km, se podría implementar etapas de amplificación óptica, utilizando amplificadores de fibra monomodo dopada de erbio EDFA, ya que trabajando a 1550nm posee características que lo convierten en un medio amplificador ideal de fibra óptica para los sistemas de comunicación modernos. El amplio espectro de ganancia (3 ~ 4THz) de un EDFA, también hace que sea práctico para implementar sistemas con multiplexación por división de longitud de onda WDM.

De la misma manera para mitigar el ensanchamiento que se produce en la señal a distancias de transmisión mayores a 50 Km, se podría implementar etapas de ecualización óptica para reducir los efectos dispersivos en la señal transmitida, también se podría investigar e implementar técnicas de codificación alternativas o la utilización de moduladores Mach-Zehnder en cascada para la conversión electro-óptica de la señal, ya que en investigaciones presentadas recientemente se ha obtenido de manera experimental mayor robustez en el sistema RoF y menor sensibilidad a los componentes de dispersión de segundo y tercer orden.

Sería de gran importancia realizar el análisis y simulación de un enlace de RoF similar al presentado en esta investigación basado en las soluciones analíticas de la NLSE, como por ejemplo la función de transferencia de las series de Volterra, la cual resulta una aproximación analítica eficiente para resolver la NLSE, y que además podría convertirse en una herramienta para diseñar ecualizadores ópticos con el fin de compensar la dispersión lineal y las no linealidades en las fibras.

## LISTA DE REFERENCIAS

- Abellan, D., Franco, J., & Pascual, F. (2007). *Sistemas de comunicaciones opticas*. Editorial Universitat Politecnica de Valencia.
- Alves, T. M., & Cartaxo, A. V. (2013). Transmission of OFDM-UWB Radio Signals in IM-DD Optical Fiber Communication Systems Employing Optimized Dual Parallel Mach-Zehnder Modulators. *5*, 13.
- B. Ftaich-Frigui, C. A.-B., & Carsenat, D. (2011). OFDM-WiMAX Modulation of a Reflective Amplified Modulator in Radio-Over-Fiber Context. *23*, 3.
- Chen, L., Wen, S., Li, Y., He, J., Wen, H., Shao, Y., y otros. (nov. de 2007). Optical Front-Ends to Generate Optical Millimeter-Wave Signal in Radio-Over-Fiber Systems With Different Architectures. *Lightwave Technology, Journal of*, *25*(11), 3381-3387.
- Chia-Chien Wei, C.-T. L.-I., & Jiang, W.-J. (2012). Adaptively Modulated OFDM RoF Signals at 60 GHz Over Long-Reach 100-km Transmission Systems Employing Phase Noise Suppression. *24*, 3.
- Dewar Willmer Rico Bautista\*, E. G. (2011). BROADBAND NETWORK TECHNOLOGIES. *1*, 8.
- Dong, Y., Li, Z., Tian, X., Wang, Q., He, H., Lu, C., y otros. (aug.15, de 2007). Optical Fiber Polarization Interferometer for Performance Improvement in Radio-Over-Fiber Systems. *Photonics Technology Letters, IEEE*, *19*(16), 1236-1238.
- Dr. Mary Ann Ingram, G. A. (2000). OFDM Simulation Using Matlab, Smart Antenna Research Laboratory. *15*, 21.
- E. Giacomidis, A. T., & Tomkos, I. (2012). Extensive Comparisons of OpticalFast-OFDM and Conventional Optical OFDM for Local and Access Networks. *4*, 10.
- Guillory, J., Meyer, S., Sianud, I., Ulmer-moll, A., Charbonnier, B., Pizzinat, A., y otros. (sept. de 2010). Radio-Over-Fiber Architectures. *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, *5*(3), 30-38.
- He, K., & Li, X. (2010). An Efficient Approach for Time-Domain Simulation of Pulse Propagation in Optical Fiber. *28*, 7.
- Hraimel, B., Zhang, X., Jiang, W., Wu, K., Liu, T., Xu, T., y otros. (feb.15, de 2011). Experimental Demonstration of Mixed-Polarization to Linearize Electro-

- Absorption Modulators in Radio-Over-Fiber Links. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 23(4), 230-232.
- Jhon James Granada Torres, C. M. (2011). Toward Next Generation Broadband Radio-over-Fiber Systems: Technological Challenges in the Millimeters-Wave Band. 29, 24.
- Jiang, W.-J., Lin, C.-T., Ng'oma, A., Shih, P.-T., Chen, J., Sauer, M., y otros. (aug.15, de 2010). Simple 14-Gb/s Short-Range Radio-Over-Fiber System Employing a Single-Electrode MZM for 60-GHz Wireless Applications. *Lightwave Technology, Journal of*, 28(16), 2238-2246.
- Joffray Guillory, E. T., & Li, H. (2011). A 60 GHz Wireless Home Area Network With Radio Over Fiber Repeaters. 29, 7.
- Lee, J.-H. (2000). Analysis and Characterization of Fiber Nonlinearities with Deterministic and Stochastic Signal Sources. 10, 183.
- Li, F., Yu, J., Cao, Z., Xiao, J., Chen, H., & Chen, L. (march de 2012). Reducing the peak-to-average power ratio with companding transform coding in 60 GHz OFDM-ROF systems. *Optical Communications and Networking, IEEEOSA Journal of*, 4(3), 202-209.
- Li, W., Zhu, N. H., Wang, L. X., Qi, X. Q., & Xie, L. (sept. de 2011). Tunable Carrier Generation and Broadband Data Upconversion for RoF Systems Based on Stimulated Brillouin Scattering. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 59(9), 2350-2356.
- Linghui RAO, X. S. (2006). OFDM-ROF System and Performance Analysis of Signal Transmission. 6, 4.
- Lv, M., Yang, A., Hua, Y., Shen, S., Cui, J., & nan Sun, Y. (2010). Simultaneous modulation and transmission of 10-Gb/s baseband and 60-GHz microwave signals in a radio-over-fiber system. *Optics Communications*, 283(21), 4203-4207.
- P.Agrawal, G. (2002). Fiber Optic Communication Systems. 2, 561.
- Pascual, F. R. (2000). Estudio de efectos no lineales en dispositivos fotónicos y su aplicacion en sistemas radio sobre fibra óptica.
- R. Herschel, C. G. (2011). Radio-over-Fiber Systems for Next Generation Wireless Access. 7, 5.
- S. Pipatsarta, A. A. (2011). Nano Radio and RoF Applications. 12.

- Sharma, V., Singh, A., & Sharma, A. K. (2012). Challenges to radio over fiber (RoF) technology and its mitigation schemes – A review. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 123(4), 338-342.
- TELNET. (2009). Fibra Óptica para NGN, Dispersión Cromática Y PMD. 17, 26.
- Varallyay, Z. K. (2007). Nonlinear wave propagation and ultrashort pulse compression in step-index and microstructured fibers. 4, 90.
- Wake, D., Nkansah, A., Gomes, N., de Valicourt, G., Brenot, R., Violas, M., y otros. (aug.15, de 2010). A Comparison of Radio Over Fiber Link Types for the Support of Wideband Radio Channels. *Lightwave Technology, Journal of*, 28(16), 2416-2422.
- Wei, C.-C., Lin, C.-T., I Chao, M., & Jiang, W.-J. (jan.1, de 2012). Adaptively Modulated OFDM RoF Signals at 60 GHz Over Long-Reach 100-km Transmission Systems Employing Phase Noise Suppression. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 24(1), 49-51.
- Xiao, Y., & Yu, J. (s.f.). *Optics Communications*(3), 229-232.
- Xun Li, X. C. (2005). A Broad-Band Digital Filtering Approach for Time-Domain Simulation of Pulse Propagation in Optical Fiber. 23, 12.
- Zhang, C., Duan, J., Hong, C., Guo, P., Hu, W., Chen, Z., y otros. (feb.15, de 2011). Bidirectional 60-GHz RoF System With Multi-Gb/s -QAM OFDM Single-Sideband Modulation Based on Injection-Locked Lasers. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 23(4), 245-247.
- Zhang, Y. (2011). Development of Millimeter-Wave Radio-over-Fiber Technology. 9, 9.
- Zizheng Cao, J. Y., & Chen, L. (2010). Reduction of Intersubcarrier Interference and Frequency-Selective Fading in OFDM-ROF Systems. 28, 7.

**Anexo 1 Artículo científico en base a los resultados obtenidos**













## Anexo 2 Código Matlab para la simulación de la arquitectura del modelo SSSF

```
%=====
% SIMULACIÓN DE UNA TRANSMISIÓN POR UN CANAL DE FIBRA ÓPTICA
% EL PROGRAMA UTILIZA EL MÉTODO SPLIT-STEP SIMÉTRICO
%=====

clc ;
clear all;
close all;

%=====
% Definición de los parámetros de entrada %
%=====
tic;
fp=60e9;          % frecuencia de la señal portadora de rf en Hertz (Hz)
fopt=193.5e12;   % frecuencia de la señal óptica milimétrica en (Hz)
fm=500e12;       % frecuencia de muestreo en Hertz (Hz)
pas=1/fm;        % duración del paso del eje del tiempo
N=40959;         % número de puntos de la señal a graficar
limite=N.*pas;   % límite del gráfico
tau=0:pas:limite; % definición del eje del tiempo
tl = length(tau)/2; % valor auxiliar para obtener w
w = 2*pi*fm*(-tl:(tl-1))/length(tau); % velocidad angular (rad/s)
df=fm/((length(tau)-1)); % paso de eje de frecuencia
f=-fm/2:df:fm/2; % definición del eje de frecuencia
k=5e2;

%=====
% Definición de los parámetros físicos %
%=====

c = 3e5;          % velocidad de la luz [km/sec]
ram0 = 1.55e-9;   % longitud de onda central [km]
k0 = 2*pi/ram0;
n2 = 6e-13 ;      % [1/mW]
gamm = k0*n2 ;    % [1/(km*mW)]
alphaDB = 0.3 ;   % [dB/km] pérdida de potencia (atenuación)
alpha = alphaDB/(10*log10(exp(1))); % [1/km]atenuación en escala lineal
Dp = 1;          % [ps/nm.km] % parámetros de la dispersión
beta2 = -(ram0)^2*Dp/(2*pi*c) % [sec^2/km]parámetros de la dispersión

%=====
% Señal OFDM a transmitirse %
%=====

% DVB-T 2K Transmission
% The available bandwidth is 8 MHz
% 2K is intended for mobile services
% Parámetros de transmisión DVB-T
% Digital Video Broadcasting
% Estándar para la TV Digital terrestre Europea
```

```

Tu=224e-9;           % período útil del simbolo OFDM
T=Tu/2048;          % período elemental de banda base
G=0;                % elección de 0 1/4, 1/8, 1/16, and 1/32
delta=G*Tu;         % duración de la banda de guarda
Ts=delta+Tu;        % período total del simbolo OFDM
Kmax=1705;          % número de subportadoras de la señal
Kmin=0;
FS=4096;            % longitud del vector IFFT/FFT
q=10;               % tasa entre periodo de portadora y periodo elemental
fc=q*1/T;           % frecuencia de la portadora
Rs=4*fc;            % período de la simulación
% Generador de datos (A)
M=Kmax+1;
rand('state',0);    % se genera valores aleatorios para la señal
a=-1+2*round(rand(M,1)).'+i*(-1+2*round(rand(M,1))).';
% se guarda los valores en un vector complejo
A=length(a);        % se guarda la longitud del vector a
info=zeros(FS,1);
info(1:(A/2)) = ( a(1:(A/2)).'); % rellenar de ceros el vector
info((FS-((A/2)-1)):FS) = ( a((A/2)+1):A).');
% vector final de la información
% Generador de subportadoras (B)
carriers=FS.*ifft(info,FS); % genera las subportadoras (total 4096)
% simulación D/A
L = length(carriers); % longitud del vector de las subportadoras
chips = [ carriers.';zeros((2*q)-1,L)];
p=1/Rs:1/Rs:T/2;
g=ones(length(p),1); % matriz de 1s para el tamaño del pulso
dummy=conv(g,chips(:)); % convolución del vector g y chips
u=(dummy(1:length(tau))); % punto(C)
ff=(Rs)*(1:(q*FS))/(q*FS); % eje de la frecuencia para señal OFDM
[b,a] = butter(13,1/20);% filtro butterworth para reconstruir la señal
uoft = filter(b,a,u); % señal OFDM en banda base (D)
euoft=fftshift(uoft,q*FS)/FS; % espectro de la señal
figure(1);
subplot(211);
% ploteo del espectro de la señal OFDM
plot(ff,abs(fft(uoft,q*FS))/FS); title ('Espectro de la señal OFDM en
banda base')
xlabel ('Frecuencia (Hz)')
ylabel ('Amplitud')
axis([0 10e9 0 50])
subplot(212);
pwelch(uoft,[],[],[],Rs); % Densidad espectral de potencia
title ('Estimado de la Densidad espectral de potencia')
axis([0 40 -150 -25])

%=====
% Modulación de la señal OFDM en la portadora óptica %
%=====

Po = 2;             % pico de potencia inicial de la fuente se señal [mW]
A_sup=3;           % amplitud de la banda lateral superior
A_inf=3;           % amplitud de la banda lateral inferior
W0=2*pi*fopt;      % velocidad angular de la señal óptica

```

```

Wrf=2*pi*fp;          % velocidad angular de la señal de radio frecuencia

%señal portadora rf y ehf
at=(A_sup.*cos((W0+Wrf).*tau)) + (A_inf.*cos((W0-Wrf).*tau)); a0 =
fft(at(1,:)); % obtención del espectro de la señal
af =fftshift(a0); % campo de entrada en el dominio de la frecuencia
figure (2)
plot (f,abs(af)); % ploteo de la señal portadora de rf y ehf
title ('Portadora óptica con bandas laterales a 60 GHz');
xlabel ('Frecuencia (Hz)')
ylabel ('Amplitud')
%Upconverter
en=euoft.'.*af; % modulación de la señal OFDM en la portadora óptica
figure (2)
%ploteo de la señal ofdm modulada en portadora de ondas milimétricas
plot (f,abs(en));
title ('señal ofdm modulada en la banda óptica milimétrica a 193,5
THz');
xlabel ('Frecuencia (Hz)')
ylabel ('Amplitud')

%=====
% Distancia de transmisión y Dispersión %
%=====

zfinal = 50; % distancia de propagación [km]
pha_max = 0.01;% desplazamiento de fase máximo permitido debido al
operador no linear[rad]
% pha_max = h*gamma*Po (h = simulation step length)
h = fix(pha_max/(gamm*Po)); % longitud del paso de la simulación [km]
M = zfinal/h; % numero de partición
% Definición del operador exponencial de la Dispersión
% Dh = exp((h/2)*D^), D^=-(1/2)*i*sgnb2*P, P=>(-i*w)^2
Dh = exp((h/2)*(-alpha/2+(i/2)*beta2*w.^2)); % Operador de dispersión

%=====
% Propagación a través de la fibra óptica %
%=====

% llamada a la subrutina sym_ssf.m para el método de Split-step
simétrico
[bt,bf] = sym_ssf(M,h,gamm,Dh,en); % llamada a la subrutina

%=====
% Receptor óptico %
%=====

% preamplificador en el receptor
% el amplificador óptico se asume como ideal( respuesta plana en
frecuencia y sin ruido)
GdB = 25; % ganancia de potencia del amplificador óptico [dB]
gainA = sqrt(10^(GdB/10)); % ganancia de campo en escala lineal
sal = gainA*bf; % amplificador de la señal
% ploteo de la señal recibida
figure (3)
plot(f,abs(en),f,abs(sal),'r')

```

```

title ('Señales ópticas de entrada y salida de la fibra óptica');
xlabel ('Frecuencia (Hz)')
ylabel ('Amplitud')
legend( 'señal de entrada' , 'señal de salida' )
salt=ifft(sal); % señal de salida en función del tiempo (ifft)
it=(0.6).*((abs(salt)).^2); % fotodetector óptico u.[mod(E(t))]^2

[num,den] = butter(16,1/2,'low');
% filtro butterworth orden 16 pasabajos
fil = filter(b,a,salt); % filtrado de la señal
iffr=abs(fftshift(fft(it(1,:)))); % señal de salida en función de la
frecuencia
[H,F] = freqz(b,a,FS,RS); % filtro digital de respuesta en frecuencia
hf=rectpuls(ff,8e9); % función de transferencia del filtro pasabajos
Sf=hf.*iffr;
Sf=k.*Sf; % amplificación de la señal en banda base
figure (4)
subplot(211);
% ploteo de la señal OFDM recibida
plot(ff,abs(fft(uoft,q*FS))/FS,ff,Sf,'r'); title ('Señal OFDM
recuperada en el receptor');
xlabel ('Frecuencia (Hz)')
ylabel ('Amplitud')
legend( 'señal de entrada' , 'señal de salida' )
axis([0 10e9 0 45])
subplot(212);
pwelch(fil,[],[],[],120e9); % Densidad espectral de potencia
axis([0 40 -300 -150])
title ('Densidad espectral de potencia de salida')

%=====
% Cálculo del BER %
%=====

cor=1;
for lag= 1 : length(Sf)-length(euoft)-1;
cor(lag)= euoft*Sf(lag : length(euoft)-1+lag)';
end
off= find(cor== max(cor))-1;
err= euoft-Sf(off+1:length(euoft)+off)';
te= sum(abs(err));
lsamp=10e3;
ber=(1/lsamp)/(te/length(euoft))
telapsed = toc(tic)

%=====
% Gráfico del BER %
%=====

%Bit-Error-Rate Simulation UsingMatlab
ber=[10*log(1.30E-08)
10*log(1.02E-06)
10*log(1.03E-05)
10*log(3.03E-05)
10*log(6.03E-05)

```

```

10*log(9.41E-05)
10*log(3.31E-04)
10*log(6.30E-04)
10*log(9.03E-04)
10*log(1.54E-03)
10*log(4.01E-03)
10*log(6.81E-03)
10*log(9.08E-03)
10*log(9.96E-03)
10*log(1.41E-02)
]
lon=10:10:150;
figure (1)
semilogy(lon,ber)
axis([0 160 -300 -22]);
grid on
title ('Distancia de transmisión vs BER')
xlabel ('Longitud de la fibra (Km)')
ylabel ('Tasa de error de bit (dB)')

% Subrutina sym_ssf

function [to,fo] = sym_ssf(M,h,gamma,Dh,uf0)
% Symmetrized Split-Step Fourier Algorithm
%
% ==Inputs==
% M = Simulation step number ( M*h = simulation distance )
% h = Simulation step
% gamma = Nonlinearity coefficient
% Dh = Dispersion operator in frequency domain
% uf0 = Input field in the frequency domain
%
% ==Outputs==
% to = Output field in the time domain
% fo = Output field in the frequency domain
%
% written by Jong-Hyung Lee
for k = 1:M
%=====
% Propagation in the first half dispersion region, z to z+h/2
%=====
Hf = Dh.*uf0;
%=====
% Initial estimate of the nonlinear phase shift at z+(h/2)
%=====
% Initial estimate value
ht = ifft(Hf); % time signal after h/2 dispersion region
pq = ht.*conj(ht); % intensity in time
u2e = ht.*exp(h*i*gamma*pq); %Time signal
%=====
% Propagation in the second Dispersion Region, z+(h/2) to z+h
%=====
u2ef = fft(u2e);
u3ef = u2ef.*Dh;
u3e = ifft(u3ef);

```

```

u3ei = u3e.*conj(u3e);
%=====
% Iteration for the nonlinear phase shift(two iterations)
%=====
u2 = ht.*exp((h/2)*i*gamma*(pq+u3ei));
u2f = fft(u2) ;
u3f = u2f.* Dh;
u4 = ifft(u3f);
u4i = u4.*conj(u4);
u5 = ht.*exp((h/2)*i*gamma*(pq+u4i));
u5f = fft(u5);
uf0 = u5f.*Dh;
u6 = ifft(uf0); u6i = u6.*conj(u6);
%=====
% Maximum allowable tolerance after the two iterations
etol = 1e-5;
if abs(max(abs(u6i))-max(abs(u4i)))/max(abs(u6i)) > etol
disp('Peak value is not converging! Reduce Step Size'),break
end
%=====
end
to = u6; fo = uf0;

```

### Anexo 3 Código Matlab para la simulación de la arquitectura basada en la función de transferencia de la fibra

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%SIMULACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE LA SEÑAL POR EL CANAL DE FIBRA
OPTICA%%
                                %%SISTEMA BASADO EN SINGLE ELECTRODE MZM%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all;
close all;
clc
tic;
N=54000;                                %Numero de puntos 60000
pas=1./400e12;                          %Paso 1 sobre el doble de la frecuencia 400e12
limit=pas.*N;                            %Limite paso por # de valores que queremos ver
N1=40959;                                %número de puntos de la señal a graficar
limite=N1.*pas;                          %límite del gráfico
tau=0:pas:limite;
t=0:pas:limit;                            %Tiempo
fsp=1./pas;                              %Tiempo
f2=25e9;                                  %Frecuencia señal 1
f3=35.5e9;                                %Frecuencia señal 3
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%OFDM%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Tu=224e-9;                                %período útil del simbolo OFDM
T=Tu/2048;                                %período elemental de banda base
G=0;                                      %elección de 0 1/4, 1/8, 1/16, and 1/32
delta=G*Tu;                              %duración de la banda de guarda
Ts=delta+Tu;                             %período total del simbolo OFDM
Kmax=1705;                                %número de subportadoras de la señal
Kmin=0;
FS=4096;                                  %longitud del vector IFFT/FFT
q=10;                                    %tasa entre periodo de portadora y periodo elemental
fc=q*1/T;                                 %frecuencia de la portadora
Rs=4*fc;                                  %período de la simulación
% Generador de datos (A)
M=Kmax+1;
rand('state',0);                          %se genera valores aleatorios para la señal
a=-1+2*round(rand(M,1)).'+i*(-1+2*round(rand(M,1))).';
% se guarda los valores en un vector complejo
A=length(a);                              %se guarda la longitud del vector a
info=zeros(FS,1);
info(1:(A/2)) = ( a(1:(A/2)).');          %rellenar de ceros el vector
info((FS-((A/2)-1)):FS) = ( a(((A/2)+1):A).');
% vector final de la información
% Generador de subportadoras (B)
carriers=FS.*ifft(info,FS);
%genera el vector de las subportadoras (total 4096)
% simulación D/A
L = length(carriers);                    %longitud del vector de las subportadoras
chips = [ carriers.';zeros((2*q)-1,L)];
p=1/Rs:1/Rs:T/2;
g=ones(length(p),1);                    %matriz de 1s para el tamaño del pulso
dummy=conv(g,chips(:));                  %convolución del vector g y chips
u=(dummy(1:length(tau)));               %punto(C)
ff=(Rs)*(1:(q*FS))/(q*FS);             %eje de la frecuencia la señal OFDM
[b,a] = butter(13,1/20);

```

```

%filtro butterworth para reconstruir la señal
uoft = filter(b,a,u);           %señal OFDM en banda base (D)
euoft=fftshift(uoft,q*FS)/FS;   %espectro de la señal
figure(1);
subplot(211);
plot(ff,abs(fft(uoft,q*FS))/FS); %Ploteo del espectro de la señal OFDM
title('SEÑAL OFDM')
xlabel('FRECUENCIA')
ylabel('AMPLITUD [W]')
axis([0 7e9 0 50])
subplot(212);
pwelch(uoft,[],[],[],Rs);      %Densidad espectral de potencia
title('SENAL OFDM')
axis([0 7 -150 0])
V1=abs(uoft)';
V1=V1./max(V1);                %Normalizacion en amplitud de la senal OFDM
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%eje de frecuencia%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fpasso=fsp/(4.*N);             %Grafica el espectro cada el valor fpasso
f=- (fsp)/2:fpasso:fsp/2;      %Calculando el eje de frecuencia
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
v2=0.5.*cos(2*pi*f2*t);        %Ecuación para grafico señal v2 25GHz
figure(2)                       %Grafico de la señal OFDM
Tx1=(fft(v2,4*N+1));           %Espectro de la señal trasformada de fourier
plot(f,abs(fftshift((Tx1))));   %Grafico espectro
axis([0 100e9 0 max(abs(fftshift((Tx1)))])
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('AMPLITUD')
title('SEÑAL DE 25GHz')
% same sola da lo mismos puntos q la longitud q v1 o v2

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CONVOLUCION DE OFDM Y SEÑAL 25GHz%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Vvector=convn(v2,V1);          %Convolucion de la senal v1 y v2,
Vvector=Vvector(1:N+1)./max(Vvector(1:N+1));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Normalización%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

v3=cos(2*pi*f3*t);
figure(3)
Tx3=1*abs(fftshift(fft(v3,4*N+1)));
%Espectro de la señal, trasformada de fourier
plot(f,Tx3);
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
ylabel('AMPLITUD')
title('SEÑAL DE 35.5GHz')
axis([0 100e9 0 max(Tx3)])
figure(4)
Vt=Vvector+v3;                %Suma de Vvector + señal v3
Tx5=abs(fftshift(fft(Vt,4*N+1)));
%Espectro de la señal trasformada de fourier
plot(f,Tx5);
xlabel('FRECUENCIA')
ylabel('AMPLITUD')
title('SEÑAL VTOTAL (OFDM 25GHz 35.5Ghz)')
axis([0 100e9 0 max(Tx5)])
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CAMPO ÓPTICO %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

Eo= 10; %Amplitud campo optico
wc= 2.*pi.*193.5e12; %Frecuencia angular optica
figure(5)
Vpi=100;
Ein=Eo.*cos(wc.*t); %Ecuación campo optico entrada\
Tx6=abs(fftshift(fft(Ein,4*N+1)));
%Espectro de la señal trasformada de fourier
plot(f,Tx6);
xlabel('FRECUENCIA [THz]')
ylabel('AMPLITUD')
title('SEÑAL CAMPO ÓPTICO DE ENTRADA')
axis([193e12 194e12 0 max(Tx6)])
Eout= Ein.*cos((pi./(2.*Vpi)).*(Vpi+ Vt));
%Ecuación campo optico de salida
figure(6)
Tx=((fft(Eout,4*N+1)));
%Espectro de la señal trasformada de fourier
plot(f,abs(fftshift(Tx)));
xlabel('FRECUENCIA [THz]')
ylabel('AMPLITUD')
title('SEÑAL CAMPO ÓPTICO DE SALIDA')
axis([193e12 194e12 0 max(abs(fftshift(Tx)))]])

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%FUNCIÓN DE TRNSFERENCIA DE LA FIBRA OPTICA%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(7)
fo=193.5e12; %Frecuencia optica
D=10; %ps/nm.km para 1550nm coeficiente de disperion
landa0=1./10e9 %Thz longitud de onda de operacion [nm]
c=3e6; %Velocidad de la luz [km/s]
L=100; %Longitud de la fibra [km]
B=square(c./(4.*D.*L.*landa0^2)) %Velocidad bits
alfa=0.2; %Atenuacion
Hf=exp(-alfa/2 - j.*(pi.*D.*((landa0.^2)./c).*L.*B.^2.*((f-fo)./B).^2)); %Función de trasferencia de la fibra óptica

subplot(211)
plot(f,abs(Hf))
xlabel('FRECUENCIA')
ylabel('AMPLITUD')
title('SEÑAL FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA FIBRA ÓPTICA')
subplot(212)
fase=angle(Hf);%Fase de la funcion de transferencia de la fibra optica
plot(f,fase)
xlabel('FRECUENCIA')
ylabel('FASE')
title('SEÑAL FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA FIBRA ÓPTICA (FASE)')
axis([188e12 198e12 -4 4])
fibraf=(Tx.*Hf);
%Multiplicacion campo optico de salida por la funcion de transf de la
fibra optica
figure(8)
plot(f,abs(fftshift(Tx)),f,abs(fftshift((fibraf))), 'r')
%Grafico del espectro de la señal centrado
axis([193.2e12 193.8e12 0 max(abs(fftshift(Tx)))]])

```

```

xlabel('FRECUENCIA')
ylabel('AMPLITUD')
title('SEÑAL EN FUNCION DEL CAMPO OPTICO DE SALIDA Y EN FUNCIÓN DE LA
TRANSFERENCIA DE LA FIBRA OPTICA')
title('SEÑAL EN EL CAMPO ÓPTICO')
legend('SEÑAL DE SALIDA DEL CAMPO ÓPTICO','SEÑAL ATENUADA POR LA F.O')

gainA = sqrt(10^(25/10));
fibraf=fibraf.*gainA;
fibrat=ifft(fibraf);
u=0.6; %A/W Resposividad
figure(9)
It=u.*((abs(fibrat).^2)); %Ecuacion para cambio de corriente
If=abs(fftshift(fft(It(1,:)))); %Espectro de la ecuacion
%If=abs(fftshift(fft(It(1,:),4*N+1)));
plot(f,If)
axis([-1e11 1e11 0 max(If)])
xlabel('FRECUENCIA')
ylabel('AMPLITUD')
title('SEÑAL EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE')
f4=56e9;
snelect=0.5.*cos(2*pi*f4*t); %Senal de salida electrica f4=53e9;
%%%%%%%%%%%%CONVOLUCIÓN%%%%%%%%%%%%
sout=convn(It,snelect); %Convolución
% sout=(sout(1:N+1))/max(sout(1:N+1));
soutf=abs(fftshift(fft(sout(1,:)))); %Espectro de la señal scope
k=12;
hf=rectpuls(ff,8e9); %Función de transferencia del filtro pasabajos
Sf=hf.*soutf(1:N1+1); %Filtro pasabajos aplicado a señal (fc=4GHz)
Sf=k.*Sf; %Amplificación de la señal en banda base
figure(10)
plot(ff,abs(fft(uoft,q*FS))/FS,ff,Sf,'r');
%Ploteo de la señal OFDM recibida
axis([0 7e9 0 45])
title('SEÑAL RECUPERADA OFDM');
ylabel('AMPLITUD [W]')
xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
legend('SEÑAL DE ENTRADA','SEÑAL DE SALIDA')
%%%%%%%%%%%%
% Cálculo del BER
%%%%%%%%%%%%
cor=1;
for lag= 1 : length(Sf)-length(euoft)-1;
cor(lag)= euoft*Sf(lag : length(euoft)-1+lag)';
end
off= find(cor== max(cor))-1;
err= euoft-Sf(off+1:length(euoft)+off)';
te= sum(abs(err));
lsamp=10e2;
ber=(te/length(euoft))/lsamp
tiempo=toc(tic)

%%%%%%%%%%%%
% Gráfico del BER
%%%%%%%%%%%%

```

```

ber1=[10.*log(7.96E-07)
10.*log(2.76E-06)
10.*log(5.12E-06)
10.*log(9.97E-06)
10.*log(3.93E-05)
10.*log(7.41E-05)
10.*log(2.93E-04)
10.*log(5.62E-04)
10.*log(8.89E-04)
10.*log(1.23E-03)
10.*log(2.39E-03)
10.*log(3.32E-03)
10.*log(4.16E-03)
10.*log(5.15E-03)
10.*log(6.09E-03)

]
lon1=10:10:150;
figure (2)
semilogy(lon1,ber1)
axis([0 160 -220 -32]);
grid on
title ('Distancia de transmisión vs BER')
xlabel ('Longitud de la fibra (Km)')
ylabel ('Tasa de error de bit (dB)')

```