

**UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**

**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERIA ELECTRONICA.**

Trabajo de titulación previo a la  
obtención del título de Ingeniero  
Electrónico.

**Diseño y Simulación de un Sistema DWDM Óptico, Empleando  
Códigos LDPC “Low Density Parity Check”**

**Autores:**

Luis Antonio Cuzco Torres.

Jonnathan Ismael Arias Regalado.

**Tutor:**

Ing. Andrés Ortega, MgT

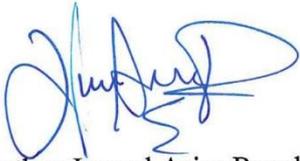
Cuenca-Ecuador

Enero 2017

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Nosotros, Jonnathan Ismael Arias Regalado con C.I.0104757513, Luis Antonio Cuzco Torres con C.I. 0302615281, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos los autores del trabajo de titulación: Diseño y Simulación de un Sistema DWDM Óptico, Empleando Códigos LDPC “Low Density Parity Check”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico con mención en telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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



Jonnathan Ismael Arias Regalado

0104757513



Luis Antonio Cuzco Torres

0302615281

Cuenca, enero del 2017

## CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DWDM ÓPTICO, EMPLEANDO CÓDIGOS LDPC “LOW DENSITY PARITY CHECK.”**, realizado por los autores, **Luis Antonio Cuzco Torres, Jonnathan Ismael Arias Regalado**, obteniendo el **Artículo Académico**, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.



Ing. Andrés Leonardo Ortega Ortega.

C.I. 0104166483001

Cuenca, enero del 2017

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Jonnathan Ismael Arias Regalado** con C.I.0104757513, **Luis Antonio Cuzco Torres** con C.I: 0302615281, autores del trabajo de titulación **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DWDM ÓPTICO, EMPLEANDO CÓDIGOS LDPC “LOW DENSITY PARITY CHECK”**, certificamos que el total contenido del “**Artículo Académico**” es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría



Jonnathan Ismael Arias Regalado

0104757513



Luis Antonio Cuzco Torres

0302615281

Cuenca, enero del 2017

---

## ÍNDICE

---

<b>ÍNDICE.....</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>V</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>VI</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>7</b>
<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>8</b>
<b>1. Presentación del Sistema.....</b>	<b>8</b>
1.1. Generación del Mensaje Binario .....	9
<b>2. Codificación LDPC.....</b>	<b>11</b>
2.1. Low Density Parity Chech - LDPC .....	11
2.2. Matriz H .....	11
2.3. Grafo De Tanner.....	11
2.4. Rango .....	12
2.5. Tasa De Codificación .....	13
2.6. Codificación .....	13
2.7. Decodificación.....	13
2.8. Algoritmo Suma – Producto.....	14
2.9. Algoritmo para Hard Desicion. ....	14
2.9.1. Hard Decision.....	14
2.9.2. Inicialización .....	14
2.9.3. Paso Horizontal .....	15
2.9.4. Paso Vertical .....	15
2.9.5. Estimación a Posteriori.....	15
<b>3. Redes Ópticas DWDM .....</b>	<b>16</b>
3.1. Componentes de una red DWDM .....	16
3.2. Elementos necesarios para implementar DWDM en fibras POF.....	17
3.3. Multiplexores y Demultiplexores en DWDM. ....	17
3.4. Implementación de DWDM en la POF .....	18
3.4.1. Fuente utilizada .....	18
3.4.2. Splitter .....	18
3.4.3. Filtros y Demultiplexores .....	18
3.4.4. Multiplexor .....	18
3.4.5. Detectores.....	19
3.5. Conversor Óptico / Eléctrico .....	19

3.6. Tipos de DWDM.....	20
<b>4. Fibra Óptica Plástica (POF).....</b>	<b>20</b>
4.1. Características de la PMMA-SI-POF .....	21
4.1.1. Atenuación .....	21
4.2. Modelamiento de la POF.....	23
4.2.1. Método de Van der Monde.....	23
4.3. Modulación OOK.....	24
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>26</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>30</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>31</b>

---

## AGRADECIMIENTOS

---

Agradezco a Dios por la vida, a mis Padres por todo el esfuerzo realizado y el apoyo brindado a pesar de todo, a mi Familia y Amigos pilares fundamentales de mi formación personal, quienes con sus consejos y palabras me apoyaron a seguir adelante y no me dejaron decaer en el camino hacia la culminación de mis estudios.

Agradezco al Ingeniero Andrés Leonardo Ortega tutor de este proyecto por todo el apoyo brindado durante el desarrollo del mismo.

*Luis Antonio Cuzco Torres.*

Quiero agradecer primeramente al ser supremo que me ha permitido vivir hasta hoy, Dios, que sin su bondad y ayuda no hubiera sido posible cumplir con mis metas. A mis padres que han sido el sustento y apoyo en toda decisión y proyecto que he realizado, por su apoyo brindado, por los valores inculcados y por brindarme la oportunidad de tener una excelente educación. Al ingeniero Andrés Ortega por su dirección en el desarrollo de esta tesis, Gracias.

*Jonnathan Ismael Arias Regalado.*

---

## DEDICATORIA

---

Dedicado a la memoria de Lic. María Luisa Amendaño profesora de primaria quien con sus palabras desde mi educación básica me incentivo a nunca dejar de aprender y seguir adelante con mis estudios con dedicación y compromiso. Sebastiana Simbaña y Rafael Cuzco por su apoyo, cariño y educación en valores que me enseñaron el verdadero significado de la responsabilidad, respeto y humildad. Dedicado a mis Padres y Hermanas por todos los momentos compartidos en los cuales me apoyaron a seguir adelante en mi preparación académica a pesar de los obstáculos que se presentaban.

*Luis Antonio Cuzco Torres.*

A mi familia, la que ha sido fundamental para ser hoy lo que soy. Mis padres que, con sus consejos, ayuda y amor han hecho de los momentos difíciles una simple prueba más, por ayudarme con los recursos necesarios para mis estudios y sobre todo, es por ellos, sus valores y principios que me han formado como persona, con buenos principios, con perseverancia y coraje para conseguir los objetivos que me proponga.

*Jonnathan Ismael Arias Regalado*

---

## RESUMEN

---

El presente trabajo de titulación propone la simulación de un esquema de transmisión y recepción eléctrico-óptico con la combinación de los códigos LDPC y las tecnologías de transmisión DWDM, en el cual se envían tres mensajes a diferentes longitudes de onda definidas por: 459nm(verde azulado), 590nm(amarillo) y 660 nm(rojo) que son admisibles por la Fibra Óptica Plástica (POF) PMMA, mismas que son codificados empleando códigos LDPC, luego de ello son multiplexados como un solo mensaje y se envía sobre un canal óptico a diferentes distancias, donde se considera los efectos de atenuación por inserción y acople de aproximadamente -7dB en splitters 1x3, atenuación en multiplexores de 1 dB, atenuación de la fibra en el dominio de la frecuencia y la atenuación gaussiana sintonizada a la longitud de onda central de cada LED, dentro de la misma se considera el envío del mensaje codificado y sin codificación con la finalidad de observar el performance del sistema al emplear los códigos LDPC.

Los resultados obtenidos demuestran que la POF puede ser utilizada en enlaces ópticos que sustituyan los sistemas tradicionales de comunicación que empleen medios guiados como el cobre en entornos con alta interferencia eléctrica y que requieran velocidades de hasta 100Mbps y al utilizarse conjuntamente con la codificación LDPC en sistemas DWDM, se puede mejorar la transmisión alcanzando hasta una distancia de 150m y reduciendo el BER hasta 5dB de relación señal a ruido (SNR). Para enlaces que no superan los 100m de longitud se puede transmitir hasta 3 codewords multiplexados en la tecnología DWDM, estos resultados validan por medio de esta simulación la aplicación de la combinación de los códigos LDPC con las tecnologías DWDM en un sistema real de transmisión que trabaje a mayores velocidades.

---

## INTRODUCCIÓN

---

La realización de este trabajo nace de una idea propuesta en el curso de “Redes de Comunicaciones”, donde se trabajó en la simulación e integración de las nuevas tendencias tecnológicas para las redes de siguiente generación (NGN). En el cual se describe la optimización de un transmisor DWDM [18] sobre la fibra óptica plástica de Polymethylmethacrylate (POF-PMMA) [1][2] usando códigos Low Density Parity Check (LDPC) [8][13].

El incremento de la tecnología actual requiere un mayor ancho de banda, velocidad y alta calidad de servicios (QoS) [3] para nuevos servicios y una gama variada de aplicaciones. En los sistemas multimedia en la actualidad se necesita mayor tasa de transmisión debido al uso de protocolos de internet para la transmisión de la televisión digital (IPTv) y otros servicios que requieren una alta calidad de video con baja pérdida de información [4].

Estos requerimientos de mayores velocidades de transmisión y ancho de banda elevado dan paso al desarrollo de los sistemas de comunicaciones ópticos con el uso de la fibra óptica que alcanza anchos de banda superiores en el orden de los GHz, logrando un rendimiento mayor al obtenido en los medios tradicionales de transmisión como alambres de cobre, cables coaxiales, microondas, etc. La POF inicialmente no estaba pensada para tener un despliegue en los sistemas de comunicaciones, sin embargo, en la actualidad se emplea para diversas aplicaciones como señalización, iluminación, algunas aplicaciones en redes industriales y en el sector del automóvil [1] presentando un futuro prometedor para emplearlas en redes LAN, HAN [5]. Juntamente con el uso de la fibra óptica para la transmisión de información, se requieren métodos que permitan un uso adecuado del medio, debido a esto aparecen las técnicas de multiplexación, en el dominio óptico se emplea DWDM que presenta un uso adecuado del medio, optimizando los sistemas [18].

Por esta razón, el objetivo de este trabajo es modelar un sistema de comunicaciones usando las fibras ópticas plásticas para analizar su performance. Para ello se ha implementado la simulación del entero sistema en Matlab, donde versa la codificación LDPC en señal eléctrica y la multiplexación DWDM sobre la señal óptica. La simulación se realiza por partes, comprendiendo todos los elementos que componen el enlace de fibra óptica, es decir: Fuentes (LED), multiplexador y demultiplexor DWDM, fotodiodos, codificadores y decodificadores LDPC, siendo el medio de transmisión una fibra óptica de plástica PMMA.

---

---

## OBJETIVOS

---

---

### **Objetivo General**

- Diseñar y simular un sistema *DWDM* óptico, empleando códigos *LDPC*.

### **Objetivos Específicos**

- Estudiar los diferentes elementos presentes en un sistema de transmisión *DWDM* para comunicaciones ópticas.
- Estudiar e implementar el modelamiento de un canal óptico.
- Implementar los códigos *LDPC* en el sistema de transmisión y recepción óptico.
- Analizar el performance y el comportamiento del sistema de comunicación cuando es inmerso un ruido gaussiano.

## METODOLOGIA

El objetivo del Sistema presentado considera la combinación de los códigos LDPC con la transmisión óptica DWDM para el envío de mensajes por medio de un canal óptico usando un tipo de fibra de plástico para sistemas de comunicaciones con longitudes no superiores a los 100m.

### 1. Presentación del Sistema.

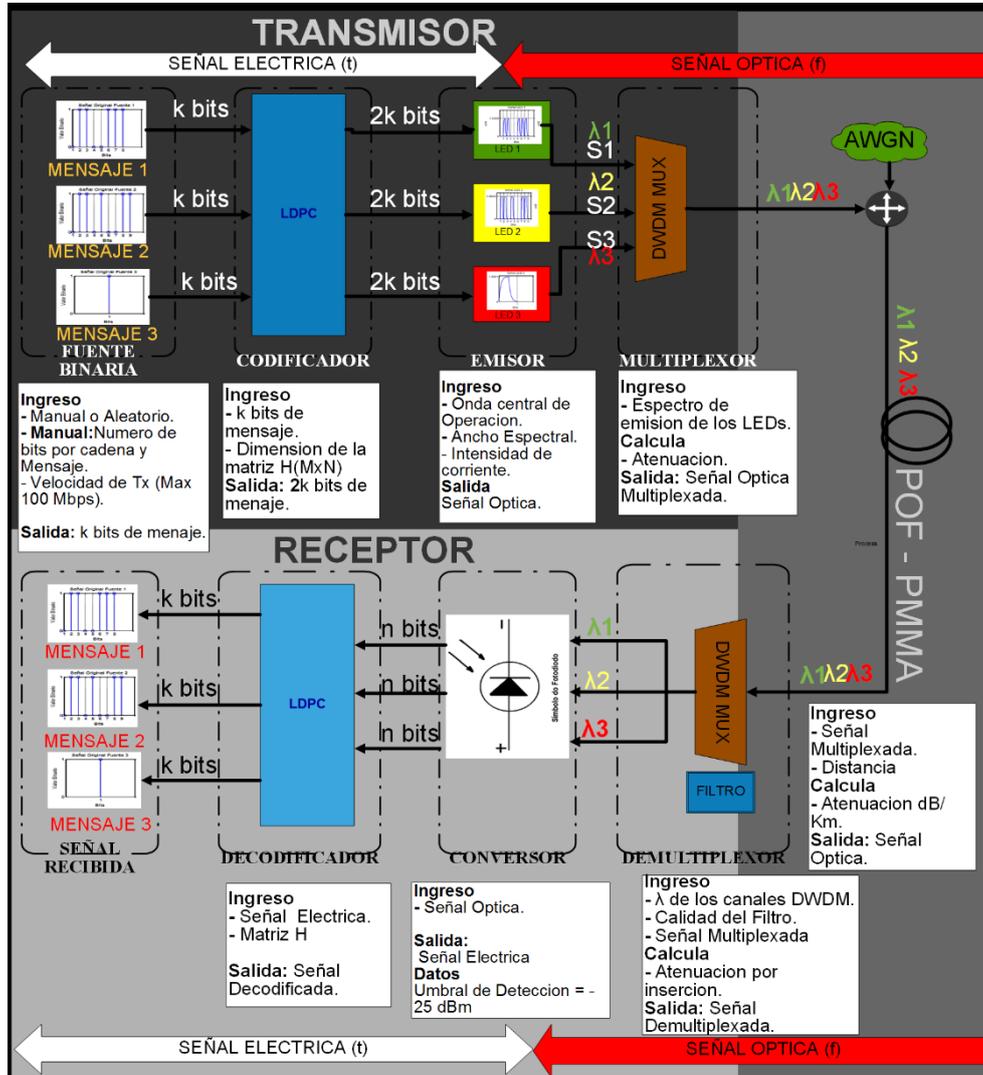


Figura 1: Diagrama de bloques del sistema propuesto.

El diseño propuesto se presenta a continuación en la Figura 1, donde se analiza un esquema de transmisión y recepción eléctrico-óptico usando tecnología DWDM para transmitir señales con alta tasa de transmisión de datos y confiabilidad en los mismos con el uso de codificadores que garanticen el performance del sistema para estructuras de acceso más exigentes como las redes de última generación.

Este tipo de sistemas pueden satisfacer la necesidad de mayor ancho de banda de transmisión para distancias cortas en entornos que sufran de alta interferencia en los medios de transmisión comúnmente usados como el cobre, en la actualidad el uso de las fibras ópticas plásticas ha incrementado considerablemente para el desarrollo HANs (Home Area Networks) como complemento a la FTTH (Fiber to the Home).

## 1.1. Generación del Mensaje Binario

Esta etapa es la encargada de generar aleatoriamente la cadena de bits que será la señal a procesarse y transmitirse por la fibra óptica plástica, entendiéndose por procesarse a la codificación de la información previa a su transmisión.

La simulación establece el uso de tres conversores que ejercen la función de una fuente lumínica con información y velocidad de transmisión generada aleatoriamente para cada mensaje.

El tamaño de la cadena de bits generada es de 100 bits aleatorios, los cuales pasaran a la etapa de codificación.

Las generaciones de los datos se basan en la presentación de la señal binaria que consiste en un tren de pulsos binarios que serán codificados y caracterizados según el emisor, la velocidad de transmisión máxima está determinada a 100 Mbps, según el tipo de fuentes lumínicas empleadas para la transmisión este valor podrá variar.

## 1.2. Modelamiento del Emisor

En este apartado se describirá el procedimiento que se emplea para caracterizar el comportamiento del Diodo Emisor de Luz empleado para la transmisión, encargado de convertir las señales eléctricas en señales ópticas y así transmitir las por medio de la fibra óptica plástica.

Los datos requeridos para caracterizar la fuente LED son la longitud de onda central a la que trabaja, su ancho de espectro, y la corriente en mA requerida para emitir la longitud de onda a la que trabaja. Con los datos antes mencionados podremos construir el espectro de emisión del LED como una curva de probabilidad de Gauss empleando la función *gaussmf* incluida en MATLAB, donde la longitud de onda de trabajo del LED será el valor máximo de la curva gaussiana y la varianza el valor correspondiente a la mitad del ancho del espectro.

El modelamiento matemático y el comportamiento de la fuente LED puede modelarse según las ecuaciones propuestas en [1] y determinan la representación del mismo en tiempo y frecuencia.

Para calcular la potencia del LED usamos la ecuación descrita a continuación.

$$P_{out} = \eta_{int} * \eta_{ext} * (h * c * I) / (q * \lambda) \quad (1)$$

Donde:

$\eta_{int}$  = Eficiencia Interna del LED (0,8)  
 $\eta_{ext}$  = Eficiencia Externa del LED (0.1)  
 $h$  = Constante de Planck ( $6,624 \times 10^{-34}$  Kg\*m<sup>2</sup>/s)  
 $c$  = Velocidad de la Luz en el vacío ( $3 \times 10^8$  m / s)  
 $q$  = constante universal de carga ( $1,603 \times 10^{-19}$  A \* s)  
 $I$  = Intensidad en mA requerida por la fuente de Luz  
 $\lambda$  = Longitud de onda de operación del LED

El resultado obtenido queda representado en unidades de (Kg\*m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>) que es una equivalencia a representar la potencia óptica en vatios.

El diagrama presentado en la figura 3.5 representa la estructura del bloque.

Para la caracterización del LED en el dominio del tiempo se considera el comportamiento de la fuente como un capacitor en su etapa de carga y descarga, en donde existe un tiempo de subida hasta un valor máximo en la etapa de carga y uno de bajada en la etapa de descarga.

Potencia de Subida (Ps) del LED

$$P_s = P_{max} * (1e^{-ts*\tau_s}) \quad (2)$$

Potencia de Bajada (Pb) del LED

$$P_b = P_{max} * e^{-tb*\tau_b} \quad (3)$$

Considerando un tiempo de subida y bajada de bit,  $t_s$  y  $t_b$  respectivamente son iguales para una velocidad de transmisión de 100 Mbps podemos obtener los valores que permiten calcular el ciclo de subida y bajada para la ecuación del modelamiento.

$$t_{bit} = t_s + t_b \quad (4)$$

$$t_s = t_b$$

$$t_{bit} = 2 * t_s$$

$$t_s = 1/2 * t_{bit}$$

$$t_s = 1/2 * 1/V_{tx} = 1/2 * 1/100e^6 = 5ns$$

$V_{tx}$ = Velocidad de Transmisión (Max 100 Mbps), considerando una eficiencia de 99% en la subida respecto a la máxima potencia.

$$P_s = 0.99 * P_{max} \quad (5)$$

$$0.99 * P_{max} = P_{max} * (1e^{-5e^{-9}*\tau_s})$$

$$\tau_s = 9,2103e^8$$

$$0.01 * P_{max} = 0.99 * P_{max} * e^{-5e^{-9}*\tau_b}$$

$$\tau_b = 9,1904e^8 \quad 5$$

Potencia de Subida (Ps) del LED

$$P_s = P_{max} * (1e^{-9,2103e^8*t}) \quad (6)$$

Potencia de Bajada (Pb) del LED

$$P_b = P_{max} * e^{-9,1904e^8 * t} \quad (76)$$

## 2. CODIFICACIÓN LDPC.

### 2.1. Low Density Parity Check - LDPC

Los códigos LDPC (Low Density Parity Check Codes) poseen una matriz de paridad de baja densidad [11]. La matriz posee muchos “0” y pocos “1” esta característica permite tener algoritmos de menor complejidad.

En si los códigos LDPC toman el mensaje que se desea transmitir, mediante un algoritmo de codificación se aumentan bits al mensaje. Los bits aumentados hacen referencia a bits de paridad, es decir estos bits nos permiten conocer si el número de 1 en el mensaje es par o impar [9]. Una vez codificado el mensaje se transmite por el canal donde el mensaje se ve afectado por ruido e interferencias propias del canal. En el receptor llega un mensaje distinto al que se transmitió, es ahí donde el algoritmo de decodificación LDPC permite encontrar y corregir los errores que se generaron en el canal. El algoritmo se basa en las ecuaciones que conforman la matriz de paridad, lo que se realiza es una verificación de que el mensaje recibido satisfaga las ecuaciones de paridad. En el caso de que no se cumplan estas ecuaciones se corrige el error y se procede a decodificar el mensaje.

### 2.2. Matriz H

La matriz de paridad H, es la matriz que permite decodificar los vectores recibidos.

La matriz H está formada por las ecuaciones de paridad, es decir contiene todas las restricciones que se deben satisfacer para establecer que la información recibida no contiene errores. [10]

Para cumplir con todas las restricciones de ortogonalidad la matriz H debe tener los siguientes componentes:

$$H = [I_{n-k} | P^T] \quad (8)$$

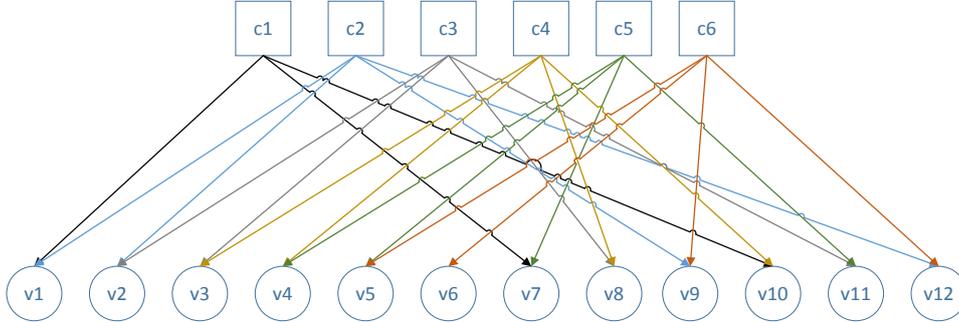
Donde  $I_{n-k}$  es la matriz identidad y  $P^T$  es la matriz que contienen las ecuaciones de paridad.

### 2.3. Grafo De Tanner

Tanner en su investigación propuso una forma de representar los códigos LDPC gráficamente. El grafo está formado por N nodos de bit (bit nodes) y por M nodos de chequeo (check nodes) [9].

Haciendo referencia a la matriz de paridad H los nodos se encuentran ubicados como indica la siguiente figura:

$$H = \begin{array}{cccccc|cccccc} v1 & v2 & v3 & v4 & v5 & v6 & v7 & v8 & v9 & v10 & v11 & v12 \\ \left. \begin{array}{l} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} c1 \\ c2 \\ c3 \\ c4 \\ c5 \\ c6 \end{array} \end{array}$$



**Figura 2:** Grafo de Tanner [10].

Se puede observar que los nodos de comprobación están conectados a los bits que deben comprobar. Una rama conecta el nodo de comprobación  $m$  con el bit  $n$  si y solo si la  $m$ -ésima comprobación de paridad involucra el  $n$ -ésimo bit, es decir la matriz  $H$  se analiza por filas, en la primera fila se observa en qué posición se encuentran los “1”, después se hace relación la posición de los “1” y  $v_n$ , es decir que valores de  $v_n$  contienen “1”.

Para la figura anterior en la primera fila se puede observar que existen “1” en  $v_1$ ,  $v_7$  y  $v_{10}$  por lo que  $c_1$  se conecta con  $v_1$ ,  $v_7$  y  $v_{10}$ . Este procedimiento se realiza con todas las columnas, para la figura anterior se tendría que para la segunda columna los “1” se encuentran en  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_9$  y  $v_{12}$ . En la siguiente tabla se muestra el algoritmo completo para realizar el grafo de Tanner de la Figura 2 [10].

**Tabla 1:** Algoritmo para el grafo de Tanner.

Columna de la Matriz H	Fila de la matriz H que contienen “1”.
$c_1$	$v_1, v_7$ y $v_{10}$
$c_2$	$v_1, v_2, v_9$ y $v_{12}$
$c_3$	$v_2, v_3, v_8$ y $v_{11}$
$c_4$	$v_3, v_4, v_8$ y $v_{10}$
$c_5$	$v_4, v_5, v_7$ y $v_{11}$
$c_6$	$v_5, v_6, v_9$ y $v_{12}$

## 2.4. Rango

El rango de una matriz hace referencia al número de filas que son linealmente independientes y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{rango}(H) = N - K \quad (9)$$

Con el cálculo del rango de  $H$  se puede determinar si las restricciones de paridad (ecuaciones) son linealmente independientes, la condición es:

Si  $\text{rango}(H) = M$  todas las restricciones son linealmente independientes.

El rango de la matriz H también nos permite determinar el número de palabras código Q que se pueden generar. [12]

$$Q = 2^{N-Rango(H)} = 2^K \quad (10)$$

## 2.5. Tasa De Codificación

Se define como tasa de codificación al número de bits de información que contenga cada palabra codificada y se puede calcular así [11]:

$$r = K/N \quad (11)$$

## 2.6. Codificación

Los datos  $u = u_1, u_2, \dots, u_N$  se codifican mediante la multiplicación entre la matriz generadora G y el mensaje u.

$$c = u \cdot G \quad (12)$$

Vectores y Matrices que intervienen en la codificación

Cada  $u_N$  proviene de un nodo de Tx variable.

Matriz Generadora (G): Es de tamaño  $N \times 2N$ , sirve para generar las palabras codificadas, está formada por la matriz identidad  $I_N$  y la matriz P.

$$G = [I_N | P] \quad (13)$$

Vector de información codificada (c): Es el resultado que se obtiene de codificar el vector de información, tiene una longitud 2N.

$$c = u \cdot G = \left[ \begin{array}{c} \overleftarrow{c_1, c_2, \dots, c_N} \\ \overrightarrow{c_{N+1}, c_{N+2}, \dots, c_{2N}} \end{array} \right] = [N \text{ bits de informacion}, \quad (14) \\ N \text{ bits de paridad}]$$

Matriz de chequeo de paridad H: Se construye de manera que el producto entre los vectores fila de la matriz G con los de la matriz H sean ortogonales.

$$H = [P^T | I_N] \quad (15)$$

$$G * H^T = 0 \quad (16)$$

$H^T$  y  $P^T$  son matrices transpuestas [9].

## 2.7. Decodificación

Es el proceso en el cual el receptor transforma el código receptado para interpretar los signos empleados. Los códigos LDPC para la decodificación cuenta con varios algoritmos, entre los más comunes y utilizados se tienen [12]:

- Suma – Producto.
- Paralelo.
- Basado en la matriz de chequeo de paridad H.

## 2.8. Algoritmo Suma – Producto.

Es un algoritmo iterativo que pretende encontrar el vector decodificado  $d$  como una estimación del vector código  $c$  y que satisfaga la condición del síndrome.

La conexión entre nodos  $d_j$  y  $h_i$  existirá siempre y cuando el elemento de la matriz H sea uno, es decir  $H_{ij} = 1$ , por lo tanto  $d_j \rightarrow h_i$ .

La información probabilística  $a_{ij}^a$  basada en la información proporcionada por los otros nodos de chequeo relacionados con ese nodo variable, de que el nodo de chequeo se encuentra en el estado a  $h_i \rightarrow d_j$ .

La información probabilística  $R_{ij}^a$  se calcula con la información dada por los nodos variables, de que la correspondiente ecuación sea satisfecha si el nodo variable está en el estado a [10] [11].

## 2.9. Algoritmo para Hard Decision.

### 2.9.1. Hard Decision

Es un tipo de decodificación utilizado en los códigos LPCD en donde la decisión se toma en base a la tensión de umbral, es decir si la señal supera la tensión de umbral se considera que el valor recibido es un “1” lógico mientras que si la señal recibida está por debajo del umbral se considera que se ha receptado un “0” lógico [11].

### 2.9.2. Inicialización

Los valores de  $Q_{ij}^a$  se ajustan en un principio a la probabilidad a priori  $f_j^a$  de los símbolos, que es la probabilidad de que el j-esimo símbolo sea a. Para el caso binario  $a = \{0, 1\}$  [12].

$$f_j^1 = 1 / \left( 1 + e^{-\frac{2y_j}{\sigma^2}} \right) \quad (17)$$

$$f_j^0 = 1 - f_j^1 = e^{-\frac{2y_j}{\sigma^2}} / \left( 1 + e^{-\frac{2y_j}{\sigma^2}} \right) \quad (18)$$

Donde

$y_j$  = Valor del j-esimo símbolo a la salida del canal afectado con ruido gaussiano blanco  $N_0$ .

$\sigma^2$  = Varianza del ruido  $\frac{N_0}{2}$ .

### 2.9.3. Paso Horizontal

Se calcula  $\delta Q_{ij} = Q_{ij} - Q_{ij}^2$  para cada i, j.

$$\delta R_{ij} = \prod_{j' \in \frac{N(i)}{j}} \delta Q_{ij'} \quad (19)$$

Utilizando la ecuación se encuentra el valor de

$$R_{ij}^0 = \frac{1}{2}(1 + \delta R_{ij}) \quad (20)$$

$$R_{ij}^1 = \frac{1}{2}(1 - \delta R_{ij}) \quad (21)$$

### 2.9.4. Paso Vertical

Se estima para i, j con a = {0,1}

$$Q_{ij}^a = \alpha_{ij} * f_j^a * \prod_{i' \in \frac{M(j)}{i}} R_{i'j}^a \quad (22)$$

Donde

M(j): Es el subíndice de todos los nodos de chequeo  $h_i$  que participan del nodo variable  $d_j$

$\alpha_{ij}$ : Debe cumplir

$$Q_{ij}^0 + Q_{ij}^1 = 1 \quad (23)$$

Si  $C_{ij}^a = f_j^a * \prod_{i' \in \frac{M(j)}{i}} R_{i'j}^a$  entonces  $Q_{ij}^a = \alpha_{ij} * C_{ij}^a$

Por lo tanto

$$Q_{ij}^0 = C_{ij}^0 / (C_{ij}^0 + C_{ij}^1) \quad (24)$$

$$Q_{ij}^1 = C_{ij}^1 / (C_{ij}^0 + C_{ij}^1) \quad (25)$$

### 2.9.5. Estimación a Posteriori

Para cada j se estima  $Q_{ij}^0$  y  $Q_{ij}^1$  utilizando la ecuación (16) y (17) teniendo en cuenta la condición (15) se puede encontrar el valor de  $\alpha_j$

$$\alpha_j = 1 / (C_{ij}^0 * R_{ij}^0 + C_{ij}^1 * R_{ij}^1) \quad (26)$$

$$Q_j^0 = (C_{ij}^0 * R_{ij}^0) / (C_{ij}^0 * R_{ij}^0 + C_{ij}^1 * R_{ij}^1) \quad (27)$$

$$Q_j^1 = (C_{ij}^1 * R_{ij}^1) / (C_{ij}^0 * R_{ij}^0 + C_{ij}^1 * R_{ij}^1) \quad (28)$$

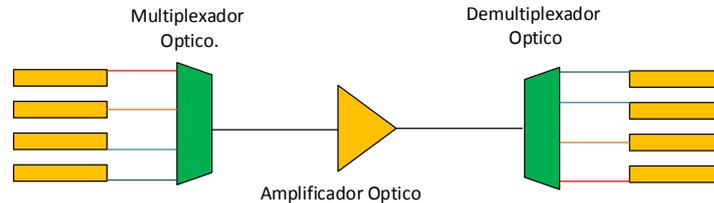
Si se cumple que  $Q_j^0 > Q_j^1$  entonces  $d_j = 0$ , para cualquier otro caso  $d_j = 1$ .

Si  $H * d = 0$  se detiene el algoritmo, caso contrario se repite a partir del paso horizontal [9] [11] [12].

### 3. REDES ÓPTICAS DWDM

Debido al uso de fibra óptica, hoy es posible transmitir gran cantidad de información a grandes distancias a través de un medio guiado. Esta revolución ha generado que nuevas investigaciones se centren en crear nuevas tecnologías que permitan explotar aún más y de forma más eficiente el medio óptico. Dense Wavelength División Multiplexing (DWDM) o Multiplexación por división de longitud de onda, es una técnica que permite aprovechar al máximo la capacidad del canal de fibra óptica. Esta sección está dedicada al estudio de todos los conceptos necesarios que permitan entender de qué se trata esta tecnología y como puede ser aplicada para aprovechar al máximo sus características. En [4] se establece que DWDM es una técnica que permite, a las salidas de diferentes fuentes emisoras de luz en diferentes longitudes de onda, ser acopladas para poder transmitirse a través de una misma fibra óptica [13] [14].

#### 3.1. Componentes de una red DWDM



*Figura 3: Componentes de una red DWDM.*

**Emisores y Detectores de luz:** Son dispositivos activos que convierten las señales eléctricas en pulsos de luz.

**Fuentes:** Son dispositivos emisores de luz compactos (se direcciona la luz a un punto), monocromáticos (en la práctica no existen), estables y duraderos. [18]

Existen dos tipos de fuentes de luz, los diodos emisores de luz (LEDs) y diodos lasers semiconductores. [16]

**Detectores:** En el receptor es necesario recuperar las señales transmitidas a diferentes longitudes de onda, generalmente se usan fotodetectores que son dispositivos de banda ancha, que reciben la señal del demultiplexor y la convierten nuevamente en señales eléctricas. [17]

Existen dos tipos de fotodetectores, el fotodiodo positivo-intrínseco-negativo (PIN) y el fotodiodo avalancha (APD). [15]

### **3.2. Elementos necesarios para implementar DWDM en fibras POF.**

Un sistema DWDM consta de elementos pasivos y activos, estos elementos se trataron en el apartado anterior 3.1, para implementar la tecnología DWDM se necesitan elementos extras como multiplexores, demultiplexores y filtros, siendo necesarios en ciertos casos amplificadores sobre todo cuando el enlace cubre grandes distancias.

#### **3.2.1. Amplificador Óptico**

Es un dispositivo que permite incrementar la potencia de la señal sin la necesidad de pasar la señal al dominio eléctrico, en el caso de la POF no se cubren grandes distancias por lo que no es necesario en nuestro trabajo incluir estos dispositivos.

#### **3.2.2. Filtros ópticos**

Este dispositivo tiene como objetivo principal seleccionar de varias longitudes de onda una específicamente.

##### **3.2.2.1. Filtro de Absorción**

El objetivo de este elemento es el de atenuar la potencia de la luz absorbiendo longitudes de onda específicas. Son de gran utilidad ya que su respuesta en frecuencia es similar a la curva de Gauss, centrándose en la longitud en la que se desea sintonizar y teniendo como varianza el ancho espectral que se desea atenuar, siendo esta última característica la que determina la calidad del filtro [23].

##### **3.2.3. Splitters y Combinadores Ópticos**

Son elementos que permiten dividir la señal de ingreso en N señales de salidas con pérdidas mínimas. La mayoría de estos dispositivos tienden a introducir pérdidas de inserción en cada una de las salidas con la misma intensidad [19] [22].

Para calcular las pérdidas en el splitter se utilizan las siguientes expresiones:

$$\text{Pérdidas de exceso} = 10 \log(P_{i1}/(P_{o1} + P_{o2})) \quad (29)$$

$$\text{Pérdidas de inserción} = 10 \log(P_o/P_i) \quad (30)$$

### **3.3. Multiplexores y Demultiplexores en DWDM.**

Los multiplexores, para poder transmitir varias señales por un solo medio óptico hacen uso de varios fenómenos, dichos fenómenos y algunos arreglos se describen a continuación.

### **3.4. Implementación de DWDM en la POF**

Las fibras POF que se utiliza en DWDM deben tener como mínimo dos ventanas de trabajo, es decir de baja atenuación. En esta investigación se ha seleccionado la fibra POF con núcleo PMMA, este tipo de fibra posee tres ventanas de trabajo haciéndola ideal para el sistema propuesto. El modelo de fibra seleccionada es la POF MH4001 fabricada por la empresa ESKA. Todas las especificaciones se presentan en el apéndice C, pero como parámetros principales se tiene que poseer una amplitud numérica de 0.30 y atenuación de 160 dB/Km trabajando a 650 nm.

#### **3.4.1. Fuente utilizada**

La fuente seleccionada es un diodo LED, posee ciertas ventajas como inmunidad a cambios de temperatura, bajo costo y la potencia emitida es suficiente para cortas distancias como las que se van a trabajar posteriormente.

Se analizaron distintos tipos de leds entre los cuales se determinó que los LEDS que trabajen en el espectro de luz visible y sobre todo en las regiones que comprenden los colores Verde, Amarillo y Rojo presentan una atenuación menor.

Los LEDS seleccionados son fabricados por Nichia, Sander Electronics y AVAGO technologies, estos dispositivos permiten realizar transmisiones a velocidades que superan los 100 Mbps. Las frecuencias de trabajo de los LEDS son: 459 nm(Verde), 590 nm(amarillo) y por ultimo 660 nm(rojo).

#### **3.4.2. Splitter**

Dependiendo del número de mensajes que se desea transmitir determinara el splitter a ser utilizado, como ya se mencionó los más utilizados son splitter 1x2 y 1x3 que presentan atenuaciones de -3.7 dB y -7 dB respectivamente. Los modelos seleccionados para nuestro sistema son IF562 e IF543, los datos de estos dispositivos se exponen en el apéndice B.

#### **3.4.3. Filtros y Demultiplexores**

La POF tiene la característica de poseer gran apertura numérica ( $NA=0.5$ ) por lo que la selección de un filtro debe ser considerando un tipo que no dependa del ángulo de incidencia de la luz. Los filtros que cumplen con los requisitos antes mencionados son lo de absorción, por lo tanto, son utilizados en nuestra investigación [21].

#### **3.4.4. Multiplexor**

El dispositivo que se eligió es fabricado a base de POF y acopladores 1x2 y 1x3, sus características se presentan en el apéndice B.

En este bloque se realiza la multiplexación de las tres señales, para ello se trabaja en el dominio de la frecuencia sumando los tres espectros generados por cada fuente LED, considerando 1dB como pérdida de inserción entre las señales, obteniendo así una simulación más realista, para la multiplexación en el dominio del tiempo se emplea una concatenación de mensajes con la finalidad de enviar las tres señales en un solo mensaje, estas señales pueden ser concatenadas de diferentes formas dependiendo del

algoritmo empleado, en nuestro caso se empleó un encolamiento FIFO el primero que entra es el primero que sale.

### 3.4.5. Detectores

Nuestro trabajo analiza el comportamiento del sistema en el dominio óptico por lo que nos basta con utilizar un fotodiodo como detector, el modelo elegido en este caso es el S3883 teniendo la característica principal que su responsividad depende de la longitud de onda de detección. Para las ventanas sobre las cuales se va a trabajar (459nm, 590nm y 660 nm) este fotodiodo tiene una responsividad de 0.3 A/W, 0.41 A/W y 0.48 A/W respectivamente. Partiendo de los datos del fabricante se obtiene las siguientes relaciones:

Ecuación para hallar la corriente generada por el fotodiodo.

$$I_F = P_{optica}[W] * Responsividad \left[ \frac{A}{W} \right] \quad (31)$$

Ecuaciones para encontrar la responsividad del fotodiodo

459 nm

$$1\mu A = P_{optica} * 0.3 A/W \quad (32)$$

590 nm

$$1\mu A = P_{optica} * 0.41 A/W \quad (33)$$

650 nm

$$1\mu A = P_{optica} * 0.48 A/W \quad (34)$$

Para los detectores seleccionados la sensibilidad es

**Tabla 2:** Sensibilidad del Detector

Longitud de Onda	Sensibilidad
459 nm	-24.81 dBm
590 nm	-26.126 dBm
660 nm	-26.819 dBm

### 3.5. Conversor Óptico / Eléctrico

Se emplea un bloque de decisión que emula el funcionamiento del fotodetector pin para ello es necesario considerar la potencia de emisión del led, la atenuación al atravesar la fibra y la resistencia de carga, considerando además el efecto de la fibra caracterizada por su propia curva de atenuación.

$$P_{lim} = 0.5(I * P_{out} * e^{-\alpha L})R_L \quad (35)$$

Donde:

**P<sub>lim</sub>**= Potencia umbral para la toma de decisión en la detección.

**α**= Atenuación de la fibra en términos lineales de Km<sup>-1</sup>

**L**= Longitud del enlace en Km

**I**= la corriente del fotodiodo PIN en A/W

$R_L$ = la resistencia de carga en ohms

Luego de la detección de cada bit se define si es un uno o un cero dependiendo de la potencia limite y se los concadena nuevamente recobrando la señal transmitida y que pasara a la etapa de demultiplexación.

### 3.6. Tipos de DWDM

Existen sistemas DWDM que poseen ciertas variantes con respecto a la estructura principal, como por ejemplo componentes ópticos, complejidad, costos, número de canales transmitidos, etc. A continuación, se presenta un análisis comparativo de estas tecnologías [24] [22].

**Tabla 3:** Tecnologías DWDM.

TECNOLOGIA	BW del Canal.	Velocidad de Transmisión.	Distancia Máxima.
DWDM de ultra larga distancia.	12.5 – 25 GHz.	10 - 40 Gbps	4000 Km
DWDM de larga distancia.	50 – 100 GHz.	10 - 40 Gbps	800 Km
DWDM metropolitano.	100 – 200 GHz.	10 Gbps	300 Km
CWDM	2500 GHz.	2.5 Gbps	80 Km

## 4. FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA (POF)

Las fibras plásticas poseen varias características notables como su flexibilidad, resistencia ante presión, peso ligero, fácil instalación y bajo costo. La desventaja que presenta la fibra óptica plástica es un alto índice de atenuación por Km, debido a ello es empleado en aplicaciones de cortas distancias como alternativa a las redes Ethernet [5][6] ya que al transmitir la información en forma de luz visible es inmune a ruidos o interferencias electromagnéticas del medio garantizando una mejor calidad de las señales a la recepción [2][7]. El material usado comúnmente en la elaboración de la fibra óptica de plástico es el PMMA (Polymethykmethacrylate), esto resulta de la mezcla de etileno, ácido cianhídrico y alcohol metílico. PMMA Es resistente al agua, ácidos diluidos, gasolina, aceite mineral, ya que es un compuesto orgánico posee un peso molecular aproximado de  $10^5$ , a continuación, se presenta la tabla 4 con las especificaciones de la fibra plástica PMMA.

**Tabla 4:** Propiedades de la PMMA [2].

Parámetros	Valor	Unidad
Índice de refracción	1.492	-----
Temperatura de transmisión vítrea Tg	115	°C
Densidad	1.18	g/cm <sup>3</sup>
Absorción del agua hasta saturación	0.5	%
Conductividad Térmica	0.17	W/m*K
Coefficiente de expansión de calor térmico	0.07	Mm/m*K
Dureza Rockwell (M), Dureza Shore (D)	95, 70	-----
Fuerza de Tensión	76	N/mm <sup>2</sup>
Resistividad	$10^{15}$	Ohm*cm
Resistencia al quiebre	20 - 25	kV/mm
Temperatura de combustión espontanea	430 Aprox.	°C

La fibra óptica plástica no puede ser considerada como una competencia directa de las fibras de vidrio, sin embargo, debido a sus propiedades puede remplazar a los medios de transmisión guiados basados en cobre, en medios hostiles o con alto nivel de humedad e interferencias electromagnéticas.

#### 4.1. Características de la PMMA-SI-POF

##### 4.1.1. Atenuación

La atenuación es un factor importante en la determinación de la longitud máxima del enlace ya que considera la potencia obtenida luego de que el haz de luz lanzado atraviese la fibra óptica y depende de las propiedades del material y la longitud de onda de transmisión.

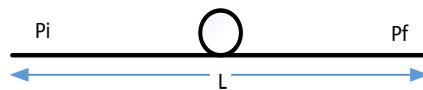


Figura 4: Representación gráfica de un enlace óptico.

La potencia de luz luego de atravesar la fibra óptica de longitud L decrece, para modelar este fenómeno se aplica la siguiente ecuación:

$$P_f = P_i e^{-\alpha' L} \quad (36)$$

Donde:

$P_f$  = Es la potencia de luz luego de atravesar la fibra óptica

$P_i$  = Es la potencia de ingreso a la fibra óptica

$L$  = Longitud del enlace en Km

$\alpha'$  = Coeficiente de atenuación  $\text{Km}^{-1}$

facilitando el trabajo con los números se expresa la atenuación en una manera logarítmica, donde el coeficiente de atenuación es expresado como  $\alpha$  en dB/Km.

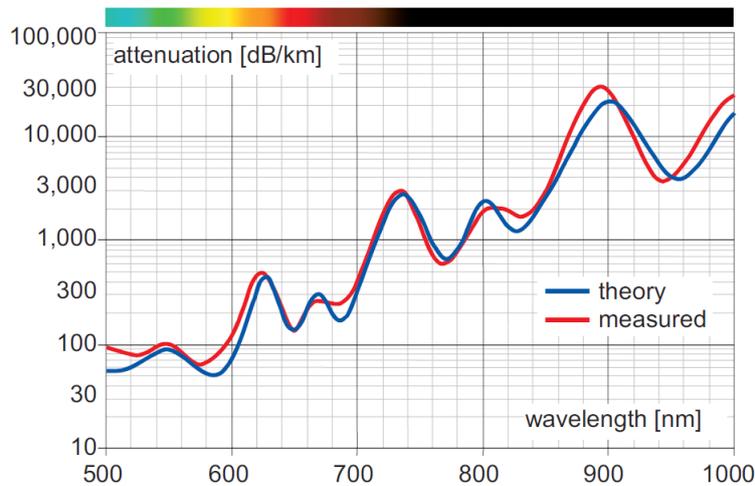
$$\alpha = (10/L) \log(P_i/P_f) = 4,343\alpha' \quad (37)$$

La atenuación es un valor adimensional que puede ser representado en forma de numero o en dB obtenido del producto de  $\alpha * L$ . La atenuación en una fibra óptica es diferente a la atenuación por unidad de longitud de la fibra óptica, a menudo son confundidas como iguales, para ello a continuación se presenta un cuadro de fórmulas para definir las adecuadamente.

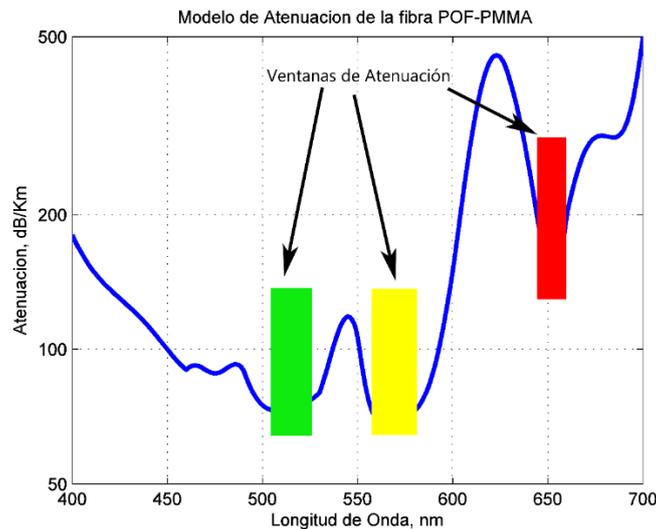
Tabla 5: Definición de Atenuación [2].

Descripción	Símbolo	Unidad	Formula
Coeficiente de Atenuación, Lineal	$\alpha'$	$\text{Km}^{-1}$	$\{\ln(P_i/P_f)\}/L$
Coeficiente de Atenuación, Logarítmico	$\alpha$	dB/Km	$\{10\log(P_i/P_f)\}/L$
Atenuación	a	dB	$10\log(P_i/P_f)$

La representación logarítmica para cortas distancias es más práctica que representar la atenuación para la totalidad del enlace, las POFs son comúnmente usadas para enlaces de corta distancia debido a su atenuación, como se puede observar en la Figura 5.



**Figura 5:** Curva de Atenuación de la POF-PMMA [2]



**Figura 6:** Atenuación de la POF-SI-PMMA.

En la Figura 6 se puede distinguir claramente tres ventanas de transmisión con valores en longitudes de onda de 500 nm, 570 nm y 650 nm, en un rango de atenuación menor de 80 dB/Km alrededor del intervalo de la luz visible. Las disposiciones de los materiales en la conformación de la fibra determinan específicamente las tres ventanas de transmisión con longitudes de 480 nm (Azul) para la primera ventana, 520 nm (Verde) en la segunda ventana y 650 nm (Rojo) en la tercera ventana [2][7].

La primera y segunda ventana poseen una atenuación menor de 80 dB/Km, mientras la tercera ventana la atenuación casi se duplica, la ventaja de esta ventana es que posee elementos disponibles que trabajan a gran velocidad.

La transmisión con PMMA POF está limitada comercialmente a transmisiones de pocos cientos de metros dependiendo de la tasa de transmisión.

La aplicación de la PMMA-POF se limita debido a su atenuación, estas pueden ser usadas en enlaces de redes domiciliarias o de oficina.

## 4.2. Modelamiento de la POF.

La característica que se desea modelar en este tipo de fibras es la atenuación ya que es el factor más importante rigiendo así el comportamiento del canal.

Para el modelamiento de la fibra se realiza un análisis en el dominio de la frecuencia mediante la interpolación de los valores de atenuación característicos de la fibra.

Se utiliza la interpolación mediante el polinomio de LaGrange con el objetivo de encontrar una función de grado k. Para resolver la interpolación se aplica algebra lineal mediante la resolución de sistemas de ecuaciones. Una vez encontrado el polinomio interpolador se obtiene una matriz de Vandermonde, que en función de la base de Lagrange se obtiene la solución. Matlab posee la función *vander* siendo de gran utilidad al trabajar en la interpolación.

### 4.2.1. Método de Van der Monde

El objetivo principal es que dado n+1 puntos se determine un polinomio de grado n que pase por todos los puntos. Para encontrar el polinomio es necesario resolver un sistema de ecuaciones que corresponden a cada punto del sistema.

$$p_n(x_0) = a_0 + a_1x_0 + a_2x_0^2 + \dots + a_{n-1}x_0^{n-1} + a_nx_0^n = y_0 \quad (38)$$

Se repite este procedimiento para cada punto por lo que se obtendrá un sistema de n ecuaciones con n incógnitas

$$\begin{bmatrix} x_n^n & \dots & x_n^2 & x_n & 1 \\ x_{n-1}^n & \dots & x_{n-1}^2 & x_{n-1} & 1 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ x_1^n & \dots & x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_0^n & \dots & x_0^2 & x_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n \\ a_{n-1} \\ \vdots \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_n \\ y_{n-1} \\ \vdots \\ y_1 \\ y_0 \end{bmatrix}$$

Tras resolver este sistema de ecuaciones se obtiene los coeficientes del polinomio interpolado ya que se conoce todos los puntos. Para la interpolación en este trabajo se utiliza MATLAB a través de las funciones *vander* y *backslash* [27].

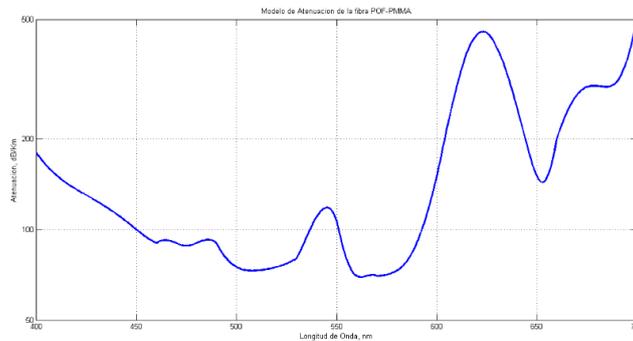
El instituto Polymer Optical Fiber Application Center de la Universidad de ciencias aplicadas Georg Simon Ohm de Nurnberg Alemania determino una curva que caracteriza la atenuación en la fibra POF-PMMA. Partiendo de esta curva se encuentran los puntos a ser interpolados, estos datos se presentan a continuación.

**Tabla 6:** Datos obtenidos para obtener la gráfica de atenuación [2].

Eje X (nm)	Eje Y(dB/Km)
400	180
425	130
450	100
460	90
470	90
480	90
490	90
495	80
500	75
520	75

530	80
540	110
550	100
560	70
565	70
570	70
590	90
600	150
610	300
625	450
630	400
650	150
660	200
670	280
680	300
690	310
700	500

El resultado de la interpolación realizada en Matlab se muestra en la Figura 7.



**Figura 7:** Modelo de Atenuación POF-PMMA.

### 4.3. Modulación OOK.

Para realizar el análisis espectral de esta modulación, se parte de una portadora con frecuencia  $\omega_0$ , que varía su amplitud de acuerdo a una señal moduladora de frecuencia  $\omega_d$ .

La señal modula se expresa como

$$f(t) = g(t) \text{sen}(\omega_0 t) \quad (39)$$

Siendo  $f(t)$  la señal modulada y  $g(t)$  la señal moduladora, es decir el mensaje

Al Aplicar la transformada de Fourier se obtiene que

$$F(\omega) = (G(\omega - \omega_0) - G(\omega + \omega_0))/2j \quad (40)$$

Si analizamos la ecuación (41), se observa que es necesario encontrar el espectro del mensaje para poder así analizar el espectro de la señal modulada. Al ser  $g$  un mensaje binario, su espectro es discreto, por lo que para encontrar su espectro se aplica series trigonométricas de Fourier.

$$g(t) \sim (a_0/2) + a_n \cos(n\omega_d t) + b_n \text{sen}(n\omega_d t) \quad (41)$$

Siendo la componente directa

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} g(t) dt = A/2 \quad (42)$$

En consecuencia, la señal moduladora estará compuesta por una señal directa e infinitas componentes sinusoidales con frecuencia múltiplo de la frecuencia  $\omega_d$  [28].

$$g(t) \sim \frac{A}{2} + \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{2A}{n\pi} \text{sen}(n\omega_d t), n \text{ impar} \quad (43)$$

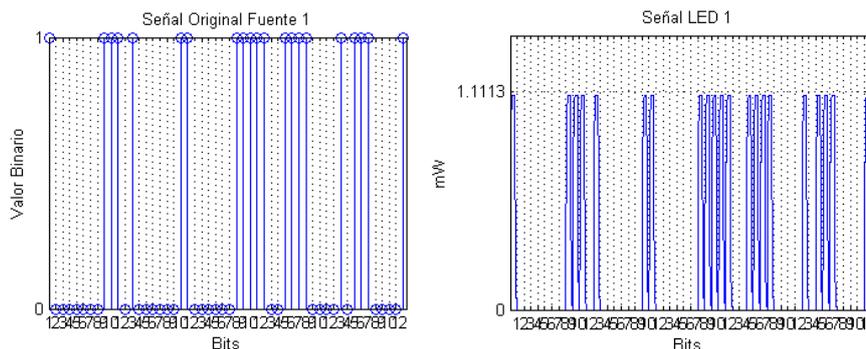
## RESULTADOS

La simulación desarrollada en Matlab establecida para una longitud de 100 metros empleando los LEDs detallados en la Tabla 7 para caracterizar cada fuente nos brindan los resultados presentados a continuación en cada Grafica.

**Tabla 7:** Características de los LEDs.

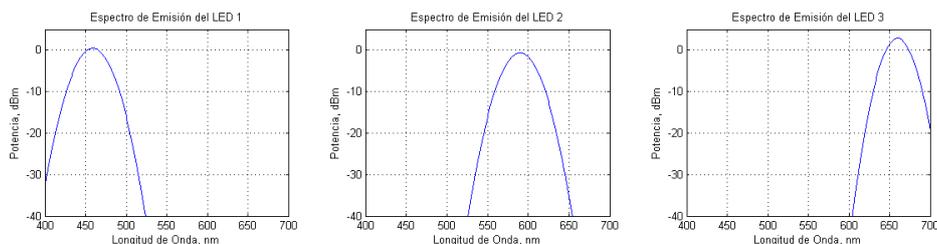
Fuentes	Características			
	Tipo de LED	Longitud de Onda	Corriente	Ancho Espectral
1	Nichia NEPE510JS	459 nm	20 mA	30 nm
2	Sander 5N3HTY-N5	590 nm	20 mA	30 nm
3	AVAGO SFH756	660 nm	50 mA	25 nm

Luego de la caracterización de cada fuente de información se obtienen las gráficas de Matlab, mismas que se presentan a continuación.



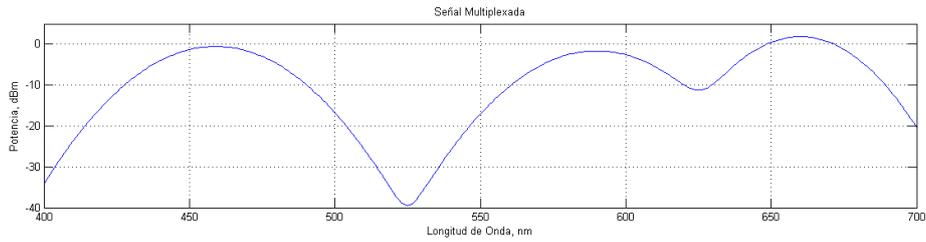
**Figura 8:** Representación del mensaje y caracterización según el LED para la fuente 1.

En la Figura 8 podemos observar las fuentes de información generadas aleatoriamente en su representación binaria así como en la caracterización del pulso producido por el LED descrito en la parte del modelamiento del LED.

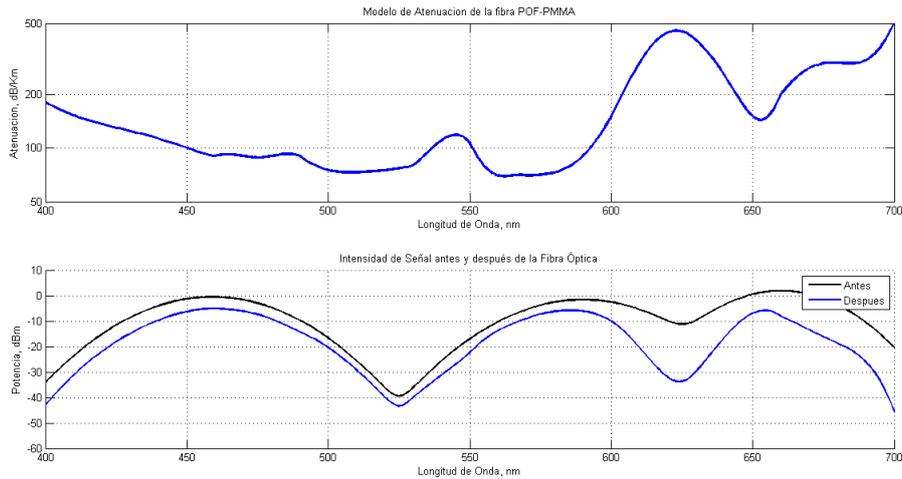


**Figura 9:** Visualización de los espectros real y normalizado de cada fuente LED.

La Figura 9 presenta los espectros de cada fuente LED previa a su multiplexación como se observa en la Figura 10 que muestra la multiplexación de los tres espectros.

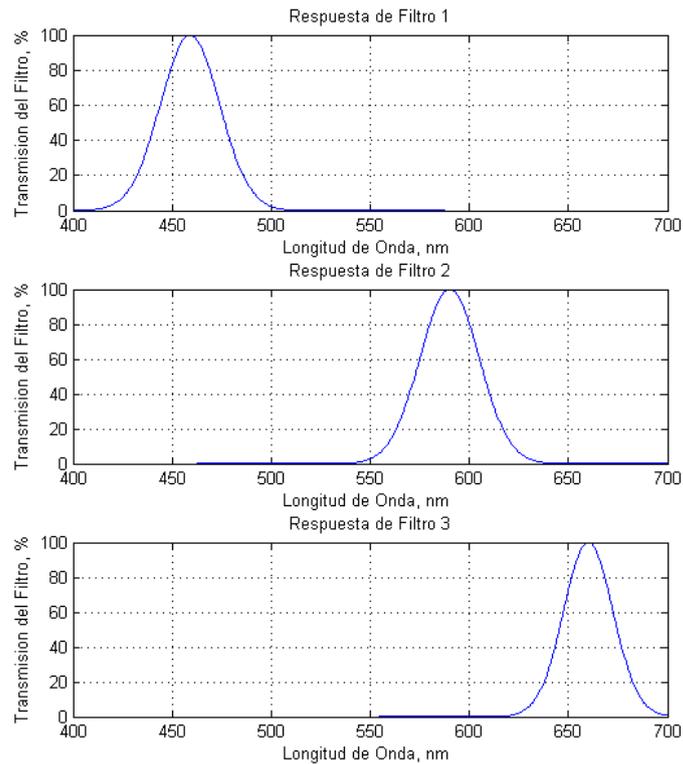


**Figura 10:** Multiplexación de los espectros.



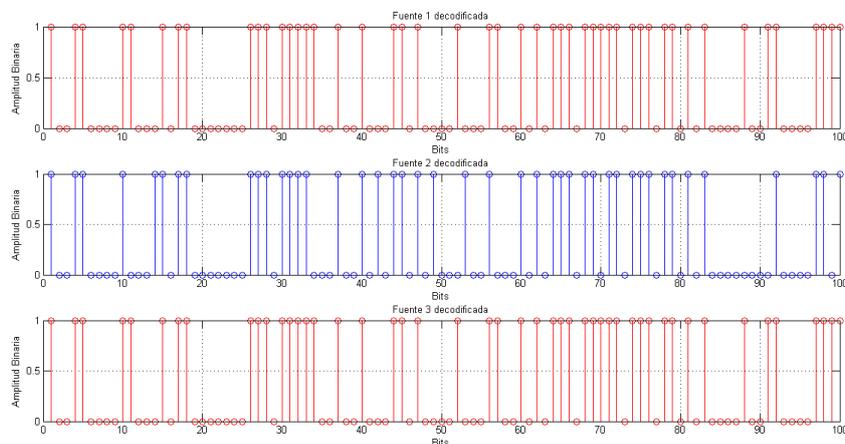
**Figura 11:** Visualización de la curva de atenuación y los espectros multiplexados antes y después de atravesar la fibra.

En la Figura 11 muestra en su parte superior la curva de atenuación de la fibra óptica plástica PMMA obtenida por medio de interpolación realizada en el software, además en la parte inferior se puede observar el espectro de los tres mensajes en conjunto antes y después de ser transmitidos por la fibra, con ello podemos corroborar la influencia de atenuación que presenta la fibra en las ventanas de operación antes descritas.



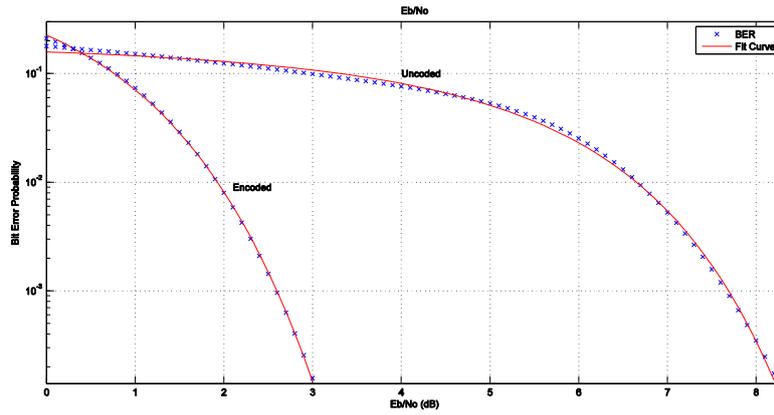
**Figura 12:** Separación de los espectros en la etapa de demodulación.

Como se describió en la etapa de demultiplexación para la separación de los espectros de cada longitud de onda empleada en la simulación se aplican filtros que eliminan los espectros no deseados y así obtener los espectros individuales de cada fuente LED como se observa en la Figura 12.



**Figura 13:** Señales de información finales luego de la recepción.

En el dominio del tiempo se demultiplexa, demodula y decodifica cada una de las señales que representan cada uno de los mensajes como se observa en la Figura 13 una vez recuperada cada señal estas son comparadas con las señales originales de la fuente y así calcular su error de bit (BER) observado en la Figura 14 en donde se grafica el cálculo del error de bit para los mismos mensajes a través del canal sin y con la codificación LDPC.



*Figura 14: BER del sistema óptico directo y codificado con LDPC para un canal óptico de 50 m.*

El gráfico de BER (Bit Error Rate) obtenido usando MATLAB se usa como un estándar para medir la optimización del sistema para los casos de transmisión de información en la cual se envía un mensaje sin codificación y presenta un mayor error que la información codificada, un mayor tamaño del mensaje incrementa la probabilidad del error al momento de la transmisión.

---

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

El uso de las tecnologías DWDM en los sistemas de transmisión ópticos permiten aprovechar adecuadamente la fibra óptica logrando un incremento en la eficiencia del sistema para ello se debe considerar un adecuado tiempo de espaciado en los bits de información y así evitar el solapamiento de la información luego de pasar a través de la fibra óptica y por efectos de la dispersión sufrir un ensanchamiento de los pulsos.

Según la investigación realizada se observa que la Fibra Óptica Plástica no fue creada para usarse en sistemas de comunicaciones ópticas, sin embargo debido a las características que posee y se describen en este trabajo, en la actualidad su uso en esta área se ha incrementado considerablemente como alternativa a las redes de acceso en entornos que sufren de interferencia eléctrica que influyen de manera perjudicial en los medios de transmisión guiados tradicionales elaborados a base de cobre, así como en el desarrollo de HANs (Home Area Networks) como complemento a la FTTH (Fiber to the Home).

Una desventaja de la POF-PMMA es su curva de atenuación ya que limita el uso de la misma para distancias largas, comercialmente se limita a 100m, siendo muy empleada en distancias cortas para redes de acceso, sin embargo, en la actualidad se están desarrollando nuevas combinaciones de polímeros para incrementar el ancho de banda presentado por las POF reduciendo la atenuación al atravesar la fibra.

La POF PMMA puede ser utilizada en enlaces ópticos que sustituyan los sistemas tradicionales de comunicación que empleen medios guiados como el cobre en entornos con alta interferencia eléctrica y que requieran velocidades de hasta 100Mbps y al utilizarse conjuntamente con la codificación LDPC en sistemas DWDM, se puede mejorar la transmisión alcanzando hasta una distancia de 150m y reduciendo el BER hasta 5dB de relación señal a ruido (SNR). Para enlaces que no superan los 100m de longitud se puede transmitir hasta 3 codewords multiplexados en la tecnología DWDM, los resultados validan por medio de esta simulación la aplicación de la combinación de los códigos LDPC con las tecnologías DWDM en un sistema real de transmisión que trabaje a mayores velocidades de transmisión.

Las simulaciones realizadas para redes ópticas permiten analizar parámetros que influyen en la implementación de estos sistemas ya que permiten analizar las respuestas según la teoría y prever un comportamiento aproximado a la realidad.

Como recomendación en el uso de este sistema es considerar, trabajar en las dos primeras ventanas ya que presentan una menor atenuación que la que se tiene en la tercera ventana.

Para trabajos futuros se podría emplear la caracterización de un LASER como fuente y así optimizar el uso de la fibra con una mayor densidad de canales a una mayor velocidad. También se podría realizar análisis en fibras plásticas a base de Deuterio POF-PF con características que permiten la transmisión a mayores velocidades que la POF-PMMA, logrando en la actualidad transmisiones a velocidades de 10Gbps a distancias de 100m con fuentes laser.

El desarrollo de esta propuesta podría ser aplicada al modelamiento de un sistema de fibra óptica de vidrio que trabaja con velocidades mayores que las empleadas en este sistema, modelando todo el sistema para un enlace de larga distancia en el que se podrían emplear amplificadores ópticos y así alcanzar mayores distancias de transmisión.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

---

- [1] "PlasticsEurope - Polymethyl methacrylate (PMMA) - PlasticsEurope." [Online]. Available: <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/types-of-plastics-11148/engineering-plastics/pmma.aspx>.
- [2] POF Handbook. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [3] R. Abbas, "Human perceived quality-of-service for multimedia applications," in 2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2012, pp. 1–6.
- [4] Mateo, J., Losada, A., & López, A. (2009, December). Application of the plastic optical fibre in domestic multimedia networks. In International Conference on Transparent Optic Networks-MW, Angers, France Dec.
- [5] Nespola, A., Abrate, S., Gaudino, R., Zerna, C., Offenbeck, B., & Weber, N. (2010). High-speed communications over polymer optical fibers for in-building cabling and home networking. *Photonics Journal, IEEE*, 2(3), 347-358.
- [6] I. Mollers, D. Jager, R. Gaudino, A. Nocivelli, H. Kragl, O. Ziemann, N. Weber, T. Koonen, C. Lezzi, A. Bluschke, and S. Randel, "Plastic optical fiber technology for reliable home networking: overview and results of the EU project pof-all," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 8, pp. 58–68, Aug. 2009.
- [7] "POF Application Center - Spectral attenuation of fibers according to VDE/VDI 5570." [Online]. Available: <http://www.pofac.info/en/homepage/pof-application-center/activities/measurement/spectral-attenuation-of-fibers-according-to-vdevdi-5570.html>.
- [8] (Signals and communication technology) Michele Franceschini, Gianluigi Ferrari, Riccardo Raheli (auth.)-LDPC Coded Modulations-Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2009).
- [9] A. Lhéritier, «Códigos de paridad de baja densidad (Low density parity check codes, LDPC)», 2004.
- [10] F. Mascarell Català, «Diseño e implementación en FPGA de un decodificador de códigos LDPC con secuenciación por capas», 2013.
- [11] «LDPC Coded Modulations: Analysis and Design», en LDPC Coded Modulations, Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 83-128.
- [12] I. B. Djordjevic, B. Vasic, y M. Neifeld, «LDPC-Coded OFDM for Optical Communication Systems with Direct Detection», *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 13, n.o 5, pp. 1446-1454, sep. 2007.
- [13] B. Vasic y I. B. Djordjevic, «Low-Density Parity-Check Codes for 40 Gb/s Transmission», en Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference (2006), paper OThD2, 2006, p. OThD2.
- [14] ANGÉLICA MARÍA CUJANO PUCHA, «ANÁLISIS, FUNCIONAMIENTO Y APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DWDM (MULTIPLEXACIÓN Densa POR DIVISIÓN EN LONGITUDES DE ONDA) PARA REDES DE FIBRA ÓPTICA», Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba-Ecuador.
- [15] A. Martín Minguez, «Contribución al estudio y optimización de dispositivos basados en holografía dinámica para su uso en redes ópticas pasivas multiplexadas en longitud de onda Wdm-Pon», phd, E.T.S.I. Telecomunicación (UPM), 2007.
- [16] DWDM corrige las limitaciones de la fibra, «DWDM corrige las limitaciones de la fibra», No 201, vol. 1.
- [17] Juan Pablo Pallo Noroña, «Estudio de las redes opticas de acceso DWDM y Factibilidad de ser implementadas en la zona central del Ecuador.», Pregrado, Universidad Tecnica de Ambato., Ambato, 2004.
- [18] Jorge Luis Caizaluisa Palma, «Estudio para la integracion de la tecnica de multiplexacion DWDM dentro de un enlace Quito-Guayaquil que utilice SDH como tecnica de transmision para una mediana empresa portadora.», Escuela Politecnica Nacional, Quito,Ecuador, 2009.
- [19] D. A. B. P. Iván Darío Téllez Silva y Edgar Amado Mateus, «REDES ÓPTICAS DWDM: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN», Junio 2010, vol. 1, pp. 70-80, jun. 2016.
- [20] Ramon Millan, «Redes y Tecnologia WDM», CONSULTORÍA ESTRATÉGICA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES. Disponible en: <http://www.ramonmillan.com/documentos/trabajos/PFCCapitulo2.pdf>.

- [21] A. Ocampo Dávila, J. J. M. Soledad, U. de Cuenca, D. de I. de la U. de Cuenca, y DIUC, «Simulación de un enlace óptico WDM (Wavelength Division Multiplexing) utilizando POFs (Polymer Optical Fiber) en el espectro de luz visible», Maskana. Revista Científica, 2014.
- [22] J. J. A. R. Edgar Yamid Ramirez Obendo, «UPS-CT003888.pdf», Pregrado, Universidad Politecnica Salesiana, Cuenca, 2014.
- [23] G.B. NOGUERAS, “Matematicas e Ingenieria con MATLAB y OCTAVE”, [En linea]. Available: <http://iimyo.forja.rediris.es/tutorial/algebra.html>.
- [24] Del Risco Sánchez, A. & Cruz Hurtado, J. (2013). Diseño de un Modulador/Demodulador OOK con portadora y tasa de transmisión configurable para el estándar de baja frecuencia de dispositivos RFID. *Ingeniería Electrónica, Automática Y Comunicaciones*, 34(3), 52-62. Retrieved from [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59282013000300006](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282013000300006)