

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Modulación OFDM y Sistemas Ópticos**  
**Proyecto de Investigación**

**Evelyn Mishell Yáñez Mora**

**Ingeniería Eléctrica y Electrónica**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniera Eléctrica y Electrónica

Quito, 13 de mayo de 2016

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Desarrollo y Simulación de un Sistema Óptico OFDM**

**Evelyn Yánez**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

René Játiva, Ingeniero

Firma del profesor

---

Quito, 13 de mayo de 2016

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: \_\_\_\_\_

Nombres y apellidos: Evelyn Mishell Yáñez Mora

Código: 00108812

Cédula de Identidad: 1716167216

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2016

## **RESUMEN**

OFDM (Multiplexión por División de Frecuencias Ortogonales) es una técnica de modulación ampliamente utilizada por ser una solución frente a problemas de interferencia entre símbolos que se originan por la dispersión de canal o por la propagación multitrayecto propia de sistemas inalámbricos. Las primeras aplicaciones de este tipo de modulación iniciaron en el campo de comunicaciones inalámbricas pero en los últimos años se ha extendido su uso para sistemas de comunicaciones ópticas. En este documento se explicará las principales propiedades de la modulación OFDM y su implementación sobre Matlab. Se estudia también su potencial implementación dentro de un sistema óptico y se demuestra utilizando OPTSim.

Palabras clave: OFDM, modulación, sistemas de comunicaciones ópticas.

## **ABSTRACT**

OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) is a broadband multicarrier modulation method widely used as a solution to problems of intersymbolic interference originated by channel dispersion or by the multi-path spread proper of wireless systems. The first applications of this type of modulation, initiated in the field of wireless communications. But in recent years, it has spread its use for optical communication systems. This document explains the and analyze this modulation inside an optical system by programming in Matlab- the OFDM coder and decoder, as well a subsequent simulation using OPTSIM.

Key terms: OFDM, modulation, optical communication systems.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Introducción.....</b>	<b>9</b>
<b>DESARROLLO.....</b>	<b>10</b>
<b>Conceptos teóricos de modulación OFDM.....</b>	<b>10</b>
Modulación OFDM: Definición, funcionamiento y estructura.....	10
Consideraciones de comunicación por fibras ópticas.....	12
Oportunidades y Dificultades del uso de la modulación OFDM en comunicaciones por Fibra Óptica.....	14
Posibles implementaciones.....	15
<b>Implementación del modulador en Matlab.....</b>	<b>17</b>
Codificador OFDM.....	17
Canal.....	19
Decodificador OFDM.....	19
Resultados.....	20
<b>Simulación del sistema óptico OFDM utilizando OPTSIM.....</b>	<b>26</b>
OPTSIM: Definición, Beneficios y Aplicaciones.....	26
Esquema del sistema de simulación.....	27
Transmisor OFDM: Descripción detallada de los bloques.....	28
Canal Óptico: Descripción detallada de los bloques.....	33
Receptor OFDM: Descripción detallada de los bloques.....	33
Resultados de la Simulación.....	35
<b>Conclusiones.....</b>	<b>38</b>
<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>39</b>
<b>Anexo A: Resultados Numericos de matlab.....</b>	<b>40</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de Simulación para Data Source .....	29
Tabla 2. Parámetros de Simulación para el Modulador M-QAMIQ.....	30
Tabla 3. Parámetros de Simulación del módulo IFFT OFDM .....	30
Tabla 4. Parámetros de Simulación QUADMIXIQ (Synopsys, 2015) .....	31
Tabla 5. Valor de Parámetros Filtro Bessel.....	34
Tabla 6. Valor Parámetros Demodulador M-QAM .....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparación transmisión Multiportadora y de una sola portadora (Vergara, 2008)	10
Figura 2. Esquema mediante bloques para un sistema OFDM (Armstrong, 2009)	11
Figura 3. Función del Prefijo Cíclico (Villa, 2013)	12
Figura 4. Esquema OFDM para Comunicaciones Ópticas	16
Figura 5. Esquema OFDM VPIphotonics (Optical OFDM to Combat Chromatic Dispersion in Long-Haul Systems, s.f.)	17
Figura 6. Código Codificador (Parte 1)	18
Figura 7. Código Codificador (Parte 2)	18
Figura 8. Código Codificador (Parte 3)	19
Figura 9. Código del Canal OFDM	19
Figura 10. Código Decodificador (Parte 1)	19
Figura 11. Código Decodificador (Parte 2)	20
Figura 12. Código Decodificador (Parte 3)	20
Figura 13. Constelación 4QAM en el Codificador	21
Figura 14. Constelación 4QAM en el Decodificador	21
Figura 15. Señal en el tiempo	22
Figura 16. Densidad Espectral de Potencia antes del Canal	22
Figura 17. Densidad Espectral de Potencia después del Canal	23
Figura 18. Densidad Espectral de Potencia antes del Canal (Sin Prefijo Cíclico)	23
Figura 19. Densidad Espectral de Potencia después del Canal (Sin Prefijo Cíclico)	24
Figura 20. Diagrama de Ojo en el Receptor	24
Figura 21. Constelación 16QAM en el Receptor	25
Figura 22. Constelación 16QAM en el Receptor (Ruido 1/40 y 1/14)	25
Figura 23. Constelación 32QAM en el Transmisor	26
Figura 24. Constelación 32QAM con ruido de 1/40 y 1/18	26
Figura 25. Esquema de Simulación Completo	28
Figura 26. Funcionamiento QUADMIXIQ	31
Figura 27. Datos Generados	35
Figura 28. Diagrama de Constelación Transmisor (OptSim)	36
Figura 29. Espectro Señal Óptica antes de la fibra (OptSim)	36
Figura 30. Espectro Señal Óptica después de la fibra (OptSim)	37
Figura 31. Diagrama de Constelación Receptor (OptSim)	37



## INTRODUCCIÓN

Desde la aparición de la modulación OFDM se la ha incluido en sistemas de comunicación wireless debido a las ventajas que ofrece en este tipo de aplicación. Por esta razón y por el desarrollo de la tecnología dentro de las comunicaciones ópticas se decidió, años atrás, adaptar esta técnica de modulación para analizar su funcionamiento en sistemas a base de fibra. Los resultados obtenidos fueron buenos y en la actualidad se está estudiando más a fondo este tema y encontrando mejoras para una aplicación más exitosa.

En la primera parte de este trabajo se explica la teoría básica sobre la modulación OFDM: funcionamiento, estructura y ventajas de su aplicación. De esta manera se entenderá mejor los conceptos y procedimientos usados a lo largo de este documento. Después se explicará de manera más profunda el funcionamiento del transmisor y receptor mediante la implementación de un simulador OFDM programado. Posteriormente se realizará la incorporación de este esquema de simulación sobre un sistema básico de comunicaciones por fibras ópticas usando el simulador especializado OPTSim, para lo cual se realiza un esquema en bloques incluyendo cada una de las partes del codificador y decodificador. Las gráficas de simulación para las constelaciones, espectro, señal eléctrica y otras se las obtiene mediante el uso de osciloscopios y herramientas de graficación dentro de OPTSIM.

## DESARROLLO

### Conceptos teóricos de modulación OFDM

#### Modulación OFDM: Definición, funcionamiento y estructura.

La modulación OFDM es una técnica utilizada ampliamente para sistemas de comunicación de banda ancha porque permite evitar la interferencia intersimbólica también conocida como ISI por sus siglas en inglés para Intersymbolic Interference (Armstrong, 2009). De manera sencilla se puede resumir esta ventaja diciendo que esta modulación se caracteriza por símbolos largos con amplias separaciones entre sí y es por esto que se puede evitar el que se mezclen unos con otros (Villa, 2013). Este es un esquema de modulación multiportadora donde se envían los símbolos paralelamente en subportadoras adyacentes y a esto se debe el nombre de Multiplexación por división de frecuencias (Skellern, 1998). En la Figura 1 se puede observar de manera gráfica la diferencia entre estos tipos de transmisiones.

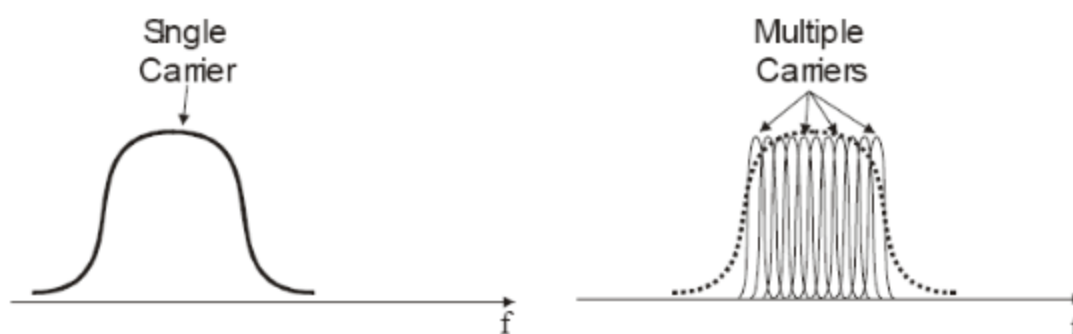


Figura 1. Comparación transmisión Multiportadora y de una sola portadora (Vergara, 2008)

Esta modulación empezó su historia hace varias décadas pero solo el desarrollo de tecnologías como la de microprocesadores y equipos programables de procesamiento digital

permitió su desarrollo y aplicación. El uso de la FFT caracteriza a esta modulación ya que permite que se lleve a cabo la transmisión por subportadoras paralelas y por lo tanto la eliminación de interferencias. OFDM hace referencia a “la transmisión de una trama digital que requiere una gran tasa de transferencia mediante NFFT líneas paralelas más lentas, en subportadoras contiguas y ortogonales, que transportan símbolos” (Vergara, 2008). Los símbolos dentro de este proceso son el resultado de una modulación que puede ser QPSK, 16QAM, 64QAM u otras, de acuerdo a la necesidad. A continuación se muestra la estructura de un sistema con este tipo de modulación, para esto se usa un diagrama de bloques que Jean Armstrong, especialista en el área de comunicaciones digitales, utilizó en su artículo “OFDM for Optical Communications”.

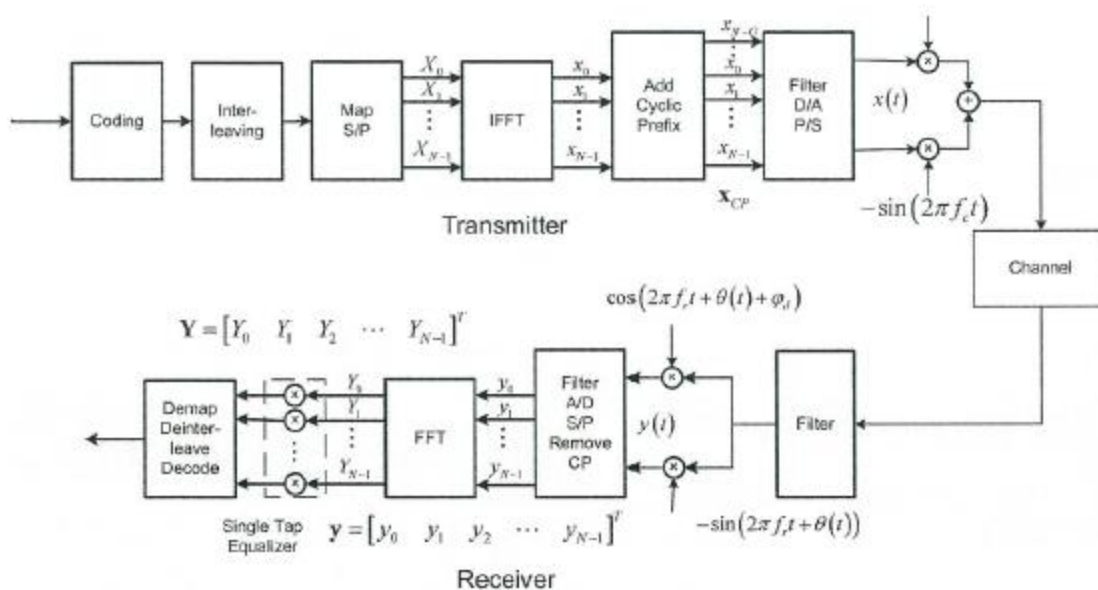


Figura 2. Esquema mediante bloques para un sistema OFDM (Armstrong, 2009)

Vemos en la Figura 2 que tanto la FFT como la IFFT son necesarias. En la primera parte de la comunicación que es el transmisor se requiere emplear la IFFT para hacer un mapeo del contenido de cada subportadora para que posteriormente la FFT, que se encuentra dentro del receptor, se encargue de separar los datos que se han recibido entre subportadoras que además

serán ortogonales entre sí (Villa, 2013). También se puede observar en la Figura 2 las etapas de adición y sustracción del prefijo cíclico que son los pasos claves para combatir las interferencias entre símbolos ya que consisten en intervalos de tiempo que son insertados entre un símbolo y otro. Estas partes son las que se mezclen con el eco o réplicas de la señal del símbolo anterior evitando que el mensaje que se recibe después del prefijo sea afectado debido al multicamino. La función del prefijo cíclico se encuentra resumida en la Figura 3 y es necesario conocer que este prefijo consiste en un porcentaje de la parte final del símbolo que es añadido al inicio. Este porcentaje, durante este trabajo, se expresará en tanto por uno, es decir un valor entre 0 y 1.

### Prefijo Cíclico

- $T_g$  → Tiempo de guarda
- $T_b$  → Tiempo útil del símbolo
- $T_s$  → Tiempo del Símbolo

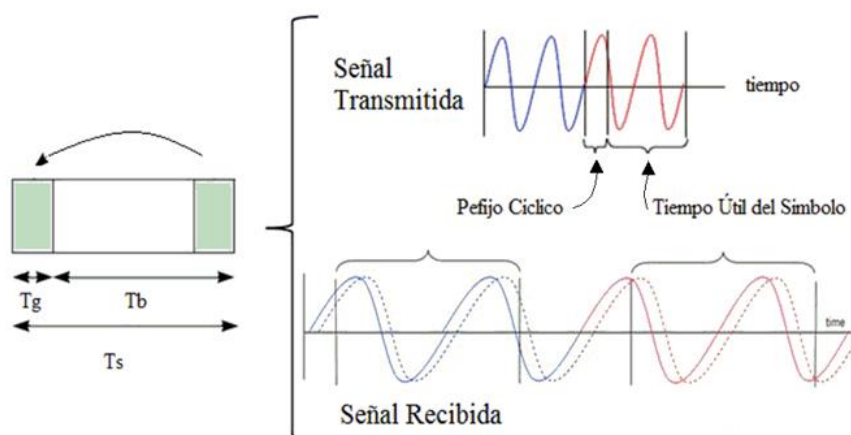


Figura 3. Función del Prefijo Cíclico (Villa, 2013)

Regresando a la Figura 2 se puede apreciar otros bloques como los de conversión Serie-Paralelo y Paralelo-Serie que únicamente modifican la distribución de los datos para que puedan adaptarse a los bloques siguientes.

### Consideraciones de comunicación por fibras ópticas.

A continuación, se explica algunos conceptos en relación a comunicaciones por fibras ópticas como son el canal, la modulación, la fibra óptica y la dispersión.

Para empezar se debe definir al canal como el medio por el cual se va a transmitir una señal. Para este proyecto se empleará un canal de fibra óptica. Con este fin se debe conocer conceptos básicos sobre la modulación y la detección dentro de este campo.

**Modulación.** Pueden ser de dos tipos: directa y externa. La modulación directa consta de una corriente que se encarga de polarizar el láser emisor y una corriente que varía de acuerdo a una señal moduladora para la señal óptica que será transmitida. Este tipo de modulación presenta desventajas en relación al apareamiento del efecto Chirp, además de bajas velocidades de transmisión. Por otro lado, la modulación externa no influye en la corriente del láser. El más conocido es el modulador Mach-Zehnder en el que la señal óptica es modulada en amplitud. La potencia en la salida de este modulador se expresa como:

$$P_{out}(t) = P_{in}(t) \cos^2[\Delta\phi(t)] ; \Delta\phi(t) = \frac{\Delta\phi_1(t) - \Delta\phi_2(t)}{2}$$

Donde  $\Delta\phi(t)$  es la diferencia de fase entre las entradas del modulador (Nieto, 2010).

**Detección.** La detección de señales ópticas suele hacerse a través del uso de fotodiodos que pueden ser de tipo PIN o de tipo APD que se diferencian por la cantidad de electrones que se generan a partir de los fotones que son recibidos. Para la detección en este trabajo se usa un fotodiodo tipo APD debido a su mayor ganancia.

**Fibra Óptica.** La fibra óptica es un canal de transmisión que se caracteriza por su altísimo ancho de banda de transmisión y su alta capacidad de transferir datos, además de su inmunidad ante interferencias. Existen dos tipos: las fibras multimodo y monomodo. Las multimodo transmiten la señal en diferentes modos de propagación asociados a diferentes trayectos posibles en relación a la geometría de la fibra originando una dispersión modal que limita la velocidad de transferencia de datos y la distancia posible de los enlaces de fibra. Las

monomodo por su parte, transmiten un único modo paralelo al eje que corresponde a la fibra (Nieto, 2010). En este proyecto se usará una fibra tipo monomodo y es por eso que es necesario conocer más sobre la dispersión cromática que es la principal fuente de degraación para este tipo de transmisión.

**Dispersión Cromática.** Se origina en el hecho que la señal óptica, a pesar de su coherencia temporal, tiene componentes espectrales diferentes, resultando en velocidades de propagación diferentes para una de ellas y por tanto en una señal degradada en el receptor. En el software de simulación que se usa para el presente trabajo se expresa este parámetro de acuerdo a la siguiente expresión en la que se lo relaciona con la constante de propagación de la portadora  $\beta_2$ .

$$D(\omega_0) = \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} \beta_2 = -\frac{2\pi c}{\lambda_0^2} \beta_2$$

Este parámetro se mide en picosegundos entre nanómetro por kilómetro [ps/nm km].

### **Oportunidades y Dificultades del uso de la modulación OFDM en comunicaciones por Fibra Óptica.**

A continuación se muestran listadas las principales oportunidades que ofrece el uso de la modulación OFDM para sistemas ópticos:

- La característica multiportadora de la modulación OFDM es mejor que otras modulaciones de portadoras únicas. Esto se debe a que los símbolos viajan en subportadoras diferentes y se envía paquetes de N número de símbolos que se encuentran codificados en paralelo (Nieto, 2010).

- Se puede reducir la interferencia entre símbolos mediante la disminución de la tasa de símbolos y a la vez brinda protección frente al retardo de la señal y fallas en la sincronización.
- Su aplicación no necesita cambiar equipos sino una modificación dentro de la programación de las DSP ya existentes.

Así también, se enlista a continuación algunas dificultades del uso de la modulación OFDM en sistemas ópticos:

- Se puede requerir un mayor costo para los amplificadores de potencia dentro de la transmisión ya que estos deben ser de linealidad grande para poder contrarrestar el alto PAPR que ocasiona que los símbolos OFDM tengan márgenes altos entre potencia máxima y potencia mínima instantánea.
- La tasa de transmisión de bits se verá influenciada por la necesidad de incluir al prefijo cíclico, Zero Padding y otros componentes necesarios del sistema.
- Se podría presentar un problema de Intercarrier Interference si no se conserva la condición de ortogonalidad entre las subportadoras ya que de esto depende la eficiencia espectral (Nieto, 2010).

### **Posibles implementaciones.**

En la Figura 4 se muestra una posible implementación para el sistema, incluyendo el transmisor y receptor adecuados para el uso de fibra. Se puede entender cada bloque de datos como N rutas de datos en paralelo con el Transmisor OFDM. Las N rutas son moduladas en N subportadoras usando modulación QAM. Cada una de las salidas del modulador representa una

entrada en el bloque de la IFFT que produce una forma de onda con valores complejos en el dominio del tiempo. La forma de onda es modulada en una portadora RF usando un modulador I/Q produciendo una forma de onda con valores reales. Después se modula esta banda en un modulador óptico. La salida es filtrada para remover las frecuencias diferentes a la de la banda lateral superior y tener una portadora óptica atenuada (Lowery, 2006).

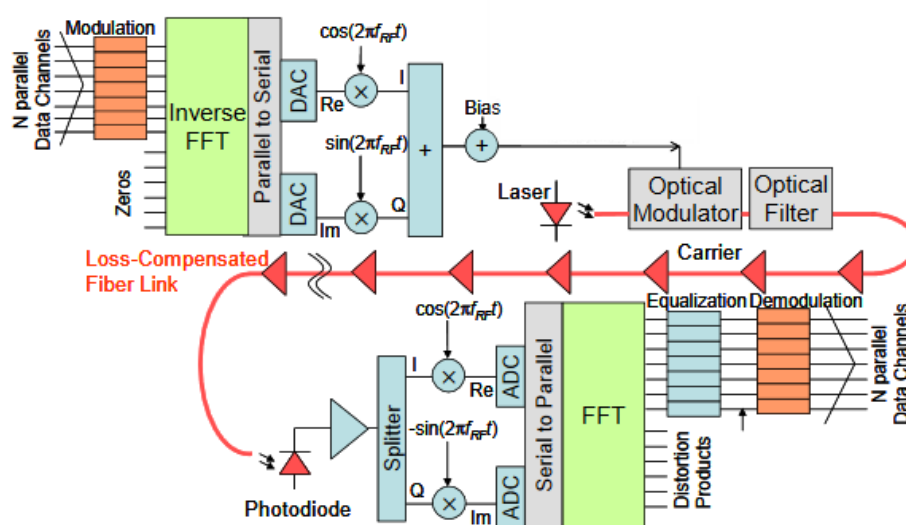


Figura 4. Esquema OFDM para Comunicaciones Ópticas

Después de la fibra el fotodiodo se encarga de producir una onda eléctrica que es convertida en componentes en fase y cuadratura mezclándolas con fases de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  de un oscilador local. Después se aplica la FFT para convertirlas a subportadoras (Lowery, 2006). Adicionalmente se encontró otro esquema que en la actualidad se encuentra ya implementado dentro de un software de simulación llamado VPIphotonics. Este programa es muy utilizado dentro del campo óptico, especialmente para aplicaciones de la modulación OFDM. El uso de OFDM para la compensación de la dispersión en sistemas Long-Haul resulta una buena solución para mejorar la transferencia de datos mediante fibra (Lowery, 2006) y podría ser una mejora futura dentro de este proyecto. Cabe recalcar que la solución en VPI se basa también en el esquema de la Figura 4.



## OFDM for Dispersion Compensation in Long-Haul Systems

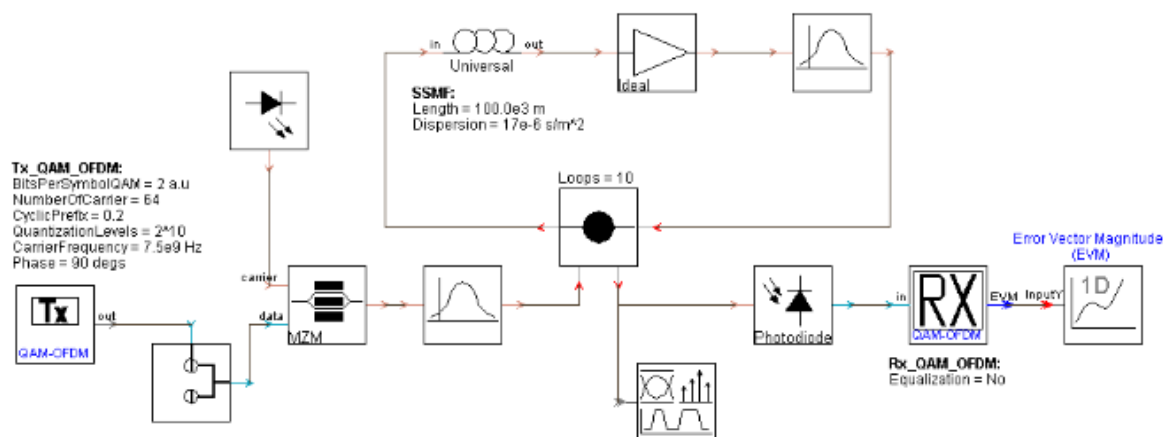


Figura 5. Esquema OFDM VPIphotonics (Optical OFDM to Combat Chromatic Dispersion in Long-Haul Systems, s.f.)

## Implementación del modulador en Matlab

Como ya se mencionó anteriormente se utilizó Matlab para programar el codificador y decodificador OFDM. En los siguientes apartados se muestra el código y la explicación de cada una de sus partes.

### Codificador OFDM.

Se inicia programando una función generarb que nos permitirá generar tantos bits aleatorios como se desee. Después se establece las principales variables dentro del funcionamiento del modulador que son  $N_c$ , el número de portadoras,  $c$ , el porcentaje del prefijo cíclico,  $\text{bitS}$ , es número de bits por símbolo y  $N$  que es el número potencia de 2 mayor y más cercano a  $N_c$ . Este valor es usado para determinar la magnitud de la matriz de entrada para la IFFT es por eso que se debe utilizar una potencia de 2. La diferencia entre  $N$  y  $N_c$  será llenada por el Zero-Padding.

```

%%
x=generarb(600)%Generamos datos binarios en la entrada
N=16 %Número total de portadoras incluido el zero padding por eso es
%potencia de dos para coincidir con la entrada a la IFFT y FFT

Nc=12 %Número de portadoras simple
c=0.25 %Prefijo en tanto por uno
bitS=3 % Bits por Símbolo

%No todos los bits de entrada podrán ser enviados porque e número de bits
%de información depende de la extensión del prefijo ciclicó y de los bits

OfdmNS=floor(length(x)/(bitS*ceil(N*(1+c)))) %Definimos los símbolos OFMD
% a utilizarse

InfNS=OfdmNS*Nc % Es el número de puntos que entran al modulador QAM
InfNb=InfNS*bitS % Se obtiene el núemro de bits a transmitirse

```

Figura 6. Código Codificador (Parte 1)

En la siguiente parte se definen unas constantes que serán necesarias a lo largo de la programación para tener las dimensiones de las matrices correctas. OfdmNS es el número de símbolos OFDM. Este valor permite determinar el número de símbolos de información. Se multiplica el resultado de InfNS por bitS para obtener el número total de bits que recibirá el sistema. Después se forma una matriz InfNS x bitS para posteriormente convertir cada fila a decimal y que esta sea la entrada para la modulación QAM. Es importante que tanto N como Nc sean pares para poder usar de manera adecuada el Zero-Padding.

```

x=x(1:InfNb) %Se restringe los valores de x

QAM=qammod(bit2de(reshape(x,bitS,InfNS)'),2^bitS)% Obtenemos la QAM de la
%matriz InfNS x 1 que se encuentra en decimal
figure;
plot(QAM,'r*')
grid on
title('Codificador')

InfOFDM=reshape(QAM,Nc,OfdmNS) % Se empieza a acoplar la entrada a la IFFT
% haciendo que la matriz QAM pase a una matriz Nc x OfdmNS

if(mod(N,2)== mod(Nc,2)) % esta condición ebe cumplirse para tener simetría
% y añadir el ZP sin problema
ZPOFDM=[zeros((N-Nc)/2,OfdmNS);InfOFDM;zeros((N-Nc)/2,OfdmNS)]
% Se añade el ZP al extremo de los datos
else
disp('Nc y N deben ser números pares')
end
IFFT=ifft(ZPOFDM,N) % Se tiene la matriz N x OfdmNS y se puede hacer la
%IFFT porque se sabe ya que N es potencia de dos

```

Figura 7. Código Codificador (Parte 2)

Después se añade los ceros a los extremos de la matriz de datos es por esto que es necesario que  $N$  y  $N_c$  sean pares, ya que así se mantendrá simetría. Una vez que ya se tiene la matriz adecuada se procede a aplicar la IFFT.

```
P=[IFFT(1+N-ceil(N*c):N,:);IFFT] % Se añade el prefijo al inicio,
% de acuerdo a c, los datos extraídos son los últimos símbolos
y=[(P(:).')] % Se cambia la configuración a serie
```

Figura 8. Código Codificador (Parte 3)

Finalmente se añade el prefijo cíclico y se transmite los datos en serial.

### Canal.

Para la simulación del canal únicamente se agrega un poco de ruido como se indica en la siguiente figura.

```
%% Simulamos ruido gaussiano
[m,n]=size(y)
R=randn(m,n)/40
y=y+R
```

Figura 9. Código del Canal OFDM

### Decodificador OFDM.

Dentro del Decodificador lo primero que se debe hacer es volver los datos a paralelo para poder retirar el prefijo que fue añadido. Esto se realiza aquí para poder volver a tener una matriz  $N \times N_c$  que será la entrada para la FFT.

```
%% Decodificador OFDM
OfdmNS=floor(length(y)/(ceil(N*(1+c)))) % Ya no se multiplica en el denominador
% por bits porque en cada valor de y está encapsulado bits, es valor es el
% mismo
InfNS=Nc*OfdmNS
InfNb=InfNS*bits

y=reshape(y,ceil(N*(1+c)),OfdmNS) % Cambiamos la configuración del vector
% a una matriz (N*(1+c) x OfdmNS) para regresar los pasos y entrar a la FFT
P=y((ceil(N*c)+1):size(y,1),:) % Queremos que la entrada sea N porque se
% quiere una potencia de dos y restamos el CP
FFT=fft(P,N) % Se puede hacer la FFT
```

Figura 10. Código Decodificador (Parte 1)

Después de realizar la FFT con ayuda del comando e Matlab, se extraen los ceros para obtener una matriz  $N_c \times N_{\text{ofdm}}$  que luego será pasada a serial para realizar la demodulación QAM. Los datos obtenidos serán pasados a binario para poder ser transmitidos en la salida.

```

QAM=FFT((N-Nc)/2+1:size(FFT,1)-(N-Nc)/2,:)' % Se extrae el ZP de acuerdo
% a la longitud correspondiente sabiendo que es N-Nc y está a los extremos

QAMS=QAM(:) % Pasamos los datos a serial para poder hacer la demodulación
figure;
plot(QAMS,'b*')
grid on
title('Decodificador')
bits=de2bi(qamdemod(QAMS,2^bitS))' % Se puede demodular de acuerdo a bitS
z=bits(:)' % Se pasa los datos a serial para la salida

```

Figura 11. Código Decodificador (Parte 2)

Para poder verificar la correcta recepción de los datos se puede programar un condicional dentro del decodificador para que nos muestre un mensaje si hubiera o no errores.

```

% Comparamos los resultados
x=x'
if x(1:InfNb)==z(1:InfNb)
    disp('Sin Errores')
else
    disp('Errores')
end

```

Figura 12. Código Decodificador (Parte 3)

## Resultados.

Se asignó valores de  $N_c=12$ ,  $N=16$ ,  $c=0.1$  y  $\text{bitS}=2$  para las variables del código programación y se generó un paquete de 10000 bits. Se obtuvo los diagramas de constelación tanto del codificador como del decodificador. Por el uso de 2 bits por símbolo se forma una constelación 4QAM, que dentro del codificador es una constelación que al parecer está formada por 4 puntos sobre los que están todos los símbolos.

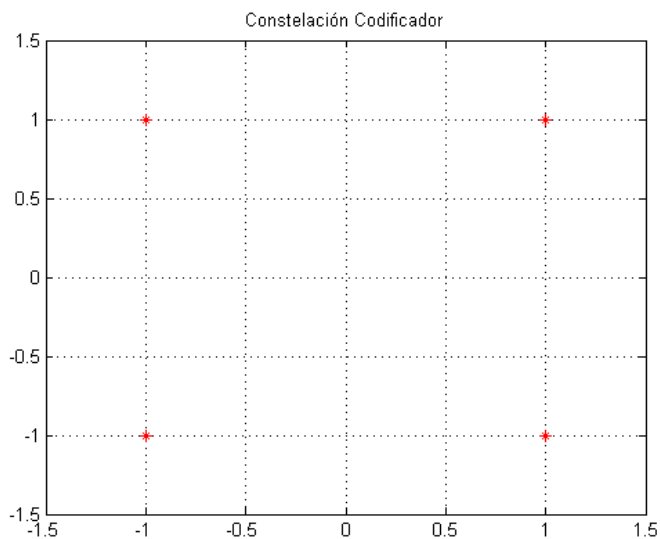


Figura 13. Constelación 4QAM en el Codificador

Después del paso por el canal que fue simulado con ruido se observa variaciones en la ubicación de los símbolos dentro de la constelación. A pesar de esta diferencia la transmisión es exitosa porque la trama de información enviada llega sin ningún error. El nivel de ruido usado en la simulación es de  $\frac{1}{40}$ , existe un límite de ruido de  $\frac{1}{14}$  a partir del cual la llegada de datos empieza a fallar en un 15% aproximadamente.

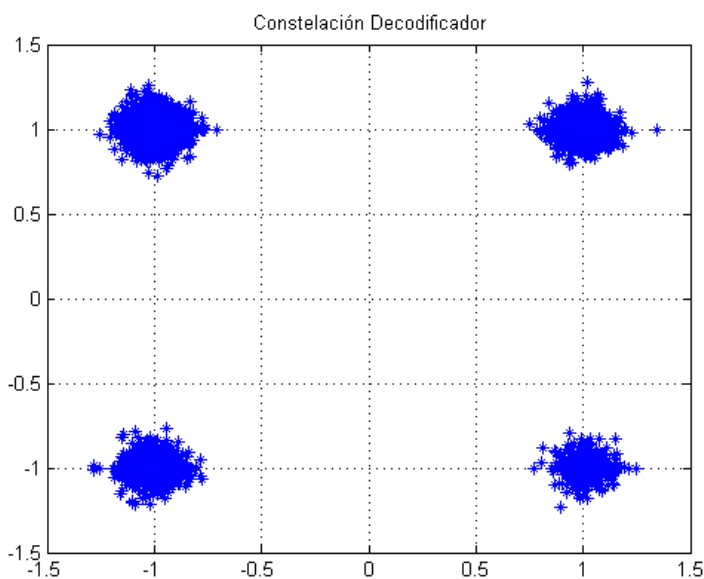
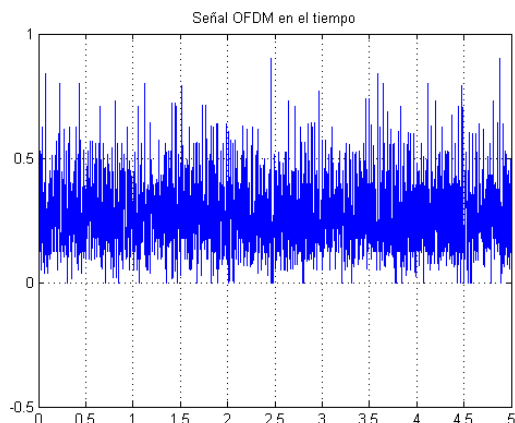


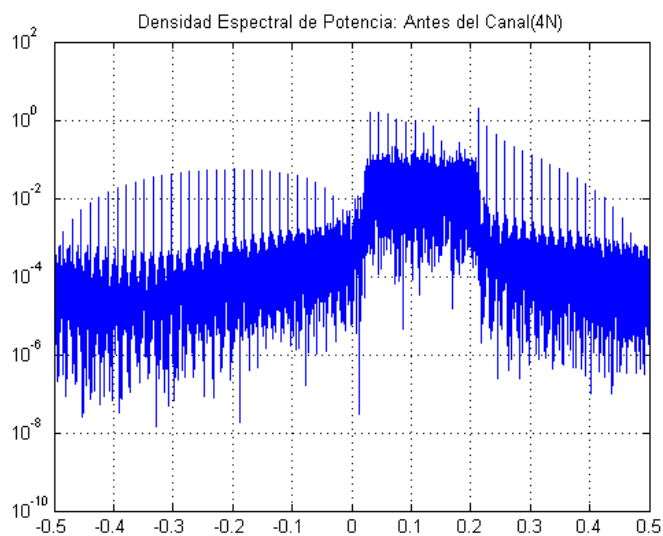
Figura 14. Constelación 4QAM en el Decodificador

Se obtuvo la gráfica de la señal eléctrica en la que se ve como si existiera mucha distorsión como si fuera ruido, pero esto se debe a que la señal es larga.



*Figura 15. Señal en el tiempo*

Se realizó un análisis en frecuencia antes y después del canal para un número de subportadoras alto. La gráfica de la densidad espectral de potencia antes de canal muestra claramente que la varianza de la señal es relativamente baja y se puede identificar el ancho de banda de la señal (zona de portadoras) ya que a sus extremos se aprecia una fuerte caída. Se observa que las bandas laterales van cayendo muy lentamente con la frecuencia.



*Figura 16. Densidad Espectral de Potencia antes del Canal*

Después del canal se observó un gráfico de densidad espectral similar pero con una varianza un poco mayor. Igualmente la zona de portadoras es visible.

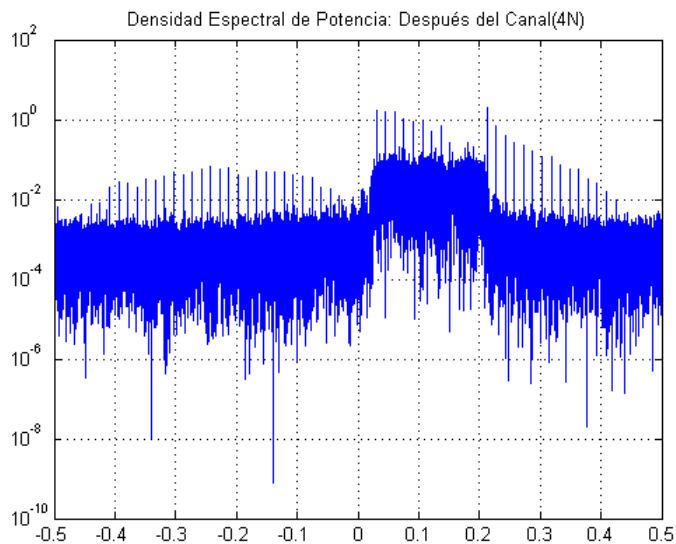


Figura 17. Densidad Espectral de Potencia después del Canal

Se hizo una prueba sin el uso del prefijo cíclico y los resultados para la densidad espectral de potencia antes y después del canal se muestran en las siguientes figuras.

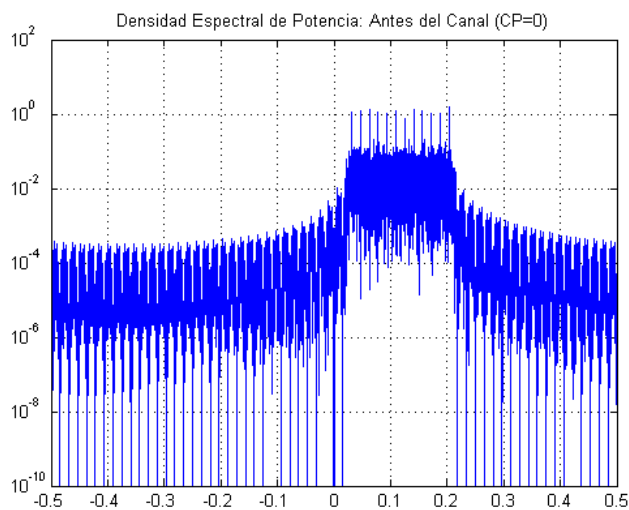


Figura 18. Densidad Espectral de Potencia antes del Canal (Sin Prefijo Cíclico)

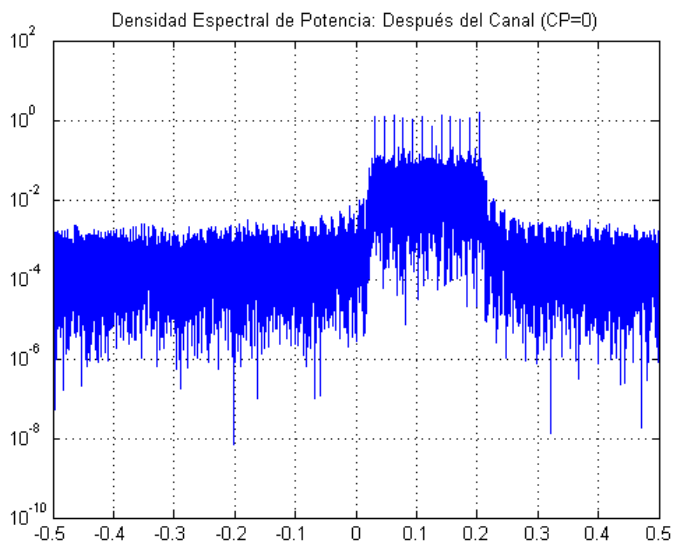


Figura 19. Densidad Espectral de Potencia después del Canal (Sin Prefijo Cíclico)

Se puede ver que al retirar el prefijo cíclico se aumenta la varianza en el gráfico de la densidad espectral de potencia tanto para la observación antes del canal como para la observación después del canal. Se obtuvo también el diagrama de ojo en el receptor y se obtuvo en siguiente resultado. Se debe realizar esta observación después de aplicar la FFT y de retirar el Zero Padding, la matriz que se usa para hacer la demodulación QAM es la que se debe emplear.

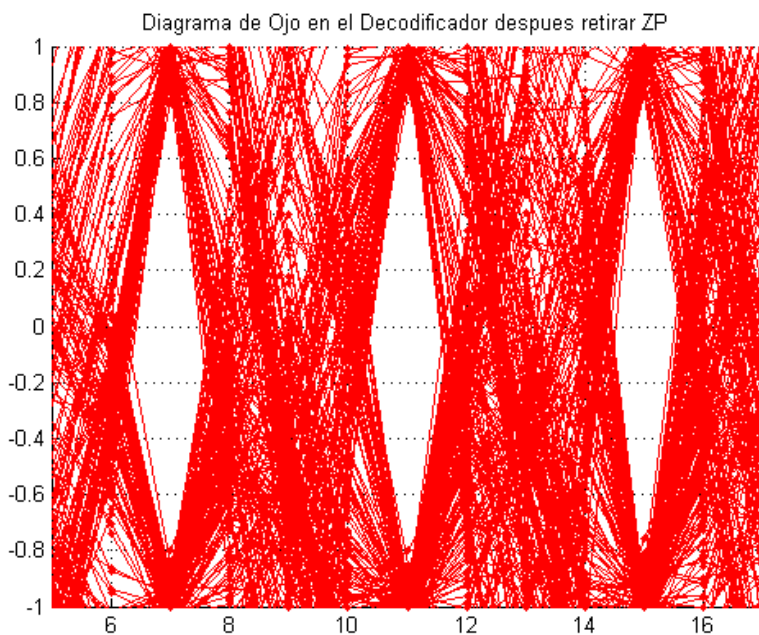


Figura 20. Diagrama de Ojo en el Receptor



Además, se hizo la prueba con modulaciones 16QAM y 32QAM. Para estos casos se pudo observar también que las constelaciones eran adecuadas y que la transmisión de los datos fue correcta. Para estas pruebas se utilizó el ruido de  $\frac{1}{40}$  y el ruido límite.

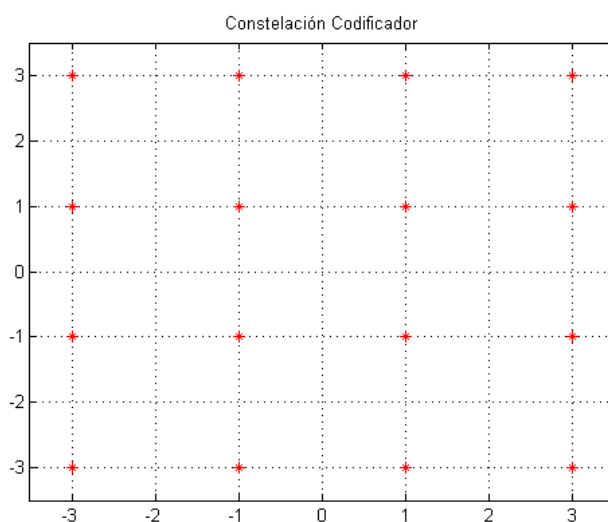


Figura 21. Constelación 16QAM en el Receptor

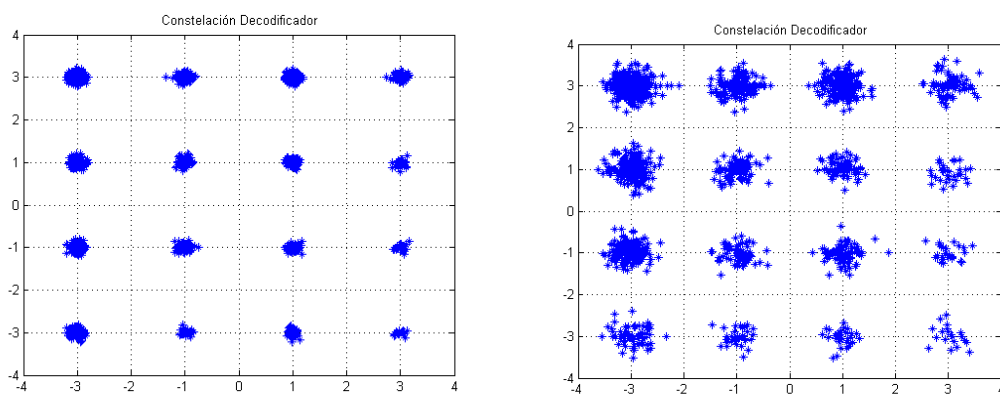


Figura 22. Constelación 16QAM en el Receptor (Ruido 1/40 y 1/14)

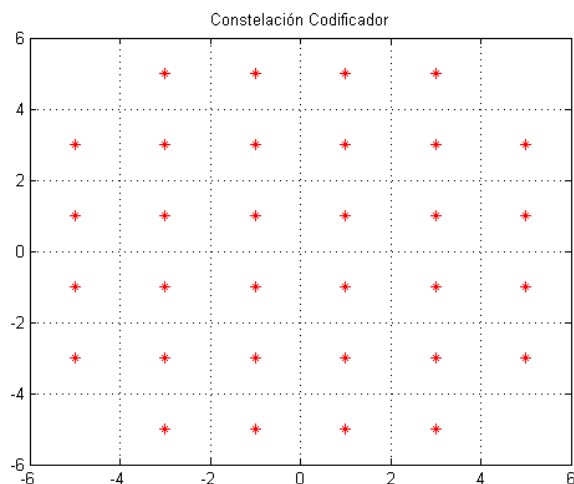


Figura 23. Constelación 32QAM en el Transmisor

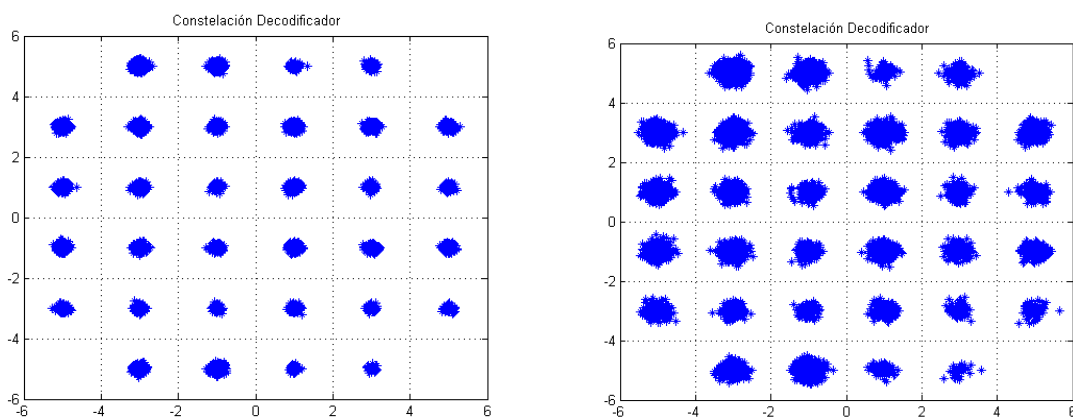


Figura 24. Constelación 32QAM con ruido de 1/40 y 1/18

## Simulación del sistema óptico OFDM utilizando OPTSIM

### OPTSIM: Definición, Beneficios y Aplicaciones.

OptSim es una herramienta dentro de los softwares de RSoft, se emplea para diseñar y simular sistemas de comunicaciones ópticas a nivel de propagación de la señal (Synopsis, 2014). Por sus técnicas de simulación, interfaz gráfica fácil de usar y sus instrumentos de medición similares a los de laboratorio, este software se destaca por su precisión y facilidad de

uso. Su aparición en el mercado fue en 1998 y es usado en la actualidad por los principales ingenieros y organizaciones alrededor del mundo (OptSim Product Overview, s.f.).

El trabajo en Optsim presenta beneficios como la posibilidad de crear prototipos virtuales que ayuden a mejorar la eficiencia de un sistema. También permite optimizar los diseños con el fin de mejorar el rendimiento y abaratar costos. Por último se puede decir que este software nos da la posibilidad de diseñar funciones en programas como Matlab o Luna Optical Vector Analyzer y que su funcionamiento pueda ser implementado después dentro del software (OptSim Product Overview, s.f.).

La aplicación de este programa abarca un amplio campo dentro del diseño de sistemas ópticos como sistemas coherentes de comunicaciones PM-QAM, PM-QPSK, OFDM y PM-BPSK. También es posible simular diferentes tipos de modulaciones como M-QAM, M-PAM, BPSK y otras. Otra aplicación interesante es la simulación de transmisión de solitones (OptSim Product Overview, s.f.).

### **Esquema del sistema de simulación.**

En primera instancia, nuestro interés era programar el funcionamiento de la modulación en Matlab y luego implementarla como bloques dentro de OptSim, donde simular el comportamiento de la fibra con un bloque propio de este programa, pero después del diseño del codificador y decodificador en Matlab se encontró que dentro de OptSim ya estaba implementado un modelo para realizar la IFFT y FFT OFDM por lo que se decidió utilizar estos bloques para armar el sistema dentro del simulador. El sistema que se utilizó para la simulación se muestra en la Figura 7. Se puede observar cada uno de los bloques necesarios para completar el correcto funcionamiento de la simulación OFDM (Rindhe, 2015).

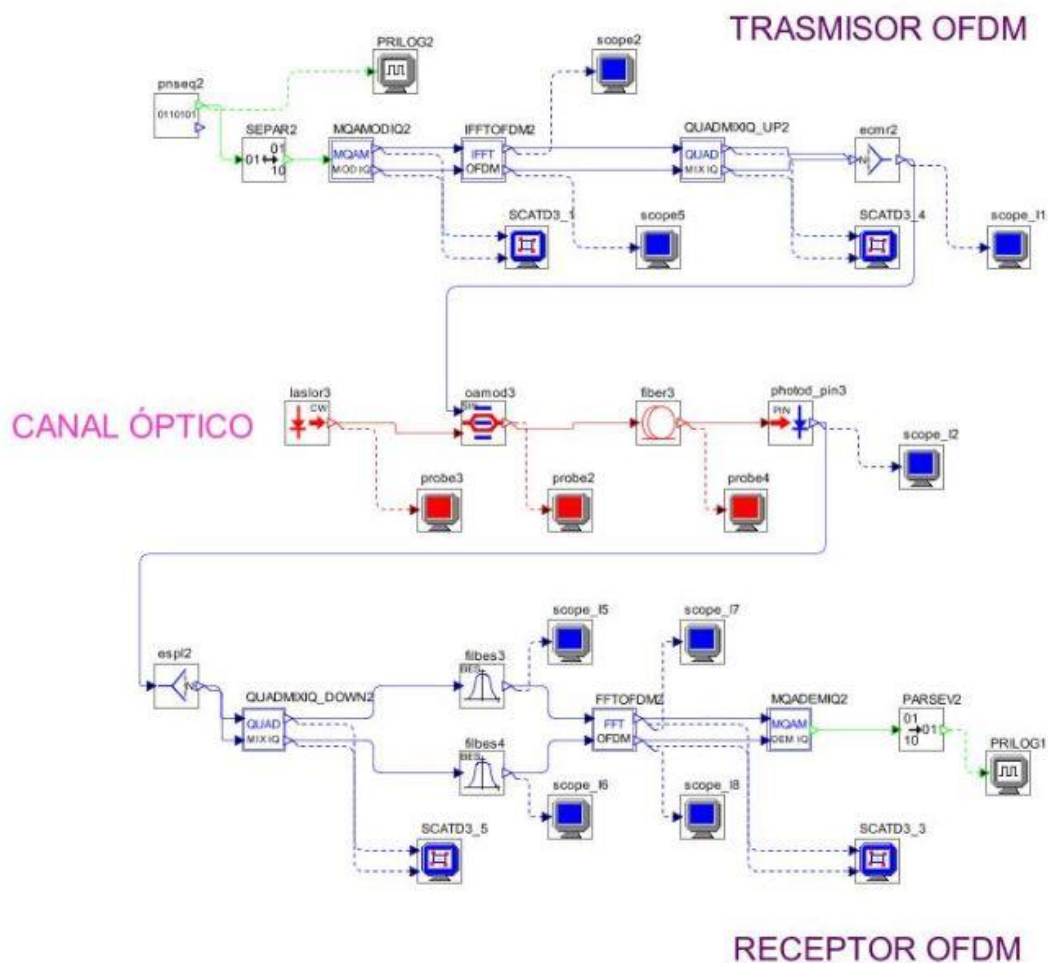
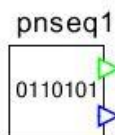


Figura 25. Esquema de Simulación Completo

### Transmisor OFDM: Descripción detallada de los bloques.

A continuación se da una breve explicación de cada uno de los bloques usados para la simulación de transmisor y además los valores que fueron usados para la simulación



**Data Source.** Este bloque sirve para generar una señal lógica pseudo aleatoria o determinista. El Baud rate, longitud de las secuencias y el nivel lógico de la señal pueden ser modificados según convenga. Dentro de la ventana de propiedades de este bloque se puede modificar parámetros como la Tasa de Bits (Synopsys,

2015). La salida es la secuencia de bits de acuerdo a las características que se hayan elegido.

En la Tabla 1 se puede ver los parámetros que han sido utilizados para la simulación del bloque.

Parámetro	Valor	Unidades
Bit Rate	10	Gbits/s
Corresponding Simulates Bit-Rate	10	Gbits/s
Baud Rate	10	GBaud/s
Samples per bit	64	
Sequence	Random	

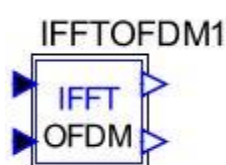
Tabla 1. Parámetros de Simulación para Data Source

**SEPAR1** *Serie-Paralelo.* En este módulo se realiza un cambio de serie a paralelo de la secuencia de datos en la entrada en donde el bit más reciente es colocado al final. En nivel de la secuencia de datos en la salida debe ser mayor al nivel de entrada (Synopsys, 2015).

**MQAMODIQ1** *Modulador M-QAM en Fase y Cuadratura.* Genera componentes en fase y cuadratura a partir de la señal de entrada que es modulada en un formato M-QAM. Para la simulación se considerará una modulación 16QAM (Synopsys, 2015). Parámetros como el Baud Rate se sincronizan automáticamente a partir de los bloques conectados a este módulo. A continuación, en la Tabla 2 se muestran los valores de los parámetros principales que fueron usados para la simulación.

Parámetro	Valor	Unidades
Baud Rate	2.5	Gbaud/s
Amplitud Criterion	Rms amplitud	
Amplitud	0.2	AU
Delay	0	ps

Tabla 2. Parámetros de Simulación para el Modulador M-QAMIQ



**IFFT OFDM1** *Transformada Rápida de Fourier OFDM.* Este bloque es el núcleo de un transmisor OFDM. Calcula la FFT de la señal QAM de entrada tanto en fase como en cuadratura. Se puede elegir un número de subportadoras y un valor en tanto por uno para la extensión cíclica. De esta manera se tiene dos entradas y dos salidas. En la Tabla 3 se muestran los parámetros de simulación correspondientes.

Parámetro	Valor	Unidades
Baud Rate	2.5	Gbaud/s
Número de Subportadoras	8	
Pefijo Cíclico	0.25	Fraction Baud Rate
Delay	0	Ps
Transmit training sequence	Yes	
Training sequence amplitud	0.2	AU

Tabla 3. Parámetros de Simulación del módulo IFFT OFDM



**QUADMIXIQ\_UP1** *Quadrature Mix en Fase y en Cuadratura.* Este modelo multiplica la entrada en fase por un oscilador y la entrada en cuadratura por un oscilador que se encuentra desfasado  $90^\circ$  para

poder tener en salida señales en fase y cuadratura. Se puede usar posteriormente un combinador. En la siguiente figura se muestra en funcionamiento interno de este modelo. También en la Tabla 4 se muestran los parámetros de simulación.

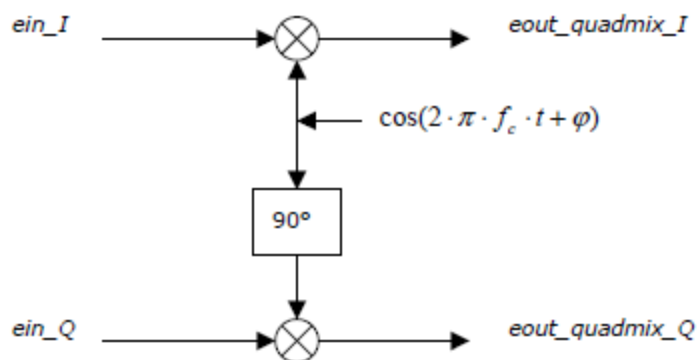
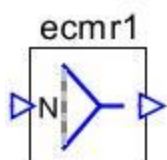


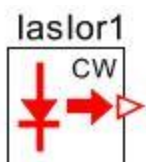
Figura 26. Funcionamiento QUADMIXIQ

Parámetro	Valor	Unidad
Frecuencia	10	GHz
Fase	0	Grados

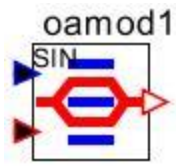
Tabla 4. Parámetros de Simulación QUADMIXIQ (Synopsys, 2015)



**Combinador Eléctrico.** Este elemento simula un combinador eléctrico ideal. En la entrada se puede colocar cualquier número de señales eléctricas y en la salida se obtendrá una sola señal eléctrica. El parámetro de atenuación en cada salida de este bloque tiene por default un valor de 0 dB y se conserva este valor para la simulación.



**Láser Lorentziano.** Este modelo simula un láser de onda continua. Se toma en cuenta la fase del ruido del láser mediante los parámetros y se puede elegir entre dos tipos de anchos de banda de la base del ruido: realístico o ideal. Este bloque no tiene entrada sino sola una salida que es el campo óptico generado. Se utiliza un valor de 0 dBm para la potencia CW,



**oamod1** *Modulador de Amplitud  $\sin^2$* . Este elemento permite simular un modulador en amplitud Mach-Zehnder de tipo seno al cuadrado. Dentro de este modelo está agregado un filtro para la entrada eléctrica. En la siguiente ecuación se muestra la función de transferencia de este filtro y después está la expresión del campo de la salida óptica en función del voltaje de entrada  $V_{in}$ , las pérdidas en exceso  $EL_{dB}$  introducidas por el modulador, la tasa de extinción  $ER_{LIN}$  y el facto de chirp  $\alpha$ .

$$H(f) = \frac{\sin\left(\frac{\pi f}{B_0}\right)}{\frac{\pi f}{B_0}}$$

Donde  $B_0 \cong 2.25 B_w$

$$\vec{E}_{out} = 10^{\frac{EL_{dB}}{20}} \left\{ \cos \phi_D - j \frac{1}{ER_{LIN}} \sin \phi_D \right\} \cdot e^{j\vartheta} \vec{E}_m$$

$$\phi_D = \frac{\pi}{2} \left( \frac{V_{in} - V_{on}}{V_\pi} \right)$$

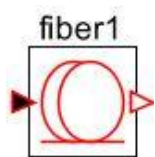
$$\vartheta = \frac{1}{2} \alpha \ln P_{out}$$

$$\alpha = 2 P_{out} \frac{\frac{d\vartheta}{dt}}{\frac{dP_{out}}{dt}}$$

$$P_{out} = \left| \vec{E}_{out} \right|^2$$



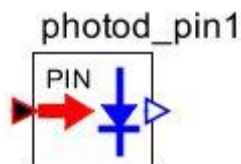
### Canal Óptico: Descripción detallada de los bloques.



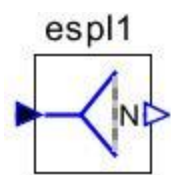
**Fibra.** La fibra dentro de OptSim es una de los componentes más complejos y fundamentales de las librerías. Se usa TDSS, Time Domain Split-Step, para permitir que la ecuación no lineal de Schrödinger sea el centro de la propagación del campo óptico. Se toma en cuenta variaciones estocásticas de todas las características de la fibra y polarización. La longitud de la fibra utilizada es de 3km porque se encontró un trabajo similar que utiliza este valor (Rindhe, 2015).

### Receptor OFDM: Descripción detallada de los bloques.

A continuación se explica un poco de cada uno de los bloques usados y además el valor de los principales valores de simulación que fueron utilizados.

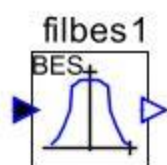


**Fotodiodo PIN.** Este fotodiodo tipo PIN tiene una salida eléctrica que se genera por un proceso de fotodetección. Este proceso depende de la potencia de la entrada óptica y de la corriente oscura, la corriente en la salida del fotodiodo se expresa como:  $I_{Tot} = RP_s + I_d + I_n$ , donde  $R = \eta q/h\nu$  en unidades de [A/W]. La eficiencia cuántica es  $\eta$ ,  $I_n$  es la corriente de disparo e  $I_d$  es la corriente negra.



**Splitter Eléctrico.** Este componente lo usamos simplemente para separar nuevamente la señal eléctrica transmitida en fase y cuadratura por la

diferencia de fase que existe entre ellas. La atenuación en la salida se queda con el valor default de cero.

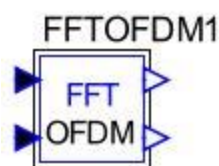


**Filtro Bessel.** Se utiliza este módulo para filtrar la señal, se elige que funcione como un pasa bajos. Se implementa numéricamente este filtro usando un algoritmo de respuesta de impulso infinito junto a un método de transformación

bilineal. Los valores de los principales parámetros dentro de este bloque se pueden observar en la siguiente tabla.

Parámetro	Valor	Unidad
Tipo	Pasa Bajo	
Frecuencia Central	30	GHz
Número de Polos	7	
Ancho de Banda -3dB	10	GHz

Tabla 5. Valor de Parámetros Filtro Bessel



**FFT OFDM.** Este bloque es el núcleo del receptor OFDM. Al igual que el bloque IFFT calcula la FFT de los datos que entran en paralelo, tanto en fase como en cuadratura. Los parámetros en este módulo son los mismos

que se usaron en el bloque de IFFT y se sincronizan automáticamente para evitar errores.

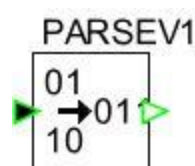


**Demodulador M-QAM.** Las entradas de este módulo son componentes en fase y cuadratura y en la salida se obtiene una señal lógica. La dimensión

de la salida determina los niveles de la modulación. Los valores de los parámetros utilizados en este bloque se muestran en la siguiente tabla.

Parámetro	Valor	Unidades
Baud Rate	2.5	Gbaud/s
Criterio de Amplitud	Amplitud rms	
Amplitud	1	AU
Retraso	0	ps

Tabla 6. Valor Parámetros Demodulador M-QAM



**Conversión Paralelo-Serie.** En este bloque únicamente se cambia la distribución de los datos reordenándolos para obtener en la salida los datos lógicos en serie.

### Resultados de la Simulación.

En la siguiente figura se observa la señal binaria generada al inicio del sistema que pasará por el transmisor y la fibra para después ser captada por el receptor y recuperada para ser comparada.

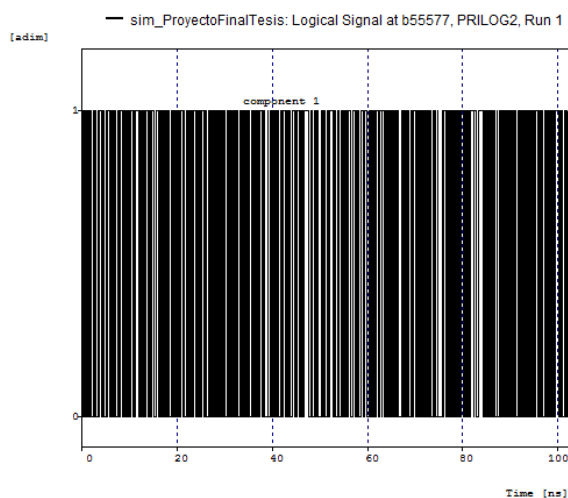


Figura 27. Datos Generados

En la siguiente figura se observa la constelación formada en el modulador QAM del transmisor, se puede ver que se trata de una modulación 16QAM como se deseaba.

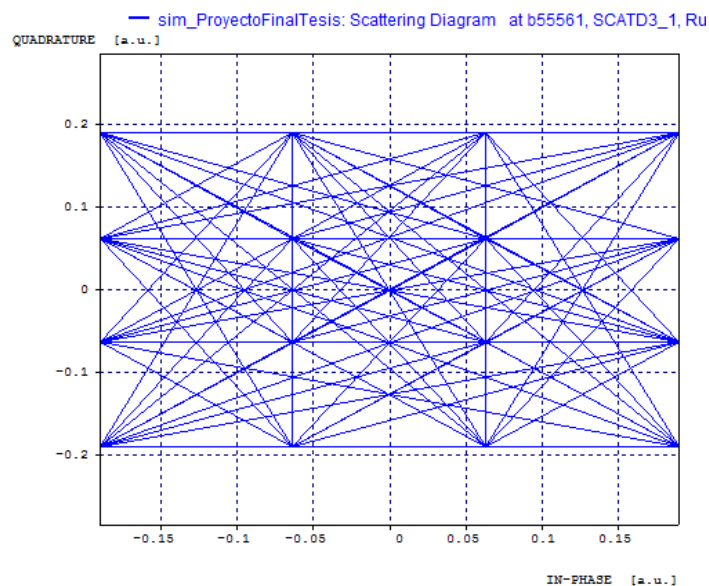


Figura 28. Diagrama de Constelación Transmisor (OptSim)

Se puede ver que el espectro de la señal óptica antes de entrar a la fibra tiene algunas fallas y pérdidas.

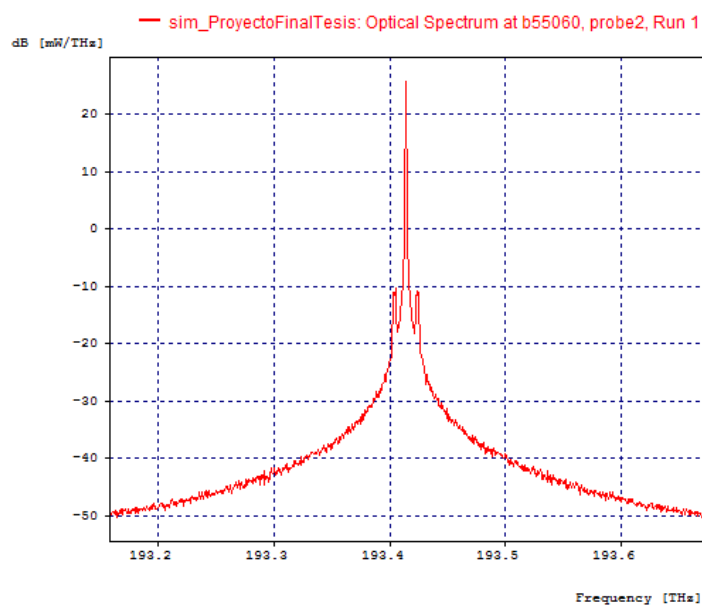


Figura 29. Espectro Señal Óptica antes de la fibra (OptSim)

El estado del espectro de la señal se conserva después de haber pasado por la fibra.

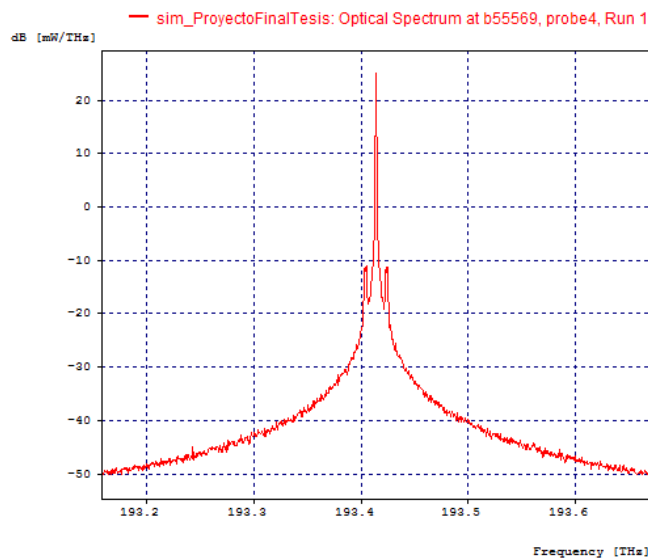


Figura 30. Espectro Señal Óptica después de la fibra (OptSim)

Por último se puede ver que el diagrama de constelación en el receptor es claramente el correspondiente a una modulación 16QAM y el error parece ser mínimo, por lo que a través de esto se puede comprobación la correcta recepción de los datos.

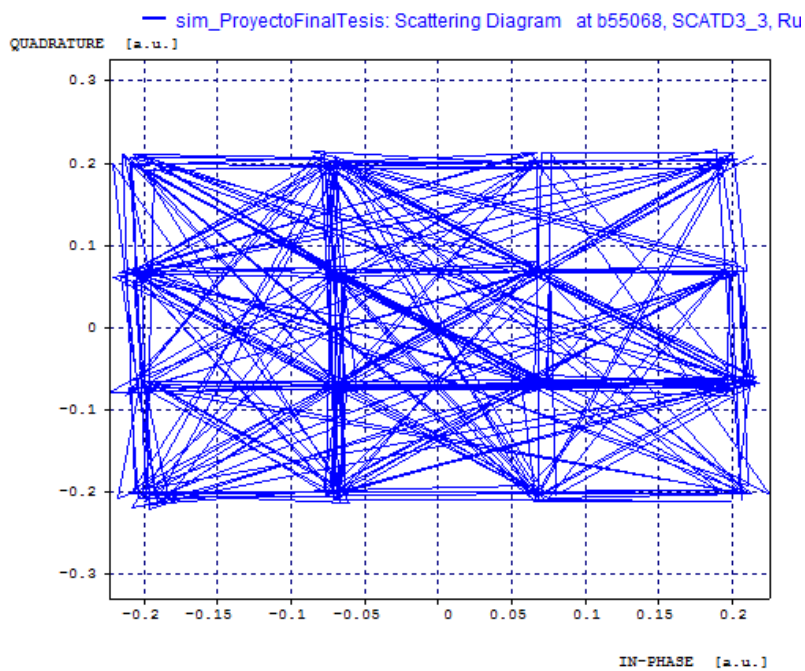


Figura 31. Diagrama de Constelación Receptor (OptSim)

## CONCLUSIONES

Al finalizar este proyecto se logró comprender correctamente el funcionamiento de la modulación OFDM y adentrarnos en esta técnica. Se realizó el código de programación en Matlab con el que se puede ir observando paso a paso lo que ocurre en cada uno de los bloques de la modulación. Se logró generalizar el uso del modulador en Matlab para cualquier número de subportadoras y bits por símbolo. Una de las dificultades del código es que no todos los bits generados serán transmitidos ya que se debe tomar en cuenta los bits que serán ocupados por el prefijo y por el zero-padding pero esto resulta ser algo natural propio de la modulación. Se observó diferentes tipos de constelaciones en las que se puede ver el efecto del nivel de ruido utilizado en el canal. Existe un ruido límite a partir del que comienzan a aparecer errores de transmisión. Vimos que el análisis frecuencial a través del gráfico de densidad de potencia es el esperado y que además tiene un efecto originado en el prefijo cíclico que hace que la varianza sea menor.

Se logró un buen manejo de OptSim y además se cumplió el objetivo de simular un sistema con modulación OFDM a pesar de que no fue necesario implementar en este simulador un bloque de Matlab. Se trabajó con una modulación 16QAM que se pudo recuperar después de haber pasado por la fibra óptica. Los datos lógicos recuperados tuvieron errores aceptables que podrían ser mejorados. El uso de la modulación OFDM ha sido un éxito dentro de sistemas Wireless y cada vez se puede ir mejorando su aplicación dentro de los sistemas ópticos para poder proporcionar una transferencia de datos mejorada y más potente. A pesar de que se logró la simulación del sistema se podría buscar una manera de mejorarlo aumentando la distancia de la fibra ya para la transmisiones de este tipo este valor resulta ser muy pequeño e insuficiente. Se recomienda el uso del esquema OFDM óptica para combatir dispersión cromática en sistemas Long-Haul, mostrada en la figura 5 y propuesta dentro de los ejemplos de VIP Photonics.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armstrong, J. (1 de Febrero de 2009). OFDM for Optical Communications. *Journal of Lighthwave Technology*, XXVII(3), 189-204.
- Lowery, A. A. (20 de Marzo de 2006). Orthogonal-frequency-division multiplexing for dispersion compensation of long-haul optical systems. *Optics Express*, 14(6).
- Nieto, R. (2010). *Sistemas de Transmisión por Fibra Óptica basados en Orthogonal Frequency-Divisio Multiplexing*. Trabajo de Final de Carrera, Universidad Politécnica de Catalunya.
- Poveda, G. C. (2015). *Estudio y Simulación de la Propagación de Solitones en una Fibra Óptica Monomodo*. Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Rindhe, B. D. (Octubre de 2015). Implementation of Optical OFDM Based System for Optical Networks. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 4(5), 767-781.
- Skellern, W. (Octubre de 1998). VLSI for OFDM. *IEEE Communications Magazine*, 127-131.
- Synopsys. (2014). *OptSim User Guide*. Nueva York.
- Synopsys, I. (2015). *OptSim Models Reference* (Vol. I). Nueva York.
- Synposy: Silicon to Softwre*. (s.f.). Obtenido de Optical Solutions: OptSim™ is RSoft's award-winning software tool for the design and simulation of optical communication systems at the signal propagation level. With state-of-the-art simulation techniques, an easy-to-use graphical user interface and lab-like measurement in
- Vergara, J. (2008). *Simulación de un Esquema de Modulación/Demodulación OFDM Utilizando un Modelo de Canal Multitrayectoria*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.
- Villa, P. (5 de Septiembre de 2013). *Albentia Systems*. Obtenido de <https://albentia.wordpress.com/2013/09/05/modulacion-ofdm-wimax-madrid/>
- VPIphotonics*. (s.f.). Obtenido de [http://www.vpi Photonics.com/Applications/TransmissionSystems/ModFormat\\_OFDM.php](http://www.vpi Photonics.com/Applications/TransmissionSystems/ModFormat_OFDM.php)

## ANEXO A: RESULTADOS NUMERICOS DE MATLAB

Nc=8  
 N=16  
 bitS=2  
 c=0.1

### CODIFICADOR

Se calcula la QAM

QAM =

```

1.0000 + 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i
1.0000 + 1.0000i
1.0000 + 1.0000i
1.0000 - 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i
1.0000 - 1.0000i
1.0000 + 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i
1.0000 - 1.0000i
1.0000 + 1.0000i
1.0000 + 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i
1.0000 - 1.0000i

```

InfOFDM =

```

1.0000 + 1.0000i   1.0000 - 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i   1.0000 + 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i  -1.0000 + 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i   1.0000 - 1.0000i
1.0000 + 1.0000i   1.0000 + 1.0000i
1.0000 + 1.0000i   1.0000 + 1.0000i
1.0000 - 1.0000i  -1.0000 - 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i   1.0000 - 1.0000i

```

Se añade el Zero Padding



ZPOFDM =

0	0
0	0
0	0
0	0
1.0000 + 1.0000i	1.0000 - 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i	1.0000 + 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i	-1.0000 + 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i	1.0000 - 1.0000i
1.0000 + 1.0000i	1.0000 + 1.0000i
1.0000 + 1.0000i	1.0000 + 1.0000i
1.0000 - 1.0000i	-1.0000 - 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i	1.0000 - 1.0000i
0	0
0	0
0	0
0	0

Se calcula la IFFT de los datos

IFFT =

0 + 0.1250i	0.2500
-0.2332 - 0.1362i	-0.2310
0.2134 + 0.2134i	0.1250 + 0.1250i
-0.0406 - 0.3289i	-0.0708 - 0.1250i
-0.1250 + 0.2500i	0
0.2422 - 0.0271i	0.0957
-0.2134 - 0.0366i	-0.1250 + 0.1250i
-0.0271 - 0.0844i	0.1474 - 0.1250i
0.2500 + 0.1250i	-0.2500
-0.1936 - 0.0406i	0.2310
0.0366 + 0.0366i	0.1250 + 0.1250i
-0.1362 - 0.0979i	-0.5327 - 0.1250i
0.3750	0.5000
-0.3154 + 0.2039i	-0.0957
-0.0366 - 0.2134i	-0.1250 + 0.1250i
0.2039 + 0.0112i	-0.0439 - 0.1250i

Se añade el Prefijo Cíclico

```

P =
-0.0366 - 0.2134i -0.1250 + 0.1250i
 0.2039 + 0.0112i -0.0439 - 0.1250i
      0 + 0.1250i  0.2500
-0.2332 - 0.1362i -0.2310
 0.2134 + 0.2134i  0.1250 + 0.1250i
-0.0406 - 0.3289i -0.0708 - 0.1250i
-0.1250 + 0.2500i      0
 0.2422 - 0.0271i  0.0957
-0.2134 - 0.0366i -0.1250 + 0.1250i
-0.0271 - 0.0844i  0.1474 - 0.1250i
 0.2500 + 0.1250i -0.2500
-0.1936 - 0.0406i  0.2310
 0.0366 + 0.0366i  0.1250 + 0.1250i
-0.1362 - 0.0979i -0.5327 - 0.1250i
 0.3750           0.5000
-0.3154 + 0.2039i -0.0957
-0.0366 - 0.2134i -0.1250 + 0.1250i
 0.2039 + 0.0112i -0.0439 - 0.1250i

```

Se cambia la distribución de las columnas de datos a un solo vector

```

y =
Columns 1 through 4
-0.0366 - 0.2134i  0.2039 + 0.0112i      0 + 0.1250i  -0.2332 - 0.1362i
Columns 5 through 8
 0.2134 + 0.2134i -0.0406 - 0.3289i -0.1250 + 0.2500i  0.2422 - 0.0271i
Columns 9 through 12
-0.2134 - 0.0366i -0.0271 - 0.0844i  0.2500 + 0.1250i -0.1936 - 0.0406i
Columns 13 through 16
 0.0366 + 0.0366i -0.1362 - 0.0979i  0.3750           -0.3154 + 0.2039i
Columns 17 through 20
-0.0366 - 0.2134i  0.2039 + 0.0112i -0.1250 + 0.1250i -0.0439 - 0.1250i
Columns 21 through 24
 0.2500           -0.2310           0.1250 + 0.1250i -0.0708 - 0.1250i
Columns 25 through 28
      0           0.0957           -0.1250 + 0.1250i  0.1474 - 0.1250i
Columns 29 through 32
-0.2500           0.2310           0.1250 + 0.1250i -0.5327 - 0.1250i
Columns 33 through 36
 0.5000           -0.0957           -0.1250 + 0.1250i -0.0439 - 0.1250i

```

## DECODIFICADOR

Se arma nuevamente una matriz a partir del vector y

y =

-0.0366 - 0.2134i	-0.1250 + 0.1250i
0.2039 + 0.0112i	-0.0439 - 0.1250i
0 + 0.1250i	0.2500
-0.2332 - 0.1362i	-0.2310
0.2134 + 0.2134i	0.1250 + 0.1250i
-0.0406 - 0.3289i	-0.0708 - 0.1250i
-0.1250 + 0.2500i	0
0.2422 - 0.0271i	0.0957
-0.2134 - 0.0366i	-0.1250 + 0.1250i
-0.0271 - 0.0844i	0.1474 - 0.1250i
0.2500 + 0.1250i	-0.2500
-0.1936 - 0.0406i	0.2310
0.0366 + 0.0366i	0.1250 + 0.1250i
-0.1362 - 0.0979i	-0.5327 - 0.1250i
0.3750	0.5000
-0.3154 + 0.2039i	-0.0957
-0.0366 - 0.2134i	-0.1250 + 0.1250i
0.2039 + 0.0112i	-0.0439 - 0.1250i

Se retira el prefijo cíclico

P =

0 + 0.1250i	0.2500
-0.2332 - 0.1362i	-0.2310
0.2134 + 0.2134i	0.1250 + 0.1250i
-0.0406 - 0.3289i	-0.0708 - 0.1250i
-0.1250 + 0.2500i	0
0.2422 - 0.0271i	0.0957
-0.2134 - 0.0366i	-0.1250 + 0.1250i
-0.0271 - 0.0844i	0.1474 - 0.1250i
0.2500 + 0.1250i	-0.2500
-0.1936 - 0.0406i	0.2310
0.0366 + 0.0366i	0.1250 + 0.1250i
-0.1362 - 0.0979i	-0.5327 - 0.1250i
0.3750	0.5000
-0.3154 + 0.2039i	-0.0957
-0.0366 - 0.2134i	-0.1250 + 0.1250i
0.2039 + 0.0112i	-0.0439 - 0.1250i

FFT =

0 - 0.0000i	0
0.0000 + 0.0000i	0
0	0
-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
1.0000 + 1.0000i	1.0000 - 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i	1.0000 + 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i	-1.0000 + 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i	1.0000 - 1.0000i
1.0000 + 1.0000i	1.0000 + 1.0000i
1.0000 + 1.0000i	1.0000 + 1.0000i
1.0000 - 1.0000i	-1.0000 - 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i	1.0000 - 1.0000i
0.0000	0
0 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0	0
0 - 0.0000i	0

Se saca la FFT y se retira el Zero Padding

QAM =

1.0000 + 1.0000i	1.0000 - 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i	1.0000 + 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i	-1.0000 + 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i	1.0000 - 1.0000i
1.0000 + 1.0000i	1.0000 + 1.0000i
1.0000 + 1.0000i	1.0000 + 1.0000i
1.0000 - 1.0000i	-1.0000 - 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i	1.0000 - 1.0000i

QAMS =

1.0000 + 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i
1.0000 + 1.0000i
1.0000 + 1.0000i
1.0000 - 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i
1.0000 - 1.0000i
1.0000 + 1.0000i
-1.0000 + 1.0000i
1.0000 - 1.0000i
1.0000 + 1.0000i
1.0000 + 1.0000i
-1.0000 - 1.0000i
1.0000 - 1.0000i

Se puede comparar que x y z son correctos por lo que la transmisión de datos fue exitosa

z =

Columns 1 through 14

0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 1 1 1

Columns 15 through 28

1 0 1 1 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1

Columns 29 through 32

1 0 1 1

x =

Columns 1 through 14

0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 1 1 1

Columns 15 through 28

1 0 1 1 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1

Columns 29 through 32

1 0 1 1

Sin Errores

Se puede observar las constelaciones formadas en el codificador y decodificador para una modulación 4QAM sin canal.

