

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA DPSK UTILIZANDO  
FIBRA ÓPTICA”**

**TESINA DE SEMINARIO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

Presentada por:

**JOHNNY DAVID VELASCO DELGADO**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**AÑO: 2012**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios ya que con su bendición cada día doy un paso más en el desarrollo de mis metas.

Agradezco también a mis padres por su apoyo incondicional desde el principio al final de esta carrera.

Finalmente agradezco al Ingeniero Germán Vargas, director de la tesina, ya que sus enseñanzas y conocimientos aportaron para que este trabajo se haga posible.

## DEDICATORIA

Todo mi trabajo y esfuerzo realizado va dedicado a Dios en primer lugar y también a mis padres ya que gracias a ellos hoy en día soy un gran ejemplo de persona, he logrado superarme y puedo cumplir esta nueva meta.

## **TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**Ing. Germán Vargas**

PROFESOR DEL SEMINARIO DE GRADUACIÓN

---

**Ing. Luis Vásquez**

PROFESOR DELEGADO POR LA UNIDAD ACADÉMICA

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta Tesina nos corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

.....  
Johnny Velasco Delgado

## RESUMEN

El sistema que voy a elaborar es un sistema de comunicaciones mediante fibra óptica, utilizando un mapeo DPSK (Differential Phase Shift Keying) es decir lo que variará en mi sistema es la fase del pulso a transmitir ya que la modulación que utilizaré es modulación por pulsos PAM.

En éste sistema observaremos tres partes fundamentales en un sistema de comunicaciones que son el transmisor, receptor y fibra óptica que es el medio de transmisión, así como sus componentes y funcionamiento.

También observaremos el desempeño de mi sistema DPSK cuando éste sufre ciertos cambios debido al ruido del sistema y también la variación de éste desempeño frente a cambios de ciertos parámetros de la fibra óptica como lo son la atenuación y dispersión con una longitud de fibra especificada. En la última sección observaremos también el desempeño de mi sistema frente a dos casos diferentes, en el primer caso variando un parámetro de la fibra óptica como la longitud de la fibra y en el segundo caso variando la tasa de bits a transmitir, manteniendo los otros parámetros constantes.

## ÍNDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>II</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>III</b>
<b>TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN</b>	<b>IV</b>
<b>DECLARACIÓN EXPRESA</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>VI</b>
<b>INDICE GENERAL</b>	<b>VII</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b>	<b>XI</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b>	<b>XIV</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XV</b>

### CAPÍTULO 1

#### Sistema de Modulación Digital

1.1. Modulación por Onda Continua	1
1.2. Modulación por pulsos	2
1.2.1 Modulación PAM	3
1.3. Teorema del Muestreo	4
1.4. Modulación DPSK	5
1.4.1 Transmisor DPSK	7
1.4.2 Receptor DPSK	9

1.4.3 Probabilidad de Error-----	12
1.4.4 Eficiencia del Ancho de Banda-----	13

## **CAPÍTULO 2**

### Sistema de Comunicación Óptica

2.1 Componentes de un enlace óptico-----	15
2.1.1 Fuentes Ópticas -----	15
2.1.1.1 LED (Diodo emisor de luz) -----	16
2.1.1.2 Diodos Láser -----	19
2.1.1.3 Especificaciones Generales -----	22
2.1.1.4 Semejanzas y diferencias entre LED y LÁSER -----	23
2.1.2 FIBRA ÓPTICA-----	24
2.1.2.1 Tipos de Fibra óptica -----	25
2.1.2.1.1 Fibras Monomodo -----	26
2.1.2.1.2 Fibras Multimodo -----	26
2.1.2.2 Parámetros que afectan a la fibra -----	27
2.1.2.2.1 Atenuación -----	27
2.1.2.2.2 Dispersión -----	27
2.1.2.2.3 Pérdidas por conectores y empalmes -----	27
2.1.3 FOTODETECTOR -----	30

2.1.3.1 Tipos de Fotodetectores .....	33
---------------------------------------	----

## **CAPÍTULO 3**

### **Implementación**

3.1 SIMULACIÓN DEL TRANSMISOR .....	37
3.1.1 Generador de Bits .....	38
3.1.2 Modulador DPSK .....	40
3.1.3 Fuente Óptica "LED" .....	43
3.2 SIMULACIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA .....	47
3.3 SIMULACIÓN DEL RECEPTOR .....	49
3.3.1 Fotodetector .....	50
3.3.2 Demodulador DPSK .....	55

## **CAPÍTULO 4**

### **Análisis y Resultados**

4.1. Desempeño teórico del sistema DPSK.....	58
4.2. Desempeño del sistema DPSK en simulación.....	59
4.3. Desempeño del sistema con ruido térmico.....	62
4.4. Desempeño del sistema con la fibra óptica.....	64
4.5. Caso 1: Variando la longitud de la Fibra .....	69
4.6. Caso 2: Variación de la tasa de Bits .....	72

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Conclusiones-----	78
Recomendaciones-----	81

**ANEXOS**

Anexo A-----	82
Anexo B-----	83
Anexo C-----	85
Anexo D-----	86

<b>BIBLIOGRAFÍA.</b> -----	87
----------------------------	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Señal modulada con PAM-----	4
Figura 1.2 Señal muestreada-----	5
Figura 1.3 Señal modulada en DPSK -----	7
Figura 1.4 Modulador DPSK-----	8
Figura 1.5 Mapeo Diferencial DPSK-----	9
Figura 1.6 Receptor DPSK -----	10
Figura 1.7 Demodulador DPSK-----	11
Figura 1.8 Proceso de codificación y decodificación -----	11
Figura 2.1 Espectro de un LED-----	18
Figura 2.2 Curva de emisión de un LED -----	19
Figura 2.3 Curva de emisión de un láser -----	20
Figura 2.4 Componentes de la Fibra Óptica -----	25
Figura 2.5 Diagrama de energía del fotodiodo PIN -----	34
Figura 2.6 Diagrama de energía del fotodiodo APD -----	35
Figura 3.1 Componentes de un sistema de comunicaciones óptico-----	37
Figura 3.2 Componentes del transmisor DPSK-----	38
Figura.3.3 Sistema de Generación de datos binarios-----	39
Figura. 3.4 Simulación de generación de bits con reloj de 1Mbps-----	40
Figura. 3.5 Mapeo DPSK-----	40
Figura. 3.6 Proceso de modulación DPSK-----	42
Figura. 3.7 Componentes del LED-----	43

Figura. 3.8 Señal máxima que puede pasar por el LED-----	46
Figura. 3.9 Potencia en watts a la salida del LED-----	46
Figura. 3.10 Estructura de la Fibra Óptica Monomodo -----	48
Figura. 3.11 Estructura del Receptor-----	49
Figura. 3.12 Componentes del Fotodetector-----	50
Figura. 3.13 Parámetros de Gaussian Noise Generator-----	52
Figura. 3.14 Parámetros del Filtro del Receptor-----	53
Figura. 3.15 Proceso en el fotodetector-----	54
Figura. 3.16 Componentes del Demodulador DPSK-----	55
Figura. 3.17 Proceso del Demodulador DPSK-----	56
Figura 4.1 Desempeño teórico BER vs Eb/No de un sistema DPSK.-----	58
Figura 4.2 Simulación del Desempeño de un sistema DPSK-----	59
Figura 4.3 Parámetros de la función BERTOOL-----	60
Figura 4.4 Desempeño teórico comparado con la simulación-----	61
Figura 4.5 Diagrama de ojo del pulso con SNR de 12.9dB-----	65
Figura 4.6 Curva de desempeño del sistema con fibra óptica-----	67
Figura 4.7 Curva de desempeño con longitud de fibra de 75Km-----	71
Figura 4.8 Diagrama de ojo del sistema con long. de 75Km y SNR de -5.2 dB-----	72
-----	-----
Figura 4.9 Representación de BER de -1.9 en la curva de desempeño-----	73

Figura 4.10 Diagrama de ojo del pulso en donde la tasa de bits es de 10MHz y SNR de -5dB-----	74
Figura 4.11 Desempeño del sistema con tasa de bits de 10Mbps y at.-----	75
Figura 4.12 Desempeño del sistema con tasa de bits de 10Mbps, atenuación y dispersión -----	77
Figura 4.13 Diagrama de ojo del pulso con SNR de 3db y sin dispersión-----	78
Figura 4.14 Diagrama de ojo del pulso con SNR de 3db y con dispersión-----	78

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Resultados de BER utilizando sólo atenuación-----	67
Tabla 4.2 Resultados de BER añadiendo dispersión-----	68
Tabla 4.3 Resultados de BER con atenuación y longitud de 20km-----	70
Tabla 4.4 Resultados de BER con atenuación, dispersión y long. 20km-----	70
Tabla 4.5 Resultados de BER con atenuación y tasa de bits de 10Mbps-----	75
Tabla 4.6 BER con atenuación, dispersión y tasa de bits de 10Mbps-----	77

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día la información digital puede ser transmitida de dos maneras, cuando la señal es transmitida directamente al canal de comunicaciones sin ningún tipo de modulaciones, o cambios en la señal a transmitir, se dice que se realiza transmisión en banda base y cuando sí se realiza una modulación a la señal antes de ser transmitida se denomina transmisión en banda ancha.

A su vez existen dos tipos de modulaciones: Modulaciones por onda continua en donde se usa una señal portadora analógica y Modulaciones por pulsos, las cuales pueden ser analógicas o digitales. [1] El tipo de modulación a usar en éste proyecto es modulación analógica por pulsos.

Como sabemos la comunicación hoy en día es full dúplex, es decir al mismo tiempo que se envía información se puede recibir información. Uno de los medios de comunicación que nos ayudaría a cumplir con esto es la fibra óptica la cual también tiene la ventaja de ser inmune a las interferencias electromagnéticas ya que lo que viaja a través de ella es la información en forma de luz.

Es por ello que se usa distintos tipos de modulación dependiendo del canal o del medio de transmisión. En mi proyecto usaré una modulación analógica de pulsos para enviar la información de manera diferencial variando la fase de la información, en otras palabras se usará un mapeo DPSK (Differential Phase Shift Keying) pero usando una modulación por pulsos.

# **CAPÍTULO 1**

## **SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL**

Como ya mencionamos, en la actualidad se puede enviar información en banda base, es decir sin modulación alguna o también en banda ancha, cuando sí utilizamos algún tipo de modulación. La diferencia de estos dos tipos de transmisión es que en la transmisión en banda ancha se puede transmitir la señal a largas distancias sin que ésta sea distorsionada o afectada por los ruidos, todo esto debido y gracias a las modulaciones digitales. [2]

Existen dos tipos de modulaciones: Modulaciones por onda continua y Modulaciones por pulsos, las cuales pueden ser analógicas o digitales.

### **1.1 MODULACIÓN POR ONDA CONTINUA**

Este tipo de modulaciones se caracterizan en variar alguno de los parámetros de la señal sinusoidal portadora que es la encargada de transportar la información, dependiendo de la señal moduladora es decir de

la información. Los parámetros que normalmente varían en la señal portadora en este tipo de modulaciones son la amplitud, la fase y la frecuencia.

Las modulaciones por onda continua más conocidas son la modulación ASK(Amplitude Shift Keying), FSK(Frequency Shift Keying), PSK(Phase Shift Keying) y DPSK(Differential Phase Shift Keying). **[1]**

## **1.2 MODULACIÓN POR PULSOS**

En éste tipo de modulaciones lo que variará son los parámetros de un tren de pulsos, ya sea la amplitud, la duración o posición de los pulsos. Existen dos tipos de modulaciones por pulsos: modulaciones analógicas por pulsos y modulaciones digitales por pulsos.

Modulación Analógica por pulsos: Este tipo de modulación consiste en transmitir una señal analógica con intervalos discretos de tiempo, además ésta señal no sólo es de dos niveles sino que puede tomar diversos valores reales. Dependiendo de la variación del pulso pueden ser PAM

(Modulaciones por amplitud del pulso), PWM (Modulación por ancho del pulso) y PPM (Modulación por posición del pulso).

Modulación Digital por pulsos: En ésta modulación la señal a transmitir se discretiza tanto en tiempo como en amplitud, permitiendo la transmisión de la señal digital como una secuencia de pulsos codificados. Ambas modulaciones usan muestras de la señal original a transmitir. **[3]**

### **1.2.1 Modulación PAM**

En la modulación por amplitud de pulsos se varía la amplitud de los pulsos en función de las muestras de la señal continua de información.

Para generar este tipo de señales se toman en cuenta dos procesos: Muestrear la señal  $m(t)$  cada  $T_s$  segundos siguiendo la ley del muestreo y Mantener la duración de cada pulso con un tiempo determinado. **[4]** A continuación en la Figura 1.1 se muestra un ejemplo de una señal modulada en amplitud.

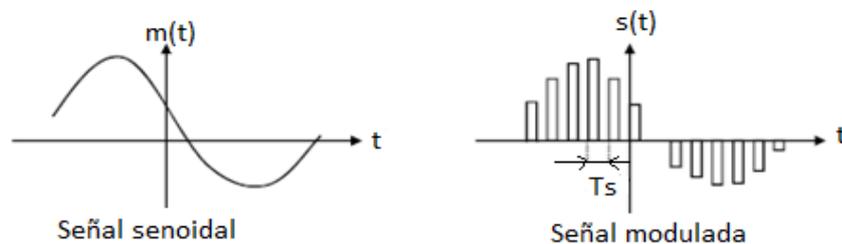


Figura 1.1 Señal modulada con PAM [4]

### 1.3 TEOREMA DE MUESTREO

Es una operación fundamental para el procesamiento de señales y comunicaciones digitales. El teorema del muestreo es muy importante para la digitalización de señales ya que al muestrear una señal podemos representar una señal continua en el tiempo en una secuencia discreta de muestras que están espaciadas uniformemente en el tiempo. Pero para representar adecuadamente la señal analógica debemos escoger muy bien el tiempo de muestreo.

Consideramos una señal de energía finita  $g(t)$  y supongamos que muestreamos esta señal a una tasa uniforme de  $T_s$  segundos, con esto obtenemos una secuencia infinita de muestras separadas  $T_s$  segundos:  $\{g[nT_s]\}$ , siendo  $n$  un valor entero cualquiera.

Podemos denotar la señal que obtenemos al ponderar los elementos de una secuencia periódica de impulsos separados  $T_s$  segundos mediante una secuencia de números  $\{g[nT_s]\}$  como:

$$g_d(t) = \sum g(nT_s) * d(t - T_s) \quad (1.1)$$

siendo  $g_d(t)$  la señal muestreada idealmente y  $d(t-T_s)$  una secuencia de funciones delta en  $t=T_s$  segundos [1]. A continuación en la Fig. 1.2 observamos una señal analógica muestreada.

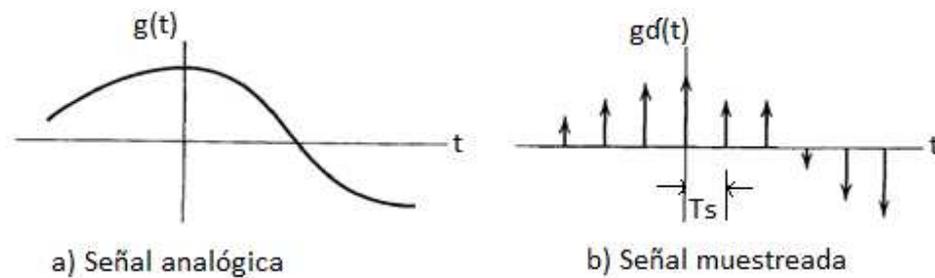


Figura 1.2 a) Señal analógica a muestrear b) Señal muestreada. [1]

#### 1.4 MODULACION DPSK

Este tipo de modulación también conocido como Modulación por desplazamiento diferencial de fase (Differential phase shift keying) es otro

tipo de modulación digital en donde no es necesario recuperar la portadora de fase coherente ya que es una modulación tipo no coherente.

En ésta modulación la fase se codifica no en relación a su valor absoluto, sino por codificación diferencial, es decir en relación al cambio o diferencia de fase entre intervalos sucesivos por ejemplo si a la entrada del modulador tenemos como bit un 1 lógico obtendremos a la salida del modulador una señal con desfase de  $0^\circ$ ; caso contrario si tenemos un bit de entrada 0 a la salida obtendremos un desfase de  $180^\circ$ . En la figura 1.3 observamos la modulación DPSK y su diferencia con la modulación PSK la cual varía su fase  $180^\circ$  cada vez que hay un cambio de bit. **[2]**

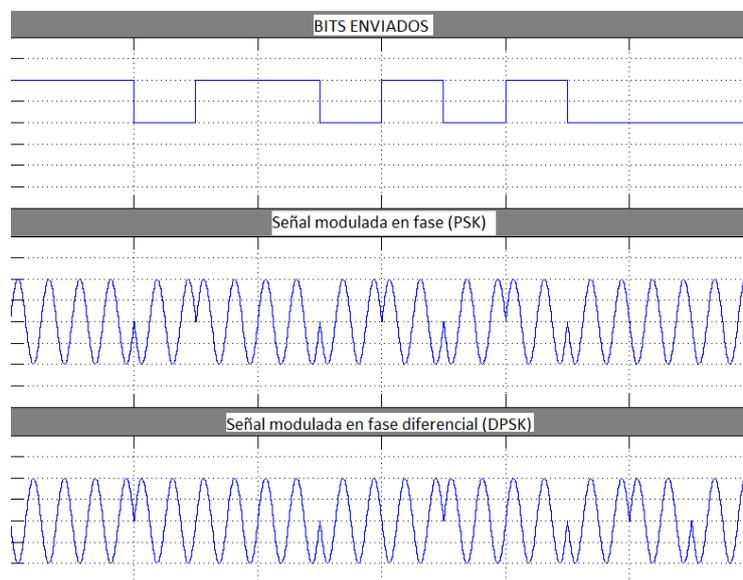


Figura 1.3 Señal modulada en DPSK [3]

#### 1.4.1 Transmisor DPSK

Un modulador DPSK normal consta de un codificador conformado por una puerta lógica XNOR conjuntamente con un modulador PSK. En esta modulación la secuencia binaria a la entrada del transmisor es primeramente codificada por la puerta lógica XNOR donde se realiza esta operación entre el bit actual y el bit transmitido con anterioridad. Recordemos que con la operación XNOR obtendremos a la salida un 1 si las señales comparadas son iguales y un 0 si las señales comparadas son diferentes. Luego de que la información

pasa por la puerta lógica XNOR la señal pasará por el modulador BPSK que produce una señal  $+\text{Cos}(wt)$  cuando recibe un 1 lógico y si recibe un 0 lógico el modulador produce una señal  $-\text{Cos}(wt)$  [2]. En la Figura 1.4 mostramos un modulador DPSK normal.

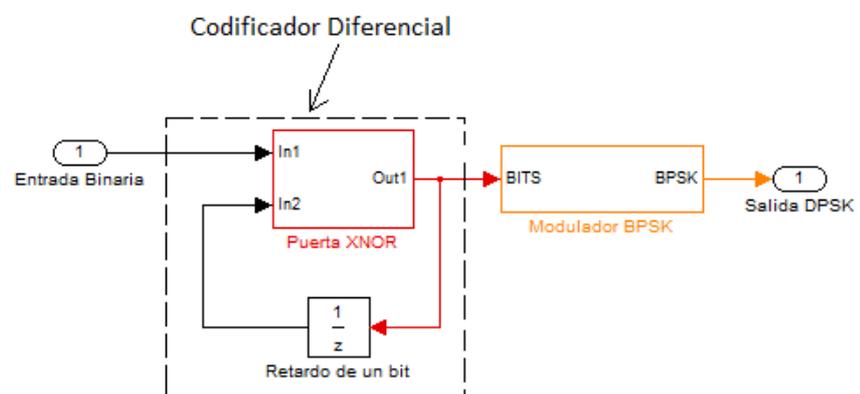


Figura 1.4 Modulador DPSK normal [3]

Pero recordemos que la modulación que usaremos en ésta simulación es modulación por pulsos así que no necesitaremos el modulador PSK que es el que usa una señal portadora.

En otras palabras sólo usaremos un mapeo diferencial es decir codificaremos el pulso que tenemos como señal de entrada de una manera diferencial utilizando el codificador o la puerta lógica XNOR

como mapeo diferencial para luego realizar la transmisión por pulsos, éste mapeo diferencial se lo muestra en la figura 1.5.

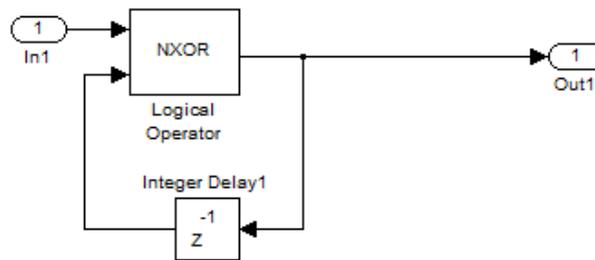


Figura 1.5 Mapeo Diferencial DPSK

#### 1.4.2 Receptor DPSK

Un receptor normal DPSK utiliza una técnica denominada detección por retardo, ésta técnica no necesita recuperar la fase de la portadora pero sí necesita de temporización. Es un circuito sencillo ya que sólo necesita un multiplicador analógico, un latch de retardo de un bit, un filtro pasa bajos y por último el comparador que es el que toma las decisiones. [5] A continuación en la Figura 1.6 mostramos un receptor normal DPSK.

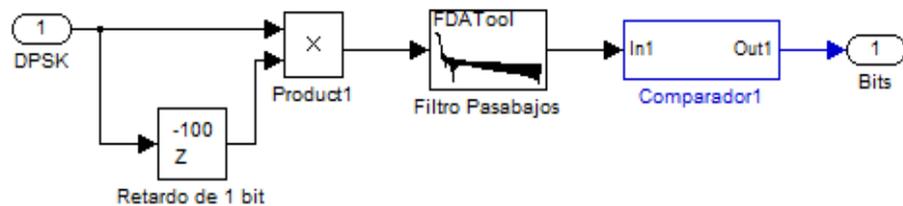


Figura 1.6 Receptor DPSK

El proceso de demodulación que usaremos en esta simulación cuyo diagrama es mostrado en la fig. 1.7 consiste de la siguiente manera: La señal en el receptor es comparada en el receptor con un nivel de umbral igual a 0. Este comparador convertirá la señal en bits 1 o 0 lógicos dependiendo si la señal es mayor o menor al nivel de umbral. Si la señal está por encima del umbral el comparador que es un switch proporcionará un 1 lógico pero si la señal está por debajo del nivel de umbral el switch proporcionará un 0 lógico. Luego aplicaremos el proceso inverso que en el mapeo diferencial DPSK, es decir los bits lógicos se compararán con la misma señal retardada por un bit mediante una puerta lógica XNOR para finalmente recuperar los bits enviados en el transmisor.

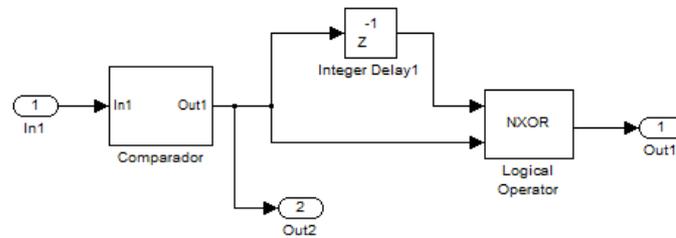


Figura 1.7 Demodulador DPSK

En la figura 1.8 se muestra el proceso de codificación y decodificación del transmisor y receptor con éste tipo de modulación.

TRANSMISOR	Secuencia binaria de Entrada	1 1 0 1 0 1 1 0 0 1
	Mensaje Codificado Diferencial	
	Fase Transmitida $\Phi_n$	$0^\circ$ $0^\circ$ $0^\circ$ $\pi$ $\pi$ $0^\circ$ $0^\circ$ $0^\circ$ $\pi$ $0^\circ$ $0^\circ$
RECEPTOR	Fase recibida y retardada $\Phi_{n-1}$	$0^\circ$ $0^\circ$ $0^\circ$ $0^\circ$ $\pi$ $\pi$ $0^\circ$ $0^\circ$ $0^\circ$ $\pi$ $0^\circ$
	$\Delta \Phi =  \Phi_n - \Phi_{n-1} $	$0^\circ$ $0^\circ$ $0^\circ$ $\pi$ $0^\circ$ $\pi$ $0^\circ$ $0^\circ$ $\pi$ $\pi$ $0^\circ$
	Secuencia binaria de salida	1 1 1 0 1 0 1 1 0 0 1

○ Valores arbitrarios

Figura 1.8 Proceso de codificación y decodificación [3]

### 1.4.3 PROBABILIDAD DE ERROR

Un método para comparar las técnicas de modulación digitales es la inmunidad que tienen al ruido, para esto vamos a considerar un ruido gaussiano blanco aditivo AWGN.

Sabemos que la relación señal ruido SNR no es otra cosa que  $S/N$  donde  $S$  es nuestra señal y  $N$  el ruido de nuestra señal.

Además esta relación en un determinado punto cumple también con otra igualdad:

$$\text{SNR} = S/N = 2E_b/n_0 \quad (1.2)$$

En donde  $E_b$  es la energía del bit en un punto determinado donde se aplica a la señal un ruido gaussiano blanco aditivo  $n_0$ . **[6]**

Para la modulación DPSK la probabilidad de error se muestra a continuación:

$$P_e = \frac{1}{2} \exp(-E_b/n_0) = \frac{1}{2} \exp(-\text{SNR}/2). \quad (1.3)$$

Comparando ésta modulación con la modulación PSK podemos concluir que una desventaja es que para obtener la misma probabilidad de error entre ambas modulaciones, el SNR en la

modulación DPSK necesita de 1 a 3 db más que la PSK, además el receptor DPSK es menos inmune al ruido.[5]

#### 1.4.4 EFICIENCIA DEL ANCHO DE BANDA

Consideremos la eficiencia del ancho de banda en términos de bits por segundo por hertz (bps/Hz) para un esquema de modulación digital cualquiera.

Para un sistema de modulación digital M-ario la velocidad de bit ( $R_b$ ) está relacionado y dado en términos de la velocidad de un símbolo ( $R_s$ ):

$$R_b = (\log_2 M)R_s \quad (1.4)$$

Para nuestro sistema no coherente DPSK, el espectro de la señal modulada tiene un ancho de banda total de  $2 R_s$  Hz, pero en términos de velocidad de bit el ancho de banda es el siguiente [6]:

$$B_{\text{DPSK}} = 2R_b / (\log_2 M)\text{Hz} \quad (1.5)$$

## **CAPÍTULO 2**

### **SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA**

Los sistemas de comunicaciones ópticas permiten transmitir información a altas velocidades de manera eficiente. La información en un sistema de comunicaciones ópticas se la envía mediante impulsos o mediante señales moduladas de luz. Los principales beneficios de los sistemas ópticos provienen de la fibra óptica y sus propiedades. La fibra óptica es el medio de transmisión por el cual se transmite la información, para lo cual en un principio se codifica la señal electrónica y se la convierte a señal óptica, ésta ingresa por dicha fibra óptica, medio en el cual se transmite para finalmente ser detectada y decodificada en el receptor.

## 2.1 COMPONENTES DE UN ENLACE ÓPTICO

Un sistema de comunicación óptica consta de tres estructuras fundamentales: el emisor, el medio de transmisión y el receptor.

El emisor en un enlace de comunicaciones ópticas es la fuente óptica, el medio de transmisión es la fibra óptica y el receptor son los fotodetectores ópticos.[8]

### 2.1.1 FUENTES ÓPTICAS

Como sabemos en éste sistema de comunicación óptica necesitamos las fuentes generadoras de luz, éstas son las llamadas fuentes ópticas que se encuentran en el transmisor y son las encargadas de convertir las señales eléctricas en señales ópticas es decir luz. [8]

Los requisitos principales para una fuente óptica son:

- Relación lineal entre potencia emitida y corriente inyectada.
- Configuración óptima para el acoplamiento de la luz en la fibra óptica.

- Emitir luz a longitudes de onda idóneas para la fibra.
- Nivel suficiente de potencia.
- Características estables con la temperatura.
- Baja anchura espectral.

Existen dos tipos de fuentes ópticas: El LED (Light Emitting Diode) y el diodo Láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). **[9]**

#### **2.1.1.1 LED (Diodo emisor de luz):**

El LED es un diodo semiconductor que emite luz. Su proceso de generación de luz se basa en la recombinación de electrones y huecos en una unión p-n que tiene el diodo, lo que provoca emisión de fotones, proceso conocido como electroluminiscencia. **[10]**

La longitud de onda de la luz emitida depende de la diferencia de energía  $E$  entre los niveles energéticos, esto se representa por la siguiente ecuación: **[11]**

$$\lambda = \frac{hc}{E} \quad (2.1)$$

Donde h es la constante de Plank y c la velocidad de la luz.

En un LED, los fotones son generados espontáneamente. Por tanto, no tienen la dirección definida; esto produce que muchos fotones no se inyecten en la fibra. Además, la luz generada es no coherente, así que sólo es posible la modulación directa o modulación de amplitud. La luz tanto del LED como del láser es emitida en un rango de longitudes de onda centradas alrededor de una longitud de onda central conocido como ancho espectral **[10]**, en la figura 2.1 se muestra el ancho espectral de un LED.

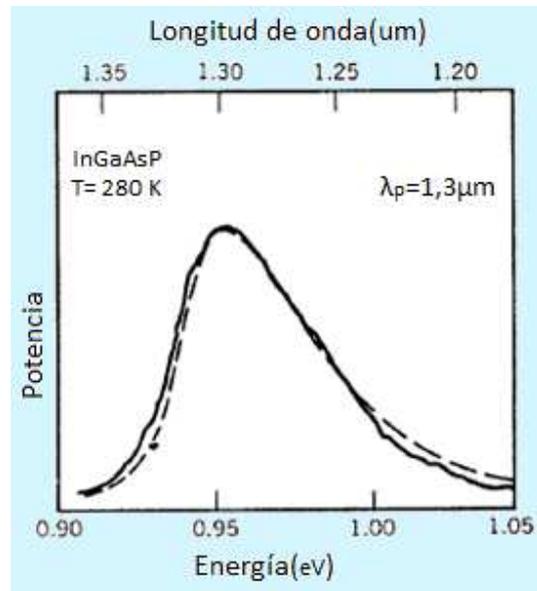


Fig.2.1 Espectro de un LED [10]

La luz del diodo puede filtrarse en la fibra pero esto se hace con la disminución de la potencia disponible de la fuente de luz. [9] En la figura 2.2 se muestra la curva característica de emisión de un LED.

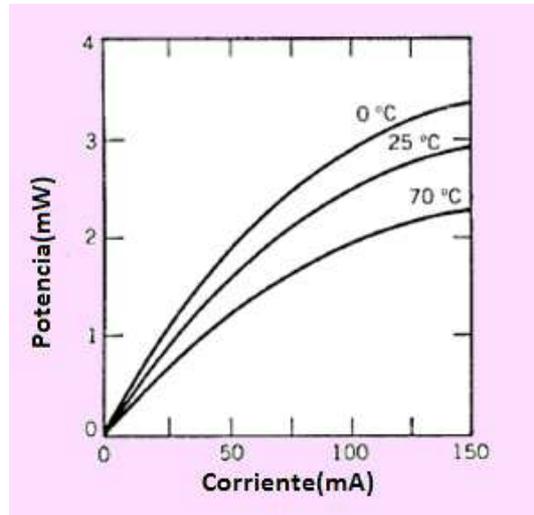


Fig. 2.2 Curva de emisión de un LED [10]

### 2.1.1.2 Diodos Láser

Estos diodos son semiconductores en los cuales la luz es generada por una corriente eléctrica.

El proceso de generación de luz es similar al del LED. Las diferencias se encuentran en el volumen de generación de luz ya que en el láser la generación de luz es en menor volumen y en una alta concentración de portadores inyectados. Se

consigue así una ganancia óptica alta y un espectro muy estrecho que da lugar a luz coherente. [8]

A partir de una cierta densidad de corriente en la zona activa del láser, la ganancia óptica excede a las pérdidas y la emisión de luz pasa de ser espontánea a estimulada. La corriente a la que se produce éste cambio se denomina corriente umbral. [10] En la figura 2.3 se muestra la curva característica de emisión de un láser.

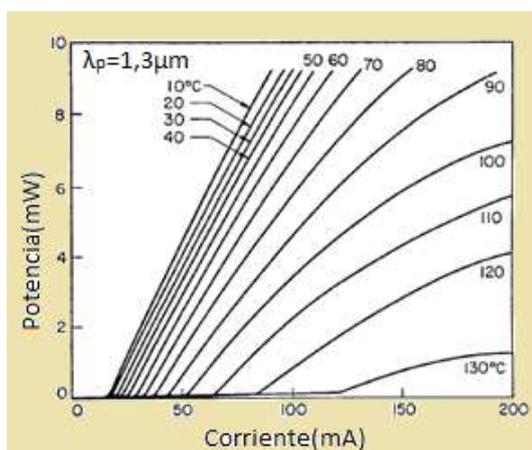


Fig. 2.3 Curva de emisión de un láser [10]

Los dos tipos de diodos Láser más comunes son:

- Fabry-Perot Láser: Es el diodo láser más común usado en aplicaciones de diseño de OTDR. Tiene un costo efectivo y la habilidad de entregar un alto nivel de salida de potencia. Es usado en aplicaciones monomodos para OTDR en 1310nm, 1550nm y 1625nm. Estos láseres emiten luz en un número de longitudes discretas, entregando un ancho espectral entre 5nm y 8nm. **[12]**
- Distributed Feedback Láser: Este láser es más preciso que el Fabry Perot pero su potencia de salida entregada es mucho más baja. Este tipo de láseres, seleccionan únicamente una longitud de onda principal en el espectro del láser Fabry-Perot, produciendo un ancho espectral de <0.1nm lo cual es angosto. **[12]**

### 2.1.1.3 ESPECIFICACIONES GENERALES

Tanto los LED como los láser son seleccionados de acuerdo a una longitud de onda central (o pico), ancho espectral de longitud de onda, y la potencia de salida. **[13]**

Longitud de onda central: Es la longitud de onda en la cual la fuente emite la máxima potencia de luz. Este debe reflejar las especificaciones de la longitud de onda de prueba tales como 850nm, 1310nm, 1550nm, 1625nm.

Ancho Espectral: La luz es emitida en un rango de longitudes de onda centradas alrededor de la longitud de onda central. Este rango es llamado ancho espectral de la fuente.

Potencia de Salida: Para mejores resultados, la mayor cantidad de la potencia de la fuente es acoplada dentro de la fibra. El objetivo es que la potencia de salida de la fuente

debe ser suficientemente fuerte para proveer suficiente potencia para el detector en el lado del receptor.

#### **2.1.1.4 Semejanzas y diferencias entre LEDs y LASERs**

A continuación presentamos algunas diferencias y semejanzas de las fuentes ópticas: **[14]**

- Los materiales con los que están conformados son similares.
- En general los LEDs tienen menos potencia que los láseres.
- Los LEDs son menos costosos y se usan para aplicaciones de 850nm, mientras que los láseres se usan en longitudes de 1300nm.
- Los LEDs emiten luz no coherente.

### 2.1.2 FIBRA ÓPTICA

Este medio de transmisión se ha implementado para llevar a cabo algunos requerimientos como: tener un enlace de transmisión de buena calidad, gran capacidad para transmitir información y además abarcar grandes distancias de cobertura, la cual trabaja con un gran ancho de banda y tiene pocas pérdidas de datos. La fibra óptica es un hilo de vidrio o plástico muy fino y flexible, por el cual viaja la información en forma de pulsos de luz. La fibra óptica está compuesta por dos partes esenciales que son el núcleo y el cladding además de la envoltura o forro que separa los hilos de fibras. **[15]**

El núcleo o core: Es la parte interna de la fibra por donde viaja la información que se propaga a través de ondas ópticas.

El revestimiento o cladding: Es la parte externa que cubre al núcleo y que está compuesta por el mismo material que éste.

El forro o buffer: Es una envoltura que aísla las fibras y evita que se produzcan interferencias entre fibras adyacentes, y además protege al núcleo.

En la figura 2.4 se muestra la estructura de la fibra óptica.

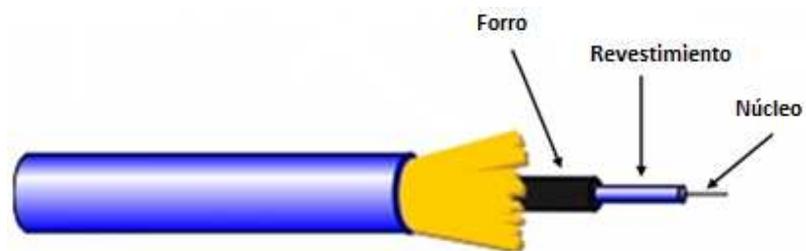


Fig. 2.4 – Componentes de la Fibra Óptica [12]

### 2.1.2.1 TIPOS DE FIBRA OPTICA

Existen 2 tipos de fibra óptica debido a los modos en que la luz viaja en el interior de ellas: fibras monomodo y fibras multimodo.

#### **2.1.2.1.1 FIBRAS MONOMODO**

Las fibras monomodo son aquellas en las que la luz se propaga en un solo camino o modo gracias a la disminución del diámetro del núcleo de la fibra, su transmisión es paralela al eje de la fibra. Las fibras monomodo tienen núcleos muy delgados, aproximadamente 9 micrones de diámetro, además éste tipo de fibra permite alcanzar hasta cientos kilómetros de distancia de cobertura, mediante un láser de alta intensidad y transmitir elevadas tasas de información. [15]

#### **2.1.2.1.2 FIBRAS MULTIMODO**

La fibra multimodo son aquellas en las que la luz viaja a través del núcleo en distintos modos o caminos debido a que el diámetro del núcleo es un poco más grande en comparación con la fibra monomodo. Las fibras multimodo se usan

comúnmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 2 km. **[13]**

### **2.1.2.2 PARÁMETROS QUE AFECTAN A LA FIBRA**

Los parámetros fundamentales que afectan a la fibra óptica son la atenuación y la dispersión.

#### **2.1.2.2.1 Atenuación**

La atenuación es la pérdida de potencia luminosa a medida que la luz viaja a lo largo de la fibra óptica, ésta pérdida de potencia es producida por fenómenos como absorción de luz, scattering, dispersión y otros.

Las pérdidas por absorción ocurren cuando las impurezas en la fibra absorben la luz, y esta se convierte en energía calorífica. **[15]**

### 2.1.2.2.2 Dispersión

Es producida por los ensanchamientos del pulso de luz provocando una distorsión en la información.

Existen algunas clases de dispersión entre las que tenemos la dispersión cromática y dispersión por modo de polarización PMD para las fibras monomodo y también la dispersión modal para las fibras multimodo. **[16]**

Dispersión cromática: Ocurre cuando los rayos de luz emitidos por la fuente que se propagan sobre en el interior de la fibra, no llegan al final de ésta en el mismo tiempo.

Dispersión por Modo de Polarización, PMD, es un efecto de dispersión óptico, que limita la calidad de la transmisión en los enlaces de fibra óptica y depende

de las condiciones físicas del cable que pueden ser ambientales y mecánicas.

### **2.1.2.2.3 Pérdidas por conectores y empalmes**

También existen otros parámetros que debemos tomar en cuenta para el diseño de un enlace de comunicaciones, como las pérdidas producidas por los conectores, por los empalmes y por los splitters.

Las pérdidas por conectores se producen en el comienzo y terminación de nuestro enlace, en donde los conectores unen o conectan la fibra óptica con los componentes activos en el transmisor y receptor.

También encontraremos pérdidas producidas por los empalmes que no son otra cosa que las fusiones que

se realizan en la fibra óptica para conectar grandes longitudes de fibra. Las pérdidas por empalmes se dan cuando existen uniones de fibra, se deben a problemas de alineamiento. Se clasifican en empalmes mecánicos y empalmes por fusión siendo éste el más utilizado ya que produce menos atenuaciones. **[15]**

Otro componente con el que obtendremos pérdidas es el splitter el cual es un elemento pasivo que sirve para dividir la señal óptica, que entra por un extremo, en varias señales de salida. **[14]**

### **2.1.3 FOTODETECTOR**

El fotodetector es un transductor de luz que proporciona una señal eléctrica como respuesta a la incidencia de una señal óptica en la región sensorial, en otras palabras es la parte receptora de nuestro sistema de comunicaciones óptica encargada de convertir la señal óptica en una señal eléctrica. **[13]**

Los parámetros para caracterizar el comportamiento de los detectores son: Responsividad, Tiempo de respuesta, Eficiencia cuántica, Características del ruido. **[11]**

- Responsividad: Es un parámetro que corresponde a la corriente que circula por el detector en función de la potencia óptica incidente. Su medida está representada en  $A/W$ . La responsividad en los fotodiodos aumenta debido a la longitud de onda y aumenta hasta llegar a la longitud de onda de corte o umbral.
- Tiempo de respuesta: Es un parámetro definido por la rapidez en la respuesta a las variaciones del flujo de fotones. Este dependerá del material, de las características del componente y del circuito electrónico al que se encuentre acoplado el fotodetector, además debemos recalcar que es un parámetros entregado por el fabricante. Este valor suele aparecer a veces con los nombres de tiempo de subida, tiempo de baja o frecuencia de operación.

- Eficiencia cuántica: Este parámetro es determinado como la probabilidad de que un fotón incidente genere electrones portadores que contribuyan a la corriente del detector.

No siempre los fotones incidentes generan electrones portadores que contribuyen a la corriente del detector, la probabilidad de la absorción, los efectos de la reflexión de la superficie y la rápida recombinación de electrones portadores hacen que disminuya la eficiencia cuántica.

- Características del Ruido: Se define como cualquier modificación no deseada de la señal en un sistema de comunicaciones. Son introducidos por el detector cuando detectan las señales. Existen 2 tipos de ruidos: ruido de corriente de oscuridad y ruido de disparo.

Ruido de disparo: Este tipo de ruido está asociado con procesos cuánticos de absorción de los fotones por el volumen del fotodetector. Se comporta como un ruido blanco óptico superpuesto a la señal que viaja por la fibra óptica.

Ruido de oscuridad: Este ruido es producido por un proceso espontáneo de generación y recombinación de electrones.

### 2.1.3.1 TIPOS DE FOTODETECTORES

Existen dos tipos de fotodiodos que son el fotodetector PIN y el fotodiodo de avalancha (APD).

**FOTODETECTOR PIN** : Es el fotodetector semiconductor más común y están formados por una capa de material semiconductor ligeramente contaminado la que se conoce como región intrínseca que está ubicada entre dos capas de material semiconductor, una región conocida como tipo N y otra conocida como tipo P. **[10]**

Al aplicar una polarización inversa al fotodetector, se crea una zona desértica es decir libre de portadores, se muestra en la figura 2.5. Al incrementar esta región, se incrementa la responsividad pues el número de fotones absorbidos en esta

zona aumenta. Como aumenta la responsividad, también se incrementa la eficiencia del fotodiodo en cambio el tiempo de respuesta aumenta.

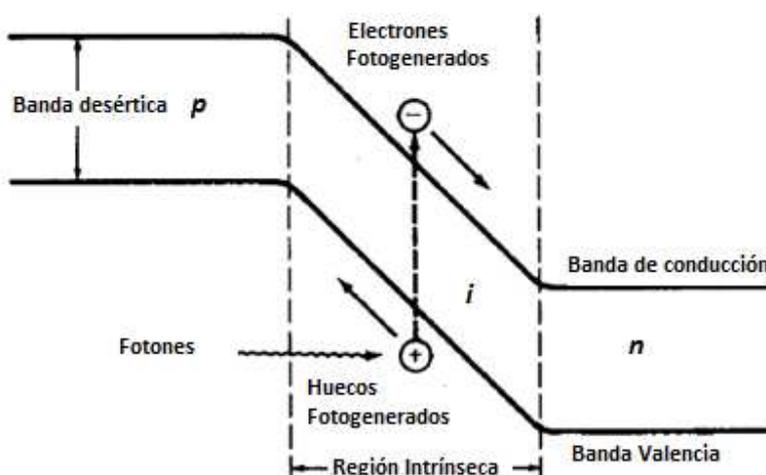


Fig. 2.5 Diagrama de energía del fotodiodo PIN [11]

**FOTODETECTOR DE AVALANCHA (APD):** Este fotodetector presenta una ganancia interna y genera más de un par electrones hueco, debido al proceso de ionización de impacto llamado ganancia de avalancha. El diseño de los APD difiere principalmente en un aspecto de los fotodiodos PIN, se añade una capa adicional al fotodetector APD, donde

se generan los pares electrón-hueco por el fenómeno de la ionización por impacto. Para cuantificar el fenómeno de avalancha se introduce un parámetro conocido como ganancia de avalancha esto es el promedio de electrones generados por cada fotón. [10]

Este fotodetector es cientos de veces más sensible que el fotodiodo PIN debido a que cada par de electrón hueco generado por la potencia óptica incidente produce más pares de electrones. Se lo usa en aplicaciones donde se requiere alta ganancia. Su estructura es presentada en la figura 2.6.

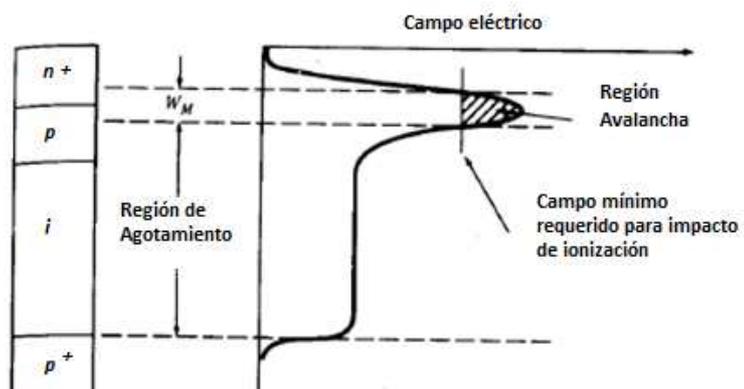


Fig. 2.6 Diagrama de energía del fotodiodo APD [11]

## **CAPÍTULO 3**

### **SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN**

En éste tercer capítulo se hablará tanto de las simulaciones de mi sistema de comunicación DPSK en SIMULINK como de los resultados obtenidos en mi simulación.

La descripción de mi sistema de comunicaciones será completa, describiré el transmisor, con cada uno de sus elementos el receptor así mismo hablando de sus elementos como fotodetector y demodulador y el medio de comunicación que es la fibra óptica. En la figura 3.1 se muestran los 3 componentes básicos de todo sistema de comunicaciones, como en mi caso es una simulación de un sistema de comunicaciones óptico, el canal o medio será la fibra óptica. **[13]**

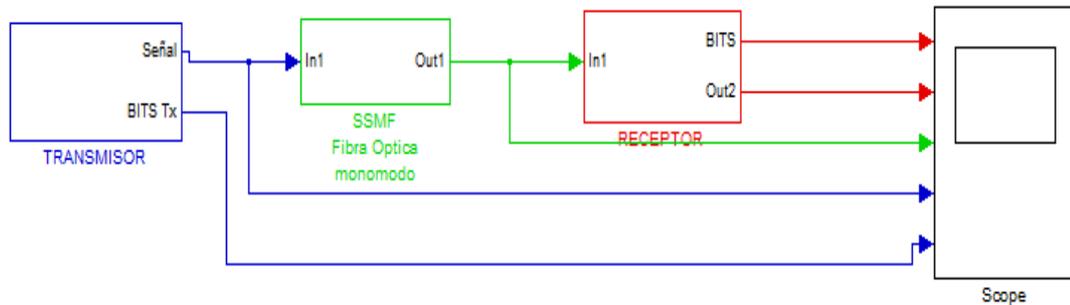


Figura 3.1 Componentes de un sistema de comunicaciones óptico

### 3.1 SIMULACIÓN DEL TRANSMISOR

En éste subcapítulo observaremos la simulación del transmisor de mi sistema de comunicaciones DPSK.

Nuestro transmisor está conformado por tres partes fundamentales que son el generador de bits, el modulador DPSK y el LED mostrados a continuación en la figura 3.2.

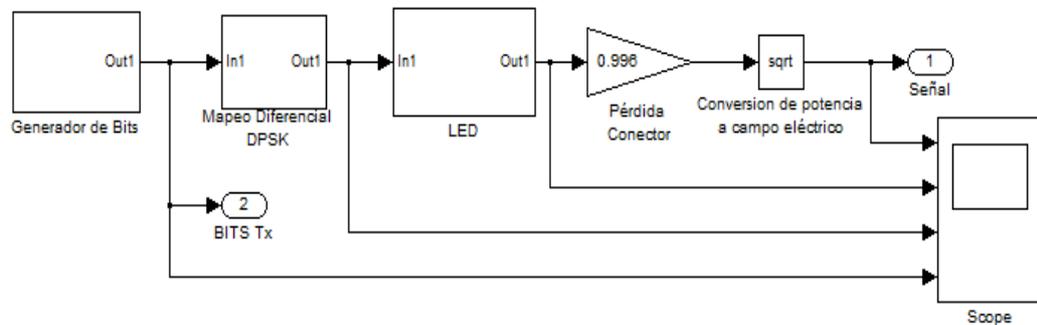


Fig. 3.2 Componentes del transmisor DPSK

### 3.1.1 GENERADOR DE BITS

El primer elemento del transmisor es el generador de bits que trabaja con una tasa o velocidad de 1Mbps, es decir 1000,000 bits por segundo. Cabe recalcar que la generación de bits es aleatoria. Otro dato muy importante del cual debemos hablar es del tiempo de muestras por bit con el que trabaja el generador de bits, que es de 100 muestras. **[18]**

En la figura 3.3 observamos mi sistema de generación de bits conformado por el bloque Bernoulli binary generator y el bloque step que es un bloque escalón, los cuales al multiplicarse producirán simplemente que el primer bit resultante siempre sea cero, esto lo hago para comenzar siempre la secuencia de bits con un bit cero lógico.

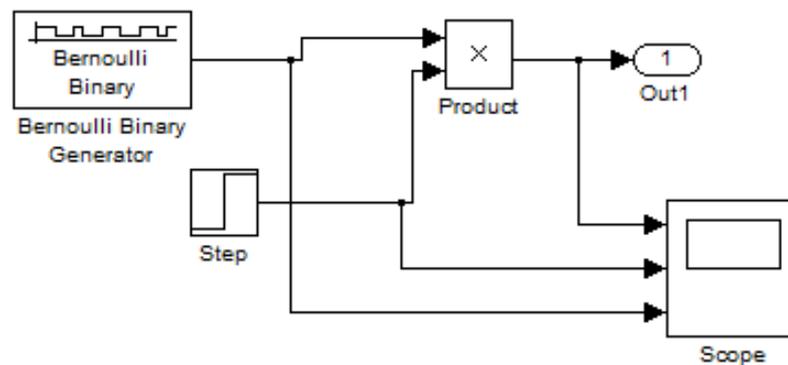


Figura.3.3 Sistema de Generación de datos binarios

Al final del sistema se encuentra un SCOPE o visualizador que es el bloque que necesitamos para ver el resultado de nuestra simulación.

[18]

En la figura 3.4 se muestra el resultado de mi simulación, en donde se muestran los bits generados aleatoriamente por el bloque Bernoulli binary generator.

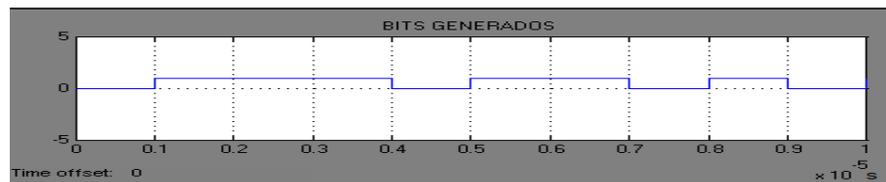


Figura 3.4 Simulación de generación de bits con reloj de 1Mbps

### 3.1.2 MODULADOR DPSK

El siguiente sistema del transmisor luego del generador de bits es el modulador DPSK, el cual está conformado como anteriormente lo mencionamos en el capítulo 1 de una puerta lógica XNOR y de un retardo unitario de bits. Lo que se producirá con estos bloques es un mapeo DPSK. En la figura 3.5 se muestra la estructura del mapeo DPSK. [4]

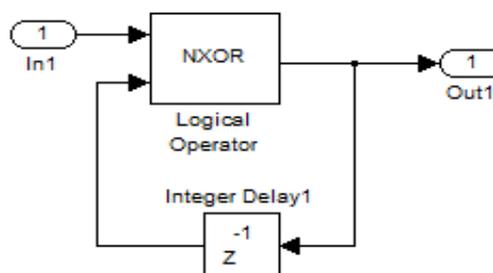


Figura. 3.5 Mapeo DPSK

Como vimos en el capítulo 1 conocemos que a la entrada de la puerta lógica XNOR se comparan la señal  $In1$  que es la secuencia de bits con la salida del bloque XNOR retardada un bit. Inicialmente se compara el primer bit de la secuencia con un 0 lógico, como sabemos si ambos son iguales la puerta XNOR genera un 1 lógico, caso contrario se genera un 0 lógico. [4] Esta señal a la salida del XNOR es retardada por un bloque de retardo unitario para ser comparada nuevamente con la secuencia de bits y así sucesivamente. Esta señal a la salida del bloque XNOR finalmente será modulada luego por amplitud usando modulación PAM.

Así finalmente concluimos que toda estructura que conforman el modulador DPSK lo que realiza es que si la señal digital a la entrada del modulador es 1 lógico la señal modulada sufrirá un desfase de 0 grados, pero si la señal digital a la entrada del modulador es un 0 lógico la señal a la salida sufrirá un desfase de 180 grados.

A continuación en la figura 3.6 observamos el proceso de mapeo o modulación DPSK. En el primer recuadro mostramos la secuencia de

bits enviados, en el segundo recuadro la salida de la puerta lógica XNOR retardada un bit y en el tercer recuadro observamos el mapeo DPSK que es la operación XNOR entre los bits enviados y la señal a la salida del bloque XNOR retardada un bit.

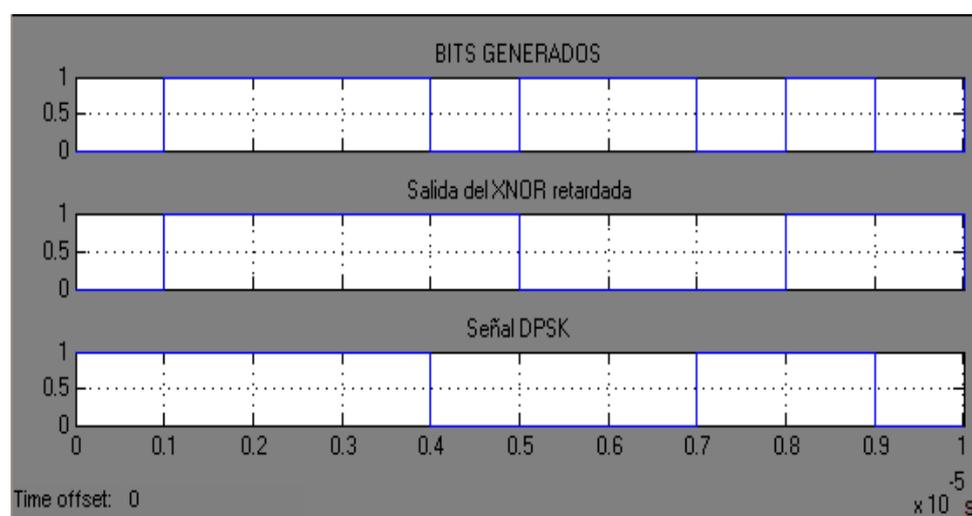


Fig. 3.6 Proceso de modulación DPSK

Como observamos en ésta figura cuando los bits enviados son 0 lógicos la señal resultante varía la fase 180°, decimos esto ya que se toma en cuenta la variación del pulso, de 0 a 1 o de 1 a 0. De ésta manera se simula una modulación DPSK para luego transmitir la información en forma de pulsos. **[4]**

### 3.1.3 FUENTE ÓPTICA “LED”

En éste subcapítulo se hablará sobre la fuente óptica que utilizará nuestro sistema de comunicaciones el cual será el LED.

El LED que se utilizará en mi sistema de comunicaciones DPSK es simulado como un filtro pasa bajos ya que la idea es dejar pasar sólo la información necesaria para la simulación sin que pasen otras frecuencias en donde intervenga el ruido.

A continuación en la figura 3.7 se muestra la estructura del LED a utilizar.

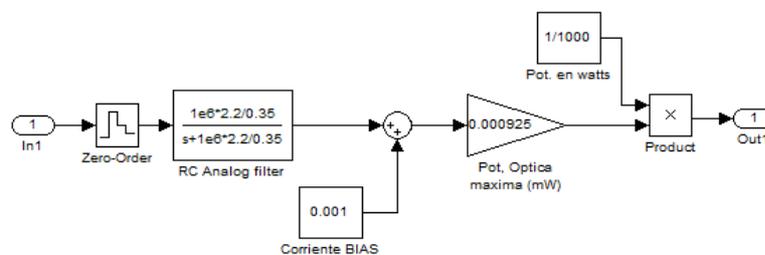


Fig. 3.7 Componentes del LED

Como observamos el LED a utilizar está conformado por algunos otros bloques como el zero-order hold, el filtro RC y otros.

El primer bloque a utilizar es el bloque llamado zero-order hold el cual nos ayuda a muestrear o discretizar la señal en un número de muestras determinado. Este bloque trabaja con un tiempo de muestreo de 10 ns, que es el mínimo tiempo de muestreo de la señal a transmitir. **[11]**

El siguiente bloque a utilizar es un filtro RC analógico, el cual lo usamos para simular un filtro pasa bajos. Con éste bloque simulamos la función de transferencia de un filtro RC en términos del tiempo de respuesta o del ancho de banda. En éste caso lo utilizo en términos del ancho de banda del LED que voy a usar. La función del ancho de banda para el filtro RC está dado por la ecuación **[4]**:

$$\frac{1}{1 + \frac{0.35}{2.2 \Delta f} s} \quad (3.1)$$

En donde  $\Delta f$  es el ancho de banda de la señal y donde finalmente la función de transferencia en términos del ancho de banda de mi señal es:

$$\frac{\frac{2.2 \Delta f}{0.35}}{s + \frac{2.2 \Delta f}{0.35}} \quad (3.2).$$

Luego de este paso sumamos a nuestra señal un nivel de DC de 0.001 ya que debemos recordar que en esta sección interviene una corriente DC de BIAS, que es el nivel de corriente DC con el que trabaja el punto de operación de un LED.

El siguiente bloque que forma parte de la estructura de nuestro LED es un bloque de ganancia, el cual se refiere a la potencia óptica máxima a la salida del LED. Este parámetro está determinado como la pendiente potencia vs corriente del LED.

Conocemos que nuestro LED trabaja con una corriente máxima de 100mA pero también funciona con una corriente de 60mA. Cuando el LED trabaja con la corriente máxima de 100mA la potencia máxima a la salida del LED es de 100uW y cuando trabaja con una corriente de 60mA la potencia máxima a la salida del LED es de 63uW.

Por lo tanto con estos datos llegamos a la conclusión que la pendiente de nuestra recta Potencia vs Corriente es de 0.000925 mW/mA.

Este será el dato que utilizemos para nuestra ganancia en el LED, es decir una vez que la señal de corriente pase por este bloque de

ganancia la salida de ésta señal será de potencia en unidades miliwatts. Esta señal la mostramos a continuación en la figura 3.8.

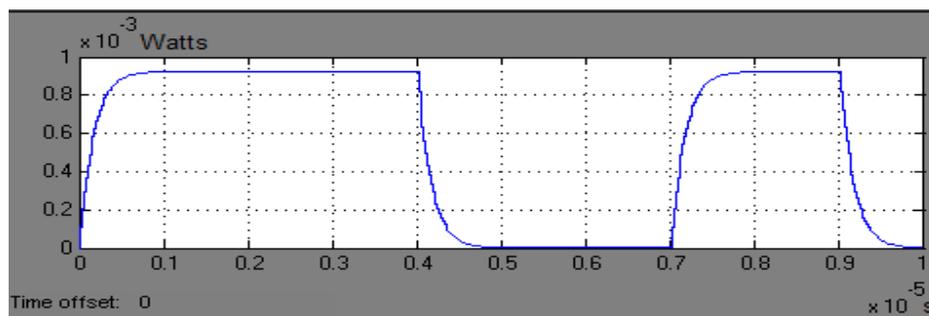


Fig. 3.8 Señal máxima que puede pasar por el LED

Finalmente multiplicamos nuestra señal por una constante de 1/1000 ya que con esto transformamos nuestra potencia de miliwatts a watts y ésta será la potencia a la salida de nuestro LED, señal mostrada en la figura 3.9.

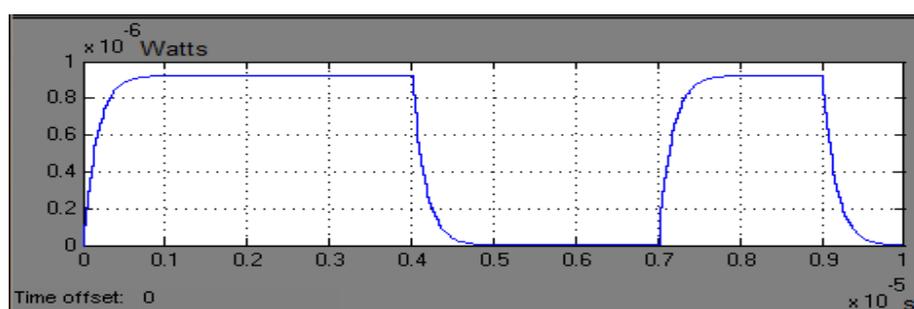


Fig. 3.9 Potencia en watts a la salida del LED.

### 3.2 SIMULACIÓN DE LA FIBRA OPTICA

La fibra óptica como conocemos es un medio de comunicaciones óptico, es decir la información viaja a través de ella en forma de luz. A su vez la fibra óptica está caracterizada por ser un canal de transmisión en el cual intervienen parámetros como la atenuación y dispersión, factores que degradan la señal a transmitir. [15]

En la transmisión también influyen otros parámetros como la longitud o distancia de la fibra óptica, la longitud de onda, el tiempo de muestreo de nuestra señal a transmitir y otros. Es por éste motivo que todos esos parámetros hay que tomarlos en cuenta en el momento de implementar el diseño de la fibra óptica.

Para la implementación de ésta fibra óptica se ha utilizado una matriz de concatenación, matriz con la que se van a concatenar parámetros como atenuación, dispersión, longitud de la fibra y otros bloques parametrizados para simplemente modificarlos desde un archivo inicial que estará adjunto más adelante en los anexos. En la figura 3.10 mostrada a continuación observamos los bloques parametrizados con las funciones a utilizar, tales como atenuación, tiempo de muestreo, número de pasos y pasos de

distancia, los cuales corresponderán a la longitud de la fibra a utilizar. También un bloque de buffer que añade las muestras de mi señal a transmitir. Todas estas funciones con sus parámetros se mostrarán en el anexo más adelante.

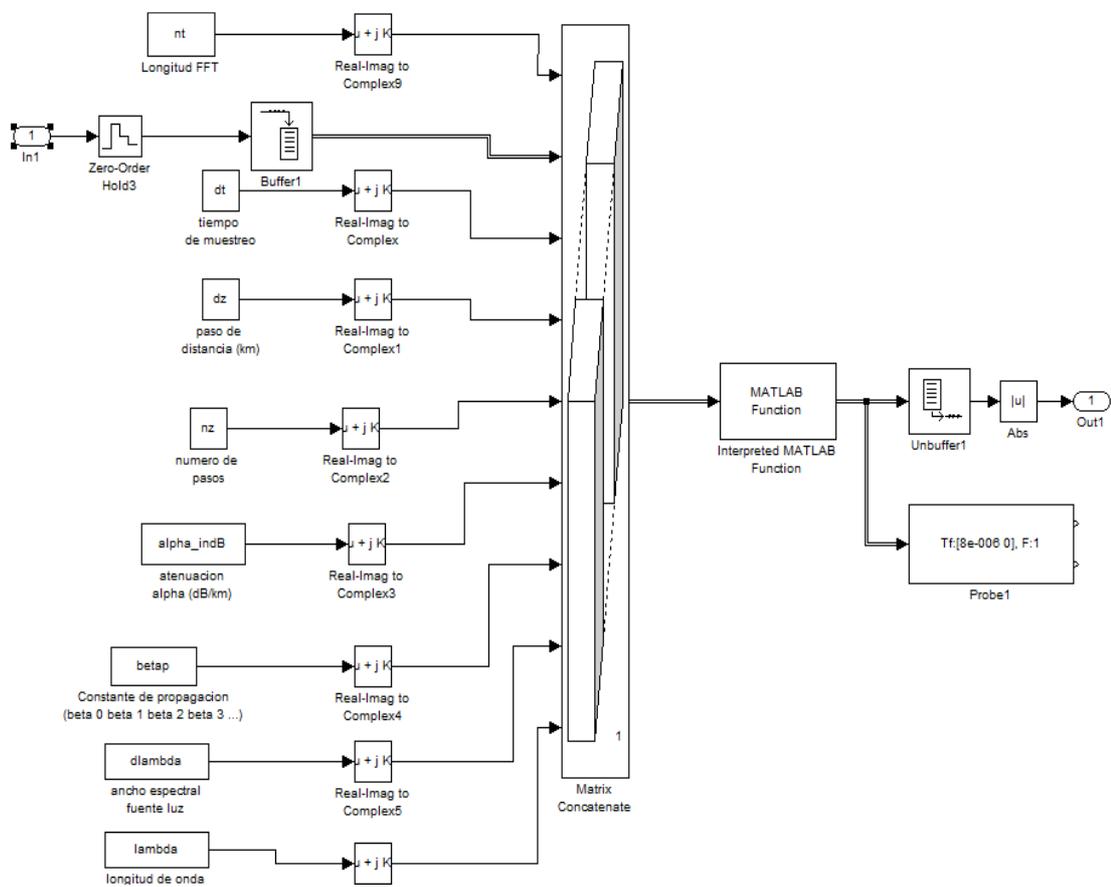


Fig. 3.10 Estructura de la Fibra Óptica Monomodo

Luego de la matriz de concatenación se encuentra un bloque de *Matlab Function* en donde va colocado un archivo en el que se inicializarán las variables a usar como parámetros en estos bloques. Finalmente luego del bloque de funciones de Matlab tenemos un bloque *unbuffer* para obtener nuevamente la muestras de mi señal a transmitir. **[18]**

### 3.3 SIMULACIÓN DEL RECEPTOR

En este subcapítulo se hablará de la simulación del receptor de mi sistema de comunicaciones DPSK.

Nuestro receptor está conformado por dos partes que son el fotodetector, y el demodulador DPSK mostrados a continuación en la figura 3.11. **[3]**

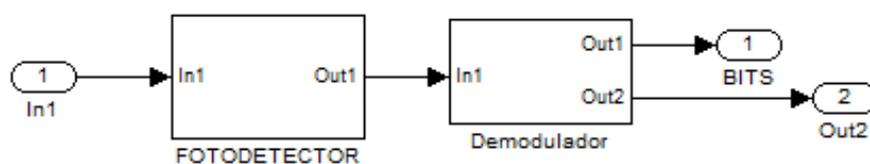


Figura. 3.11 Estructura del Receptor

### 3.3.1 FOTODETECTOR

Nuestro primer bloque que tenemos en el receptor es el fotodetector, el cual es el encargado de convertir una señal digital en eléctrica. [3] Este fotodetector consta de algunos elementos mostrados a continuación en la figura 3.12.

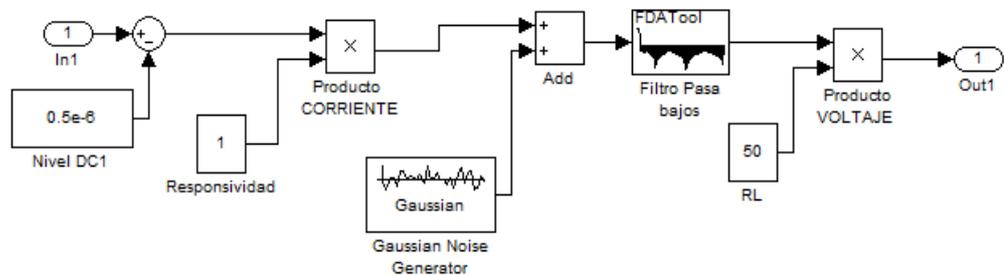


Figura. 3.12 Componentes del Fotodetector

Primeramente restamos a la señal un nivel DC para centrarla en los ejes positivo y negativo. Esto lo hago ya que luego mi señal pasará por un comparador con un nivel de umbral igual a 0 para conocer si es un bit 1 o 0 lógico.

Luego la señal modulada en pulso es multiplicada por un bloque que simula la responsividad la cual está dada en términos de mA/mW. El

bloque de responsividad como lo vimos en el capítulo 2 es el encargado de convertir potencia eléctrica en corriente.

Después de esto la corriente será afectada por un ruido de corriente térmico que es el ruido que prevalecerá en mi sistema usando el bloque de Gaussian Noise Generator. En éste bloque el parámetro a utilizar es la varianza que hace las veces de potencia de ruido térmico. El ruido térmico está dado por la siguiente ecuación: **[10]**

$$\text{Potencia de Ruido Térmico} = 4kTB \quad (3.3)$$

En donde T es la temperatura con la que trabaja el fotodetector que está dada en grados Kelvin, K es la constante de Boltzman que está determinada por  $1.38 * 10^{-23}$ , B es el ancho de banda del ruido y R<sub>L</sub> es la resistencia de mi circuito, la cual es 50 ohms. Con todo esto obtenemos una potencia de ruido térmico de 1.62pW y una corriente de ruido de 32.3 fA descrito como la varianza en el bloque de Gaussian Noise Generator y donde la media es igual a cero, como se presenta en la figura 3.13.

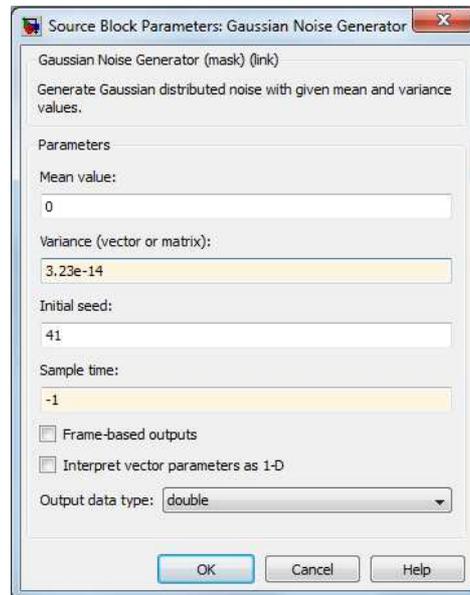


Figura. 3.13 Parámetro de Noise Variance

Luego de esto, mi señal será filtrada por un filtro pasa bajos con frecuencia de muestreo de 100MHz, frecuencia de paso de 1 MHz y frecuencia stop de 2 MHz. Este filtro es un filtro Equiripple pasa bajos que me limitará el ancho de banda del ruido de mi señal. Los parámetros de éste filtro se muestran a continuación en la Figura 3.14.

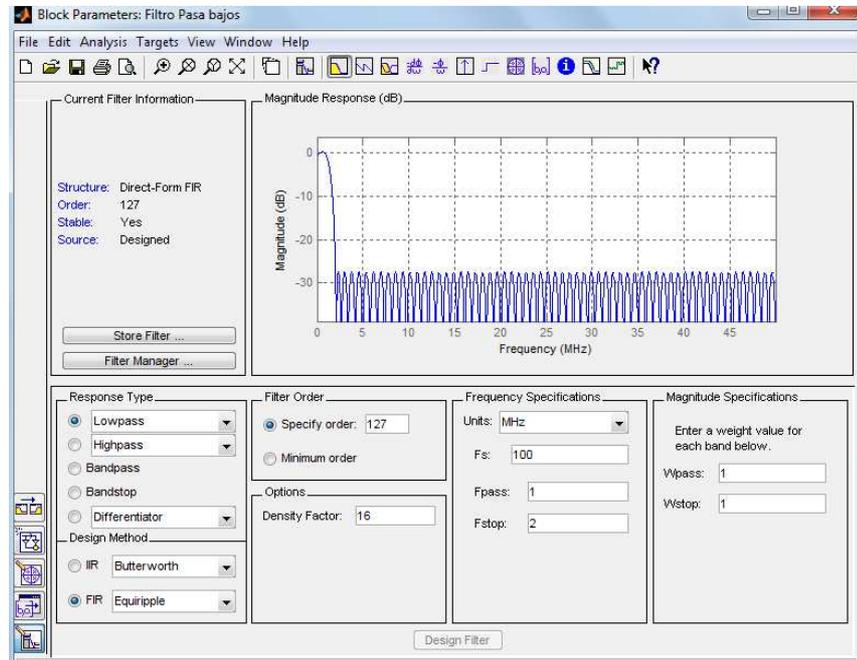


Figura. 3.14 Parámetros del Filtro del Receptor

Finalmente nuestra señal de corriente es multiplicada por una resistencia de 50 ohms dando como resultado el voltaje que luego será comparado con un nivel de umbral en el demodulador. Todo este proceso lo podemos observar en la figura 3.15.

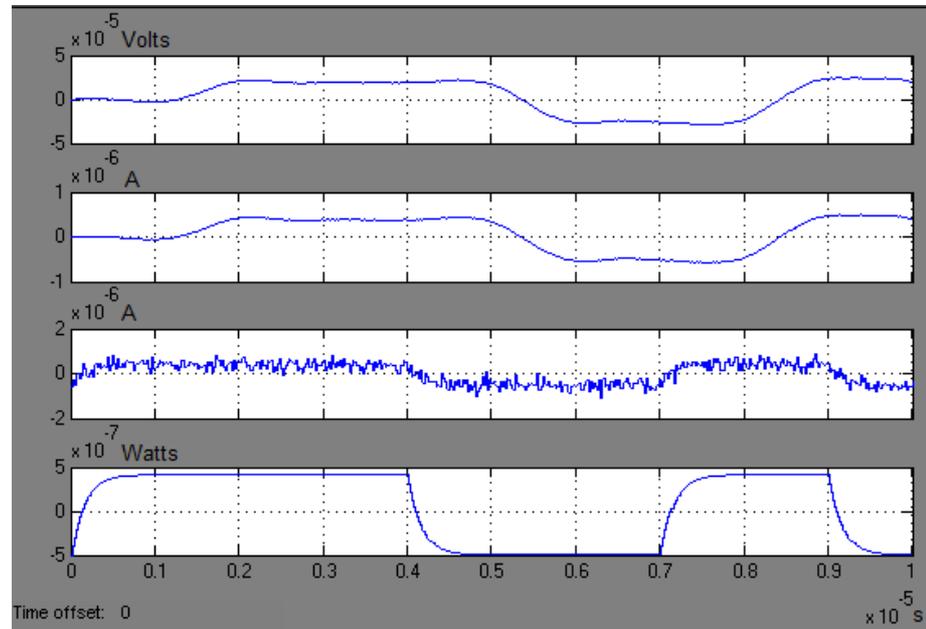


Figura. 3.15 Proceso en el fotodetector

En este diagrama podemos observar el proceso del fotodetector, desde abajo hacia arriba observamos en el recuadro inferior la señal centrada en los semiejes positivo y negativo al mismo tiempo que multiplicada por la resistividad. En el segundo recuadro de abajo hacia arriba se observa la señal con ruido térmico, luego en el recuadro superior se observa la señal filtrada por el filtro pasa bajos y finalmente en el primer recuadro superior observamos la señal convertida en voltaje lista para pasar al demodulador.

### 3.3.2 DEMODULADOR DPSK

En este subcapítulo describiremos la estructura y componentes del demodulador DPSK mostrados a continuación en la figura 3.16.

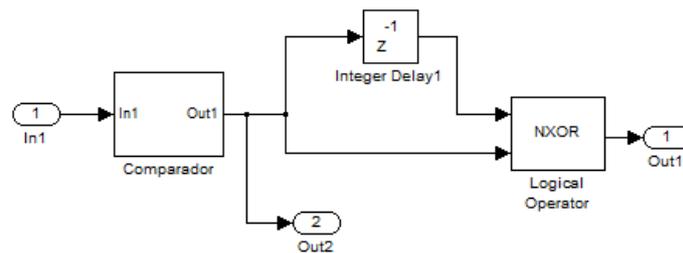


Figura. 3.16 Componentes del Demodulador DPSK

Como ya vimos en el capítulo 1, la estructura del demodulador DPSK es sencilla ya que solo consiste de un comparador y luego aplicar el proceso inverso que utilizamos en el modulador usando el mapeo DPSK, para recuperar los bits enviados.

En primer lugar la señal en el receptor es comparada con un nivel de umbral igual a 0 para convertirla a digital es decir 1 o 0 lógico dependiendo si la señal está por encima o debajo del nivel de umbral a comparar.

Luego ésta señal juntamente con la misma señal retardada entran a una puerta lógica XNOR donde dará como resultado los bits enviados en el transmisor. Esto se produce realizando el proceso contrario que se realizó en el transmisor. En la figura 3.17 observamos el proceso del demodulador para obtener los bits enviados. **[3]**

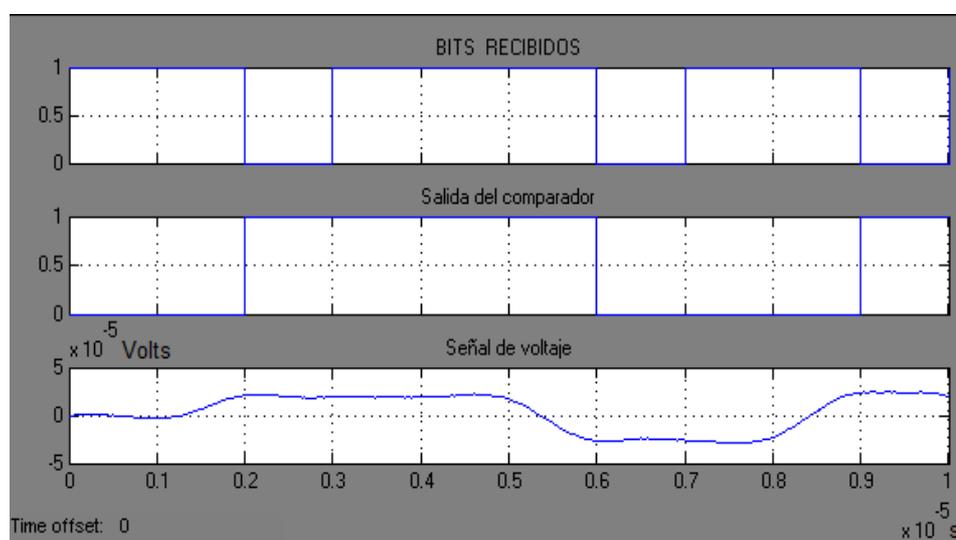


Figura. 3.17 Proceso del Demodulador DPSK

Como observamos en ésta figura tenemos de abajo hacia arriba la señal modulada por pulsos que viene del fotodetector, luego de esto pasa por un comparador lo que la vuelve una señal digital y finalmente en el recuadro superior observamos los bits enviados con un pequeño retardo, recuperados luego de pasar por la puerta lógica XNOR.

## **CAPÍTULO 4**

### **Análisis de Resultados**

En este capítulo observaremos los resultados y desempeño de mi sistema de comunicaciones DPSK, observaremos la curva BER vs  $E_b/N_0$ , también el diagrama de ojo para observar los pulsos en el receptor luego de sufrir degradaciones por el ruido.

Finalmente evaluaremos 2 casos en mi sistema de comunicaciones óptico: Primero evaluaremos el sistema con los mismos parámetros del sistema normal pero variando la longitud de la fibra óptica y en segundo lugar evaluaremos el sistema variando la tasa de bits a transmitir. En ambos casos se mantendrá constante tanto la atenuación como la dispersión de la fibra óptica.

#### 4.1 Desempeño teórico del sistema DPSK

Como sabemos el sistema DPSK tiene unas ventajas y desventajas sobre otros sistemas, por ejemplo una ventaja de éste sistema es que es un sistema no coherente es decir no se necesita sincronizar la fase del transmisor con la fase del receptor es decir no se necesita de una señal portadora. Pero una de las desventajas de este sistema comparado con el sistema coherente PSK por ejemplo es que se necesita 3dB más de potencia para conseguir el BER requerido, es decir el desempeño BER vs  $E_b/N_0$  es menor en 3dB. [16] A continuación en la figura 4.1 observamos el desempeño teórico BER vs  $E_b/N_0$  de un sistema DPSK.

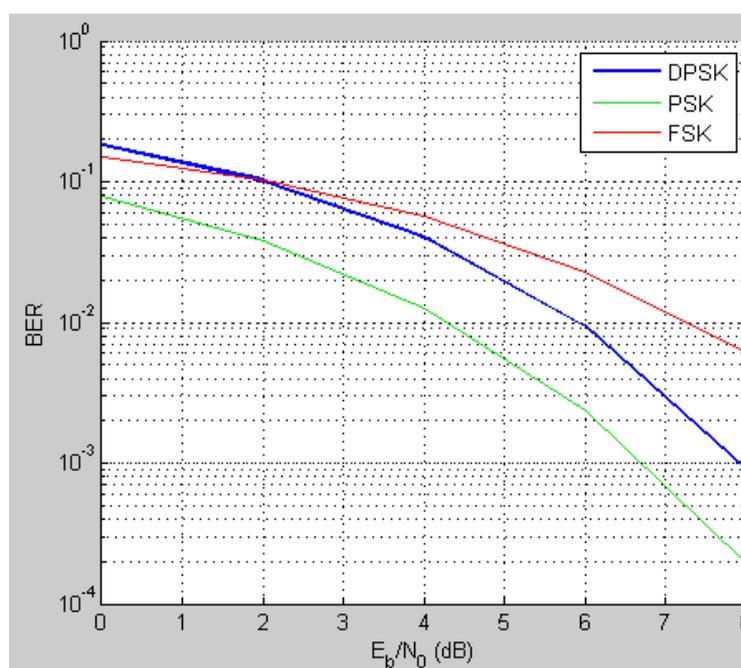


Figura 4.1 Desempeño teórico BER vs  $E_b/N_0$  de un sistema DPSK. [5]

## 4.2 Desempeño del sistema DPSK en simulación

En mi simulación primeramente se implementó y simuló un sistema DPSK sencillo con un transmisor, un receptor y un canal de ruido AWGN. Este bloque de AWGN se lo trabaja en términos de  $E_b/N_0$  no como constante sino como una variable que variará de 0 a 8 dB.

El sistema DPSK que utilizamos para demostrar su desempeño con el desempeño teórico se encuentra a continuación en la figura 4.2

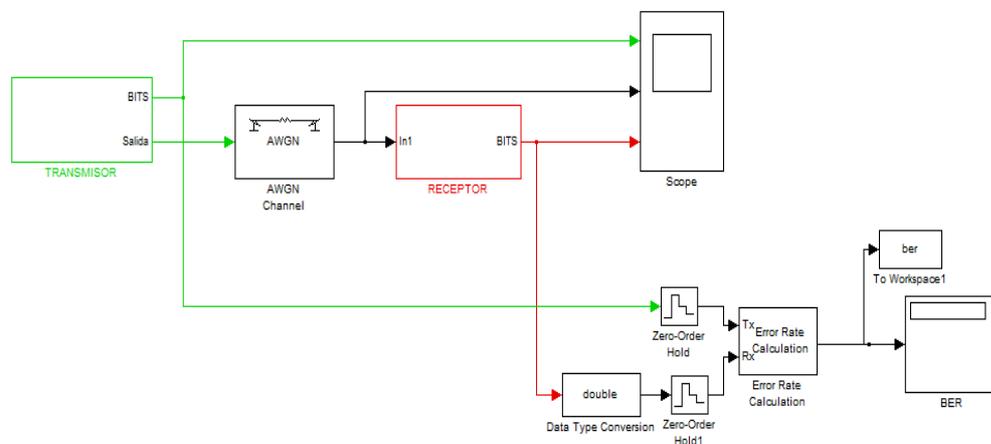


Figura 4.2 Simulación del Desempeño de un sistema DPSK

La función que me ayudará a elaborar la gráfica BER vs  $E_b/N_0$  es la función BERTOOL de Matlab, en la cual debemos ingresar el nombre del archivo a

simular, el rango de valores de  $E_b/N_0$  que vamos a usar y el nombre del bloque to workspace que está asociado conjuntamente con el bloque BER. A continuación en la figura 4.3 se muestran los parámetros a ingresar en éste bloque.

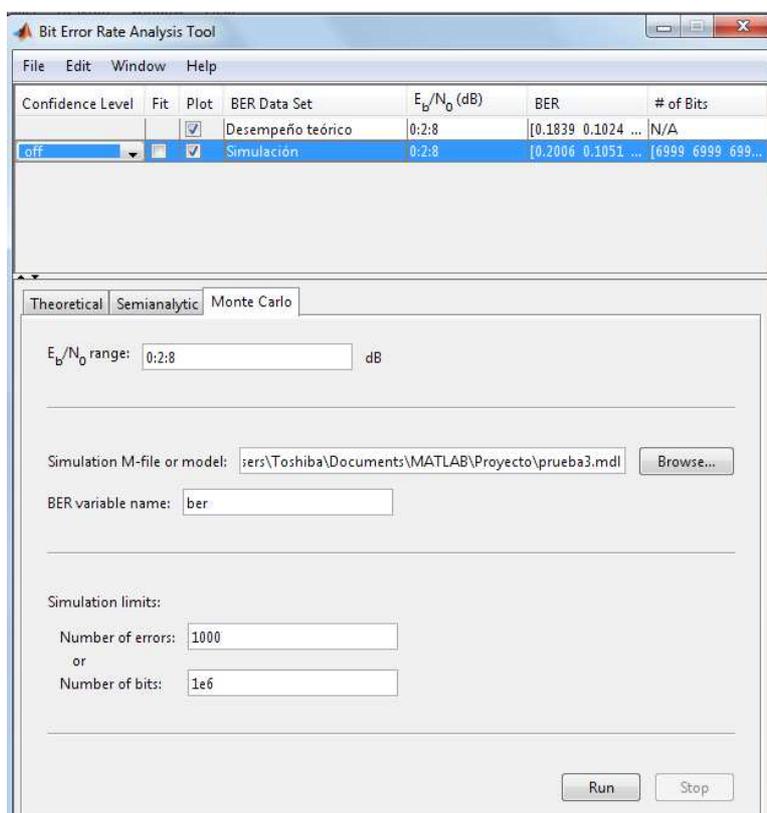


Figura 4.3 Parámetros de la función BERTOOL

A su vez recordemos que el bloque AWGN tiene que estar parametrizado con la variable  $E_b/N_0$  para ser controlado desde la función BERTOOL. Al colocar el rango de mi variable  $E_b/N_0$  0:2:8 estoy refiriéndome a que voy a

tener 5 iteraciones empezando con  $E_b/N_0$  igual a 0 aumentando de 2 en 2 hasta terminar en  $E_b/N_0$  igual a 8. A continuación en la figura 4.4 observamos el desempeño de mi sistema DPSK (Puntos morados) comparado con el desempeño teórico DPSK (curva verde). Es decir la curva color verde representa la variación de la BER (Probabilidad de Error de Bit) frente a la variación de la  $E_b/N_0$  (Relación de Energía de bit frente al ruido) la cual nos demuestra el desempeño teórico de cualquier sistema DPSK y los puntos color morado representan los datos obtenidos en mi simulación DPSK utilizando la herramienta BERTOOL en el bloque AWGN, con lo cual demostramos que mis datos siguen el mismo desempeño teórico de un sistema DPSK.

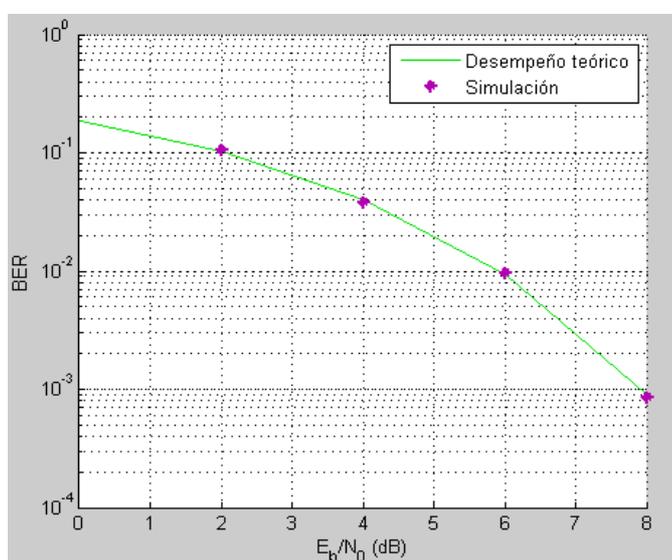


Figura 4.4 Desempeño teórico comparado con la simulación

### 4.3 Desempeño del Sistema con ruido térmico

Para analizar el desempeño de mi sistema utilizaré uno de los principales ruidos que intervienen en un fotodetector óptico que es el ruido térmico. El ruido térmico en mi sistema se representará como la varianza en un bloque generador de ruido gaussiano con media cero.

Como ya observamos en el capítulo anterior, la varianza del ruido a utilizar en el fotodetector es de 32.3 fW y la potencia del ruido térmico  $P_n$  es 1.62pW. Además conocemos que la potencia óptica a la salida del transmisor es de 46.25 uW y la potencia óptica incidente en el fotodetector es de 45.88 uW debido a la pérdida por conectores. Con estos datos podemos deducir la relación  $E_b/N_0$  de mi señal, siendo la ecuación de ésta:

$$E_b/N_0 = SNR + 10 \log (0.5 * T_{sym}/T_{sam}) \quad (4.1)$$

En donde SNR es la relación señal a ruido de una señal,  $T_{sym}$  es el periodo del símbolo o bit y  $T_{sam}$  es el tiempo de muestreo de mi señal. A su vez la SNR de una señal está dado por la relación de potencia de la señal con la potencia del ruido cuya ecuación para mi caso en el que sólo actúa el ruido térmico está dada por **[20]**:

$$SNR = 10 \log \left( \frac{P_s}{P_n} \right) = 10 \log \left( \frac{R_l * i^2}{P_n} \right) = 10 \log \left( \frac{R_l (Resp.* P)^2}{4KTB} \right) \quad (4.2)$$

En donde  $P_s$  es la potencia eléctrica de mi señal,  $R_l$  es la resistencia de carga de 50 ohms,  $R_{sp}$  es la responsividad del fotodetector,  $P$  es la potencia óptica incidente en el fotodetector y  $P_n$  es la potencia del ruido térmico que como ya lo vimos en el capítulo anterior es de 1.62pW. También conocemos en la ecuación de  $E_b/N_0$  que  $T_{sym}$  es decir el periodo del bit o símbolo es de 1 us y  $T_{sam}$  es decir el tiempo de muestreo es de 20 ns. Con todos estos datos obtenemos:

$$E_b/N_0 = 10 \log (1.05 * 10^{-7} / 1.62 * 10^{-12}) + 10 \log (0.5 * (1 * 10^{-6} / 2 * 10^{-8}))$$

$$E_b/N_0 = 48.13 \text{ dB} + 13.9 \text{ dB}$$

$$E_b/N_0 = 62 \text{ dB}$$

Como observamos con estos cálculos se ha obtenido un  $E_b/N_0$  de 62 dB y un SNR de 48.13 dB que es bastante grande para afectar la señal, esto ocurre debido a que la potencia del ruido es demasiado pequeña comparada con la potencia de mi señal y por lo tanto no afectará la BER por lo que se observará en mi sistema una BER de 0. Más adelante observaremos como con una atenuación de la señal utilizando la fibra óptica se cumple con perfección la curva de desempeño ya que se usan  $E_b/N_0$  más pequeños dentro del rango de muestras que uso en la simulación.

#### 4.4 Desempeño del Sistema con la Fibra óptica

Debemos saber que al introducir la fibra óptica en mi sistema de comunicaciones existen dos parámetros fundamentales que intervienen en éste canal de comunicaciones los cuales ya fueron mencionados anteriormente y que afectarán al sistema los cuales son la atenuación y la dispersión.

Utilizaremos un modelo de una fibra óptica monomodo G.652 [19] con una longitud de 50Km, con una atenuación de 0.35 dB/Km y una dispersión de 0.5ps/nm\*Km. Estos datos son propios de una fibra G.652 que trabaja en la ventana de 1310nm.

Primero sólo utilizaré la fibra óptica con la atenuación de 0.35 dB/Km en donde observaremos que la potencia incidente en el fotodetector disminuirá a 0.8 uW, por lo tanto también disminuirá la relación señal a ruido SNR y también disminuirá el Eb/No como observaremos a continuación en la ecuación de Eb/No en donde la potencia del ruido es de 1.62 pW.

$$Eb/No = 10 \log (3.2 * 10^{-11} / 1.62 * 10^{-12}) + 10 \log (0.5 * (1 * 10^{-6} / 20 * 10^{-9}))$$

$$Eb/No = 12.9 \text{ dB} + 13.9 \text{ dB}$$

$E_b/N_0 = 26.8 \text{ dB}$

Ahora observamos en la figura 4.5 el diagrama de ojo del pulso de mi señal con SNR de 12.9 dB y con la atenuación de 0.35dB/km.

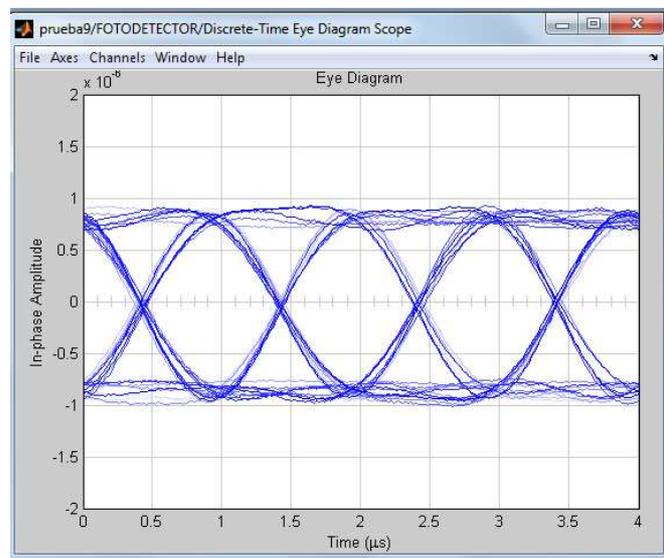


Figura 4.5 Diagrama de ojo del pulso con SNR de 12.9dB

Con ésta relación de  $E_b/N_0$  se obtendrá también una BER de 0 ya que mi  $E_b/N_0$  es muy alto para afectar la BER, pero podemos variar el  $E_b/N_0$  dentro del rango de 0 a 8 dB para observar que se sigue cumpliendo el desempeño del sistema, esto se lo conseguirá modificando la varianza del ruido o la potencia de la señal pero en mi caso modificaré la potencia del

ruido para obtener distintos  $E_b/N_0$  con sus respectivos BER. Esto lo podemos observar a continuación la tabla 4.1.

Pot. Ruido (W)	$E_b/N_0$ (dB)	BER
120 pW	8	0.001
162 pW	6.6	0.006
262 pW	4.4	0.03
462 pW	2.1	0.098
662 pW	0.5	0.15

Tabla 4.1 Resultados de BER utilizando sólo atenuación

Ahora representamos en la figura 4.6 todos estos valores de  $E_b/N_0$  con sus respectivos BER para demostrar que la curva de desempeño de mi sistema sigue cumpliéndose.

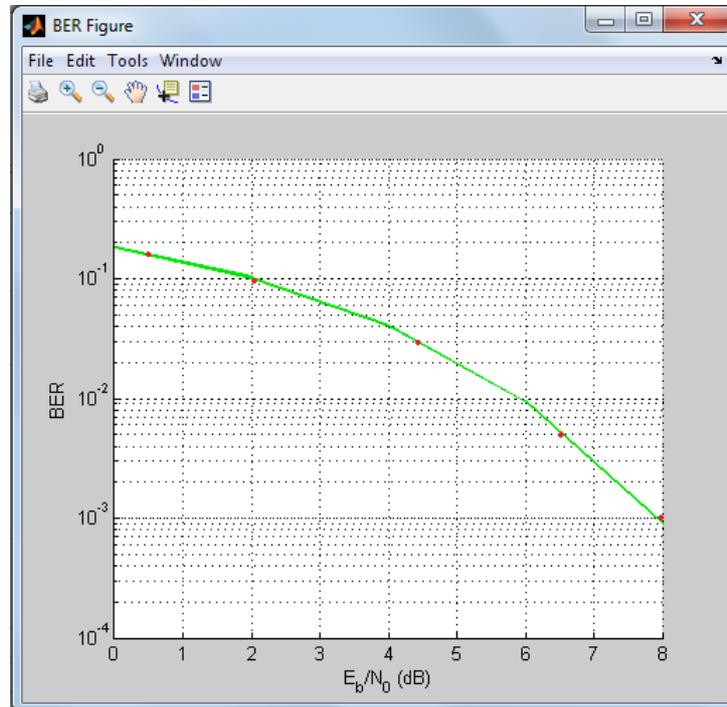


Figura 4.6 Curva de desempeño del sistema con fibra óptica

Como observamos en la figura 4.6 los resultados de BER obtenidos (color rojo) coinciden perfectamente en la curva de desempeño teórico del sistema (curva color verde).

Ahora modificaremos la dispersión de la fibra óptica, utilizaré una dispersión de  $0.5\text{ps/nm}\cdot\text{Km}$  y mantendré constantes los demás parámetros. Con ésta dispersión sigo obteniendo una BER de 0 muy baja todavía, pero

observaremos en la tabla 4.2 la BER ahora con distintas potencias de ruido, las mismas que usamos en la tabla anterior.

Pot. Ruido (W)	Eb/No (dB)	BER
120 pW	8	0.001
162 pW	6.6	0.0059
262 pW	4.4	0.031
462 pW	2.1	0.098
662 pW	0.5	0.15

Tabla 4.2 Resultados de BER añadiendo dispersión

Como observamos los valores de la BER con la dispersión utilizada no se alteran, debido a que la longitud la fibra y la tasa de bits son muy pequeñas para ser alterada por ésta dispersión. A continuación en el siguiente subcapítulo observaremos el desempeño del sistema con una variación de parámetros.

#### 4.5 Caso 1: Variando la longitud de la fibra

En éste subcapítulo se analizará el desempeño del sistema aumentando la longitud de la fibra óptica de 50 Km a 75 Km, manteniendo como constantes la atenuación y la dispersión de la fibra en relación al caso anterior es decir con una atenuación de 0.35 dB/Km y una dispersión de 0.5ps/nm\*Km.

Aumentando la longitud de la fibra a 75 km la potencia óptica incidente disminuirá a 100 nW debido a que la atenuación aumenta con la distancia de la fibra, y con una potencia de ruido de 1.62 pW obtendremos una BER de 0.0003 que es congruente ya que con la ecuación de Eb/No obtenemos un Eb/No de 8.7dB lo cual observando la curva de desempeño nos da como resultado la misma probabilidad de error.

$$Eb/No = 10 \log (5 * 10^{-13} / 1.62 * 10^{-12}) + 10 \log (0.5 * 1 * 10^{-6} / 20 * 10^{-9})$$

$$Eb/No = -5.18 \text{ dB} + 13.9 \text{ dB}$$

$$Eb/No = 8.7 \text{ dB}$$

Ahora observaremos en la Tabla 4.3 como con otros valores de Eb/No se sigue cumpliendo con la curva de desempeño del sistema.

Pot. Ruido (W)	Eb/No (dB)	BER
1.62 pW	8.7	0.0003
2.62 pW	6.7	0.005
4.62 pW	4.24	0.03
7.12 pW	2.3	0.078
10 pW	0.84	0.13

Tabla 4.3 Resultados de BER con atenuación y longitud de 75km

Ahora utilizando la dispersión de 0.5ps/nm\*km en la fibra óptica el desempeño de mi sistema tampoco variará como cuando se utilizó una

longitud de fibra de 50Km. A continuación en la Tabla 4.4 observamos los valores de  $E_b/N_0$  y BER para este nuevo caso.

Pot. Ruido (W)	$E_b/N_0$ (dB)	BER
1.62 pW	8.7	0.0003
2.62 pW	6.7	0.0051
4.62 pW	4.24	0.032
7.12 pW	2.3	0.078
10 pW	0.84	0.13

Tabla 4.4 Resultados de BER con atenuación, dispersión y long. 75km

Como observamos el desempeño del sistema en éste caso no cambia en lo absoluto debido al tipo de fibra monomodo que se utiliza ya que la dispersión con la que trabaja esta fibra no afecta al desempeño debido a que la longitud de la fibra no es muy grande y además la tasa de bits es muy baja para que sea afectada por esta dispersión.

Podemos observar a continuación en la figura 4.7 que el desempeño de mi sistema con los resultados de BER y sus respectivos  $E_b/N_0$  obtenidos (puntos color azul) pertenecen a la curva de desempeño teórico de un sistema DPSK(curva color verde).

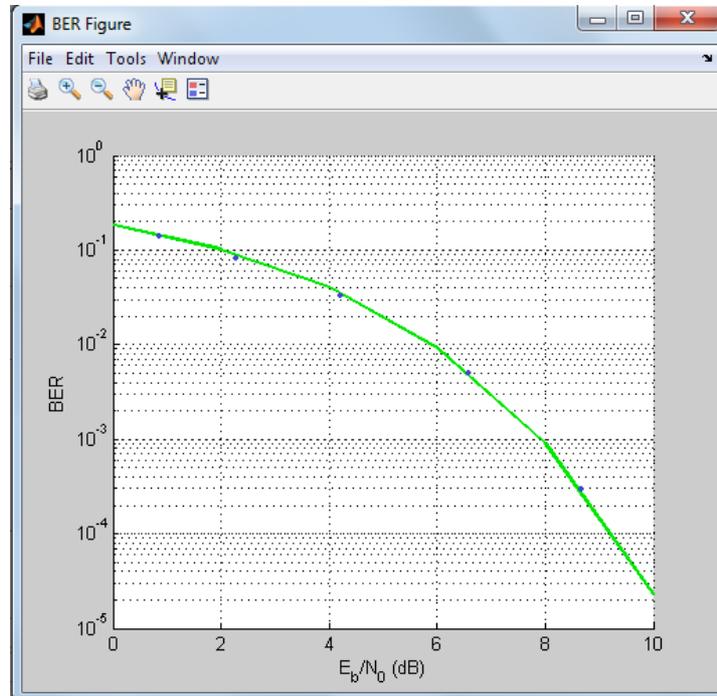


Figura 4.7 Curva de desempeño con longitud de fibra de 75Km

Finalmente observamos a continuación en la figura 4.8 el diagrama de ojo del sistema con estas variaciones como lo son la atenuación de 0.35dB/km pero con una longitud de la fibra mayor con respecto al caso anterior, lo que causa una atenuación mayor de la señal que en el caso anterior y como vemos esto hace que disminuya la amplitud del diagrama de ojo con respecto al diagrama anterior.

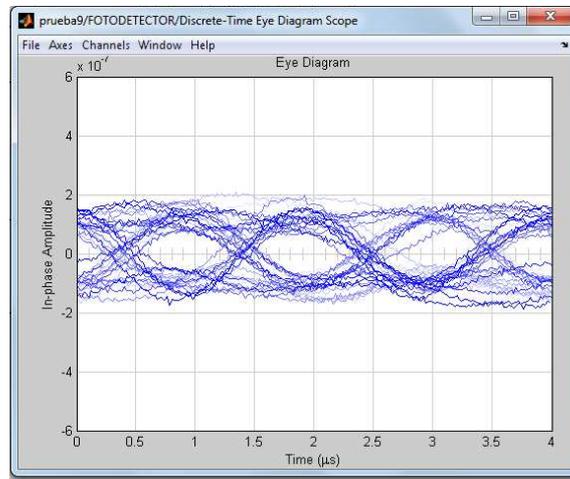


Figura 4.8 Diagrama de ojo del sistema con long. de 75Km y SNR de -5.2dB

#### 4.6 Caso 2: Variando la tasa de bits

En éste subcapítulo se analizará el desempeño del sistema pero ahora se aumentará la tasa de bits a transmitir, la tasa de bits en éste análisis será de 10Mbps, es decir con una velocidad de 10 veces más que el caso anterior.

Para éste análisis modificando la tasa de bits de 1Mbps a 10Mbps y con atenuación de 0.35dB/km, la potencia óptica incidente ahora es de 100nW y la potencia del ruido es de 1.62pW. Con estos datos obtenemos mediante la ecuación de  $E_b/N_0$  lo siguiente:

$$E_b/N_0 = 10 \log ( 5 * 10^{-13} / 1.62 * 10^{-12} ) + 10 \log ( 0.5 * 1 * 10^{-7} / 20 * 10^{-9} )$$

$$E_b/N_0 = -1 \text{ dB}$$

Con este valor de  $E_b/N_0$  obtenemos una BER de 0.2 que es bastante malo para un sistema DPSK aunque observando la gráfica 4.9 vemos que sigue cumpliendo con el desempeño normal del sistema. Observamos el punto color negro que es el BER obtenido sobre la curva color verde que representa el desempeño teórico del sistema en este segundo caso.

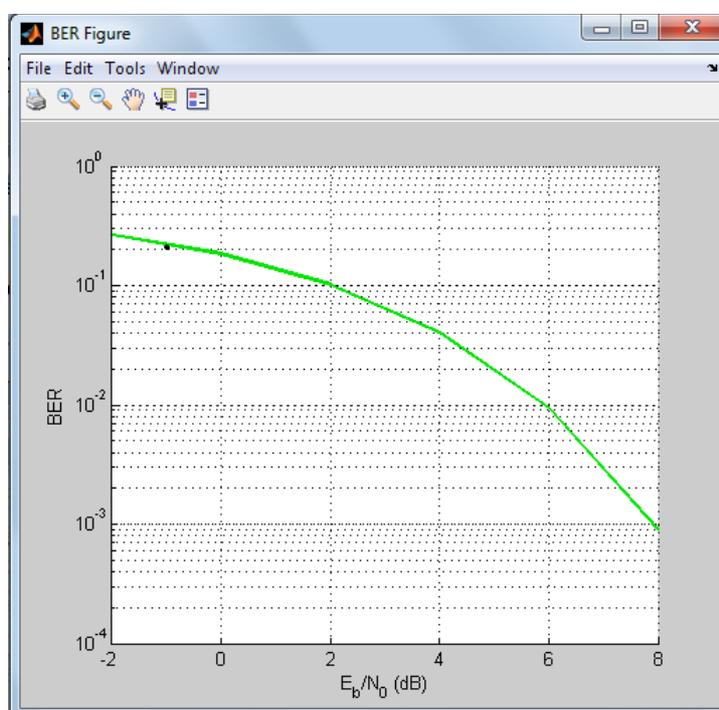


Figura 4.9 Representación de BER de 0.2 en la curva de desempeño

También podemos observar el diagrama de ojo en este segundo caso a continuación en la figura 4.10.

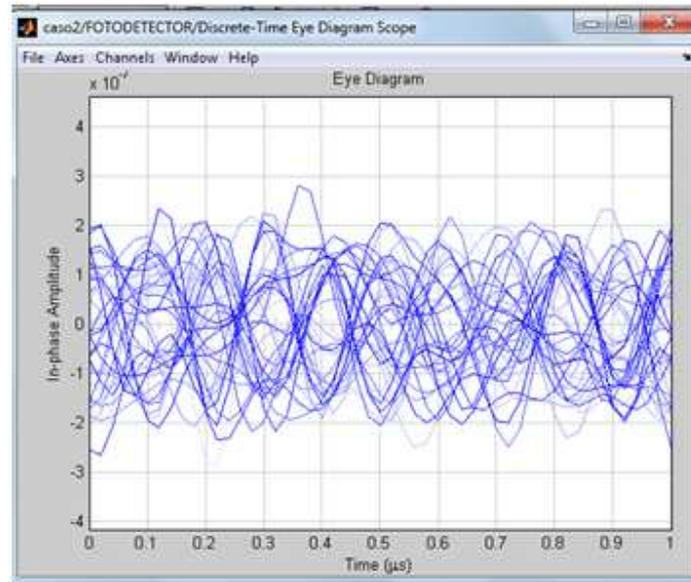


Figura 4.10 Diagrama de ojo del pulso en donde la tasa de bits es de 10Mbps y SNR de -5dB

Como conclusión podemos decir que la potencia de ruido usado en este caso es bastante grande para la potencia de la señal ya que conocemos que entre ambos casos, es decir entre el sistema que trabaja con una tasa de bits de 1Mbps y el sistema que trabaja con una tasa de 10Mbps hay una diferencia de aproximadamente 10 dB.

Ahora analizaremos otros valores más grandes de  $E_b/N_0$  para observar que se sigue cumpliendo con la curva de desempeño en la Tabla 4.5.

Pot. Ruido (W)	$E_b/N_0$ (dB)	BER
1.62 pW	-1	0.2
1.12 pW	0.5	0.14
0.62 pW	3	0.06
0.4 pW	5	0.018
0.25 pW	7	0.003

Tabla 4.5 Resultados de BER con atenuación y tasa de bits de 10Mbps

Podemos observar a continuación en la figura 4.11 como los resultados obtenidos coinciden con la curva de desempeño teórico.

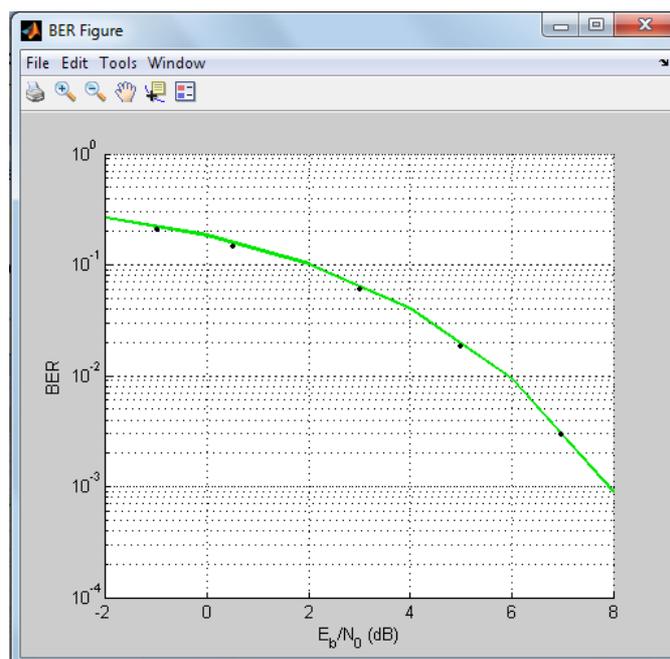


Figura 4.11 Desempeño del sistema con tasa de bits de 10Mbps y atenuación

Ahora con la adición del otro parámetro que es la dispersión observaremos que el pulso se distorsiona un poco, aumentando de esta manera el BER. Así observaremos en la tabla 4.6 como cambian los valores de BER para los correspondientes  $E_b/N_0$ .

Pot. Ruido (W)	$E_b/N_0$ (dB)	BER
1.62 pW	-1	0.27
1.12 pW	0.5	0.21
0.62 pW	3	0.11
0.4 pW	5	0.06
0.25 pW	7	0.02

Tabla 4.6 BER con atenuación, dispersión y tasa de bits de 10Mbps

Podemos observar en la figura 4.12 que existen dos curvas, la curva de color verde que muestra el desempeño teórico de un sistema DPSK y una curva de color naranja que representan el nuevo desempeño del sistema con dispersión.

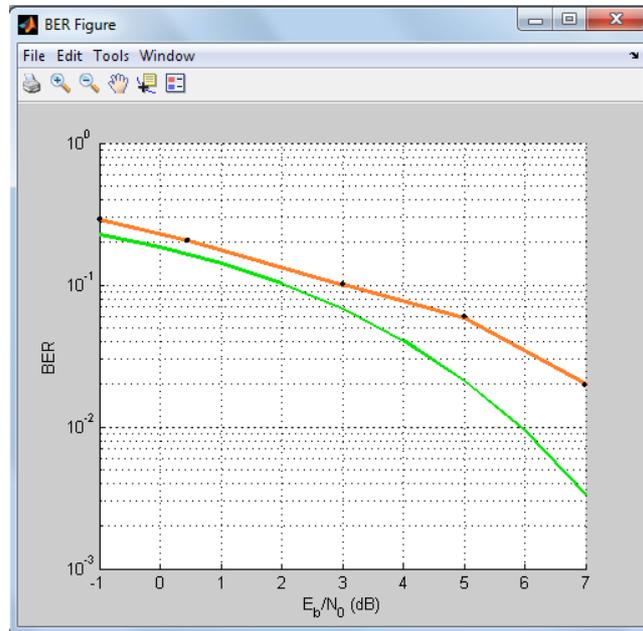


Figura 4.12 Desempeño del sistema con tasa de bits de 10Mbps, atenuación y dispersión

Como observamos la nueva curva no sólo que demuestra un peor desempeño sino que también cambia su forma. Todo esto se debe a que la dispersión ensancha los pulsos provocando que no se distinguen con exactitud los pulsos recibidos y además se interpongan un pulso sobre otro. En la figura 4.12 y 4.13 se puede demostrar esto observando el diagrama de ojo del pulso de una señal con SNR de 3db sin dispersión y con dispersión.

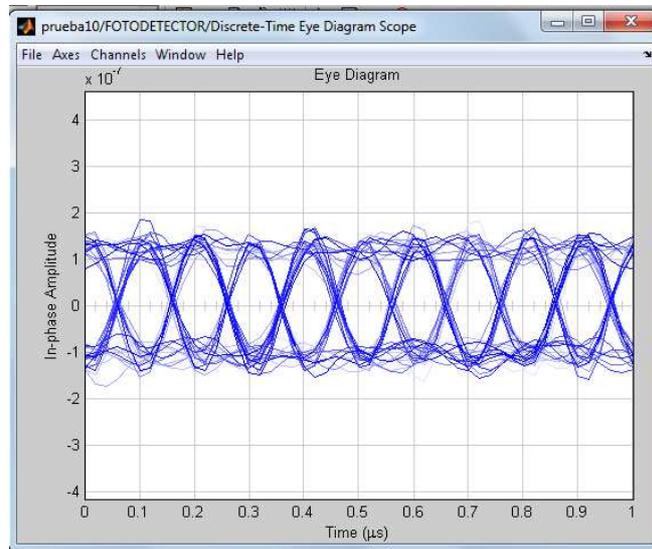


Figura 4.13 Diagrama de ojo del pulso con SNR de 3db y sin dispersión

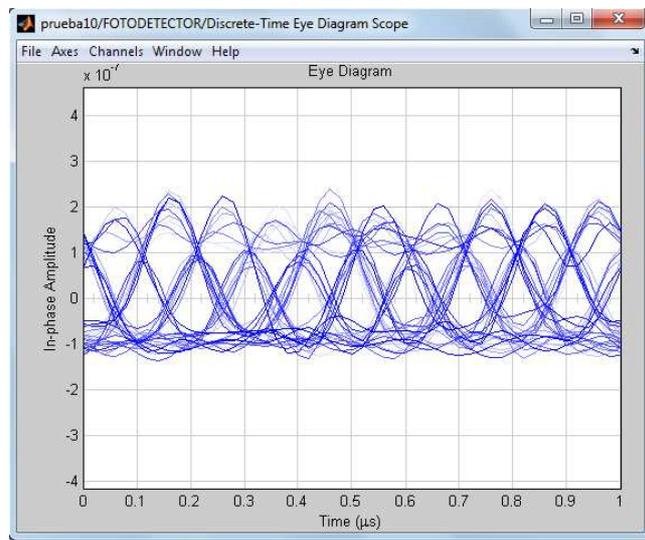


Figura 4.14 Diagrama de ojo del pulso con SNR de 3db y con dispersión

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

1. Analizando los resultados de mi simulación, podemos deducir que la atenuación y dispersión son dos parámetros muy importantes en la fibra óptica, por lo que debemos saber escoger bien el tipo de fibra a utilizar según el caso, ya que se podría usar una fibra que trabaje con alta atenuación o dispersión y la distancia de la fibra sea muy corta, en éste caso nos afectaría bastante.
2. La atenuación de la fibra óptica aumenta dependiendo de la distancia de la fibra, es decir a mayor distancia mayor será la atenuación. Para los dos casos en donde se usa una atenuación de 0.35dB/km, es decir con distancias de 50 y 75 kilómetros, la atenuación a lo largo de la fibra óptica será de 17.5dB y 26.25dB respectivamente. Por lo tanto la atenuación es mayor cuando se usa la fibra de 75 kilómetros.

3. Mientras la atenuación es un parámetro de la fibra que afecta a la amplitud de la señal, la dispersión es un parámetro que afecta el ancho del pulso, es decir ensancha la señal, en mi caso al pulso.
  
4. La dispersión es un parámetro que afecta a la señal pero que depende tanto de la distancia de la fibra como de la tasa de bits a transmitir. Por ejemplo tanto en la simulación de mi sistema como en la simulación del caso 1 la dispersión no afecta a la señal ya sea por la corta longitud de la fibra o por la tasa de transmisión pero en la simulación del caso 2 se observa claramente como la dispersión afecta la señal debido a que la tasa de transmisión se aumenta.
  
5. Mientras mayor es la tasa de bits a transmitir menor es la relación  $E_b/N_0$ , es por esto que comparando el caso 1 y caso 2 observamos que aunque ambos casos tienen el mismo SNR, el  $E_b/N_0$  en el caso 2 es menor y por lo tanto el BER es mayor.

6. En la simulación del caso 2 se necesitan 10 decibeles más que en el caso 1 para obtener la misma BER ya que cuando se trabaja con una tasa de 10Mbps la diferencia entre  $E_b/N_0$  y SNR son 4dB mientras que cuando se trabaja con una tasa de 1 Mbps la diferencia es de 14dB.
  
7. En el caso 2 la dispersión afecta en gran proporción a mi pulso y por lo tanto la BER es un poco mala con relación al caso 1, esto no significa que no se pueda usar esta tasa de bits con esta dispersión ya que en la actualidad existen métodos que reducen este daño ya sea modificando la forma del pulso, utilizando un laser con ancho espectral mas angosto o utilizando algún tipo de codificación en el transmisor para que el pulso sea poco afectado por la dispersión.

## RECOMENDACIONES

1. Escoger muy bien el tipo de fibra óptica a utilizar, si son distancias muy largas la mejor fibra es la monomodo, en cambio para distancias cortas la fibra multimodo es la fibra adecuada para la transmisión de información.
2. Tener en cuenta que al cambiar algún parámetro como la longitud de la fibra, atenuación o tasa de bits en el sistema no se descuadre del eje  $y=0$  la señal en el receptor ya que luego la señal se comparará con un nivel de umbral igual a cero y necesita estar centrada tanto en el semieje positivo como negativo.
3. Tener en cuenta que al cambiar la tasa de bits de 1Mbps a 10Mbps no sólo se debe modificar la frecuencia de los bits en el generador de bits sino también en el comparador en el receptor, caso contrario no habrá convergencia ya que se estarán comparando bits con distinto período.
4. Se recomienda utilizar un fotodetector que tenga un menor ruido térmico en el caso que se aumente la tasa de bits, ya que recordemos que al aumentar la tasa de bits la relación  $E_b/N_0$  disminuye y por lo tanto el BER aumenta.

5. Se recomienda utilizar adecuadamente las unidades ya sean de potencia o corriente utilizando los sufijos mili, micro, nano, pico, femto y atto con sus respectivas unidades m, u, n, p, f, a cuando sea posible y necesario.
  
6. Se recomienda no olvidar colocar los datos que sean posible en los gráficos como por ejemplo los valores de SNR en los gráficos de diagrama de ojo y también no olvidar referenciar todo el documento con los textos que se ha utilizado.

# ANEXOS

## ANEXO A

Características del LED a utilizar

PARAMETER	SYMBOL	MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	UNITS	TEST CONDITIONS
Fiber Coupled Power (HFE4874-222) Peak, T <sub>A</sub> =25°C Peak over temp.	P <sub>oc</sub>	-17.3 -18.9	-13.8	-11.4 -10.8	dBm	I <sub>F</sub> = 100 mA Peak 50/125 μm fiber, NA = 0.20
Fiber Coupled Power Peak, T <sub>A</sub> =25°C Peak over temp.	P <sub>oc</sub>	-18.8 -19.8	-15.8	-13.8 -12.8	dBm	I <sub>F</sub> = 60 mA Peak 50/125 μm fiber, NA = 0.20
Fiber Coupled Power Peak, T <sub>A</sub> =25°C Peak over temp.	P <sub>oc</sub>	-13.5 -15.1	-10.0	-7.6 -7.0	dBm	I <sub>F</sub> = 100 mA Peak 62.5/125 μm fiber, NA = 0.275
Fiber Coupled Power Peak, T <sub>A</sub> =25°C Peak over temp.	P <sub>oc</sub>	-15.0 -16.0	-12.0	-10.0 -9.0	dBm	I <sub>F</sub> = 60 mA Peak 62.5/125 μm fiber, NA = 0.275
Fiber Coupled Power (HFE4874-223) Peak, T <sub>A</sub> =25°C Peak over temp.	P <sub>oc</sub>	-15.0 -16.0	-10.5	-9.0 -8.0	dBm	I <sub>F</sub> = 60 mA Peak 62.5/125 μm fiber, NA = 0.275
Forward Voltage	V <sub>F</sub>		1.84		V	I <sub>F</sub> = 100 mA
	V <sub>F</sub>	1.48	1.70	2.09	V	I <sub>F</sub> = 60 mA
Forward Voltage Temperature Coefficient	ΔV <sub>F</sub> /ΔT		-0.18		mV/°C	I <sub>F</sub> = 100 mA
	ΔV <sub>F</sub> /ΔT		-0.22		mV/°C	I <sub>F</sub> = 60 mA
Reverse Voltage	B <sub>VR</sub>	1.8	3.8		V	I <sub>R</sub> = 10 μA, T <sub>A</sub> =25°C
Peak Wavelength	λ <sub>P</sub>	810	856	895	nm	I <sub>F</sub> = 100 mA DC
	λ <sub>P</sub>	810	850	885	nm	I <sub>F</sub> = 60 mA DC
Spectral Bandwidth (FWHM)			55		nm	I <sub>F</sub> = 100 mA DC
			50		nm	I <sub>F</sub> = 60 mA DC
Response Time	t <sub>R</sub> /I <sub>F</sub>		4.0	6.3	ns	I <sub>F</sub> = 60 mA peak, No Prebias
P <sub>O</sub> Temperature Coefficient	ΔP <sub>O</sub> /ΔT		-0.017		dB/°C	I <sub>F</sub> = 100 mA
	ΔP <sub>O</sub> /ΔT		-0.006		dB/°C	I <sub>F</sub> = 60 mA
Series Resistance	r <sub>S</sub>		4.0		Ω	DC
Device Capacitance	C		40		pF	V <sub>R</sub> = 0 V, f = 1 MHz
Thermal Resistance			260		°C/W	Heat sunked

## ANEXO B

Archivo de inicialización de la simulación que contiene los parámetros de la fibra

```
% Archivo de Inicializacion para transferir datos y parametros a un
modelo Simulink.
% Este archivo incluye los parametros para poder resolver la
propagación lineal en una fibra monomodo SMF usando el metodo Split
step Fourier
% Los efectos siguientes son incluidos: atenuacion y dispersion de
velocidad de grupo (GVD)
clear all
close all
% CONSTANTE
c = 3e8; % velocidad de la luz(m/s)
% PARAMETROS
numbitspersymbol = 1; % numero de bit por simbolo
FWHM= 1e-6 % ancho de pulso RC o rectangular
%halfwidth = FWHM/1.6651; % usando pulso Gaussiano
halfwidth=FWHM; % usar para pulso rectangular o RC
bitrate=1/halfwidth; % Hz usando los parametros de arriba approx. 1
Gbps
baudrate=bitrate/numbitspersymbol;
signalbandwidth=baudrate; % tasa de simbolos o ancho de banda R
dlambda = 55e-9; %ancho espectral de fuente de luz en (m) -
0.1nm
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
PRBSlength=2^5;
% Nota: ventana FFT en el tiempo (=nt*dt) = PRBSlength * FWHM...
% FFTlength nt = PRBSlength/block * numbersamples/bit=PRBSlength *
% (FWHM/dt)
% num_samplesperbit=FWHM/dt deberia ser minimo 8 - 16 muestras/bit
num_samplesperbit=200; % # muestras por simbolo o bit siempre
es un numero expresado como 2^n
dt=FWHM/num_samplesperbit; % tiempo de muestreo (s); % time step
(ps)SAMPLE TIME
nt=PRBSlength*num_samplesperbit; % longitud FFT
dz=0.1; % tamano de paso en distancia (km)
%nz=200; % number of z steps
nz = 200;
% una distancia total de L = dz * nz = 20 km

% OPTICAL PARAMETERS
```

```

lambda=850e-9; %longitud de onda de la fuente de luz laser 1550 nm

optical_carrier=c/lambda; % frecuencia optica
w = 2*pi*[(0:nt/2-1), (-nt/2:-1)]'/(dt*nt); %frecuencia angular

alpha_indB=0.35; % atenuacion (dB/km)
D = 0.002; % (equivale a 2ps/nm/km) GVD (s/m*Km);
debido a que el tamaño de paso es en km

% CaLCULATED QUANTITIES
T = nt*dt; % tamaño de ventana FFT (s)
% deberia ser 10-20 veces el

tamano % de ancho de pulso

alpha_loss=alpha_indB/4.343; % alpha (1/km)
beta2=D*lambda^2/(2*pi*c); % beta2 (s^2/m)
dw = 2*pi*c*dlambda/lambda^2;

betap=[0 0 beta2]';

```

## ANEXO C

### Características de la fibra óptica a utilizar (G.652)

Optical characteristic		G.652.D	G.657.A	G.657.B
Mode Field Diameter (um)	1310 nm	9,0 ± 0,4		8,5 - 9,3
	1550 nm	10,1 ± 0,5		9,1 - 10,1
Attenuation Coefficient (dB/Km)	1310 nm		≤ 0,35	
	1383 nm		≤ 0,35	
	1460 nm		≤ 0,25	
	1550 nm	≤ 0,22		≤ 0,21
	1625 nm		≤ 0,23	
Chromatic Dispersion Coefficient (ps/nm.Km)	1285 - 1330 nm		≤  3	
	1550 nm		≤ 18	
	1625 nm		≤ 22	
	1530 - 1565 nm 1565 - 1625 nm			
Zero Dispersion Wavelength (nm)		1300 - 1322		1300 - 1324
Zero Dispersion Slope (ps/nm <sup>2</sup> Km)		≤ 0,090		≤ 0,092
Dispersion Slope (ps/nm <sup>2</sup> Km)	1550 nm			
Effective Area (um <sup>2</sup> )				
Group Index of Refraction	1310 nm	1,467		
	1550 nm	1,468		
Cable Cut-Off Wavelength			≤ 1260	
PMD (ps/v Km)	1550 nm		< 0,1	
Attenuation with Bending (1550 nm)	1 turn / 10 mandrel		≤ 0,75	≤ 0,10
	10 turn / 15 mandrel		≤ 0,25	≤ 0,03

## ANEXO D

Características del fotodetector a utilizar

	Type C30807		
	Min	Typ	Max
<b>Breakdown Voltage, <math>V_{BR}</math></b>	100	-	-
<b>Responsivity:</b>			
At 900 nm	0.5	0.6	-
At 1060 nm	0.1	0.15	-
<b>Quantum Efficiency:</b>			
At 900 nm	70	85	-
At 1060 nm	12	15	-
<b>Dark Current, <math>i_d</math>: See Figure 2</b>			
At $V_R = 10$ V	-	$2 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-8}$
At $V_R = 45$ V	-	$1 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-8}$
<b>Noise Current, <math>i_n</math>: See Figure 3</b>			
$f = 1000$ Hz, $\Delta f = 1.0$ Hz	-	$6 \times 10^{-14}$	$4.2 \times 10^{-13}$
<b>Noise Equivalent Power (NEP):</b>			
$f = 1000$ Hz, $\Delta f = 1.0$ Hz			
At 900 nm	-	$1 \times 10^{-13}$	$8 \times 10^{-13}$
At 1060 nm	-	$4 \times 10^{-13}$	$3.2 \times 10^{-12}$
<b>Capacitance, <math>C_d</math>: See Figure 4</b>	-	2.5	3
<b>Rise Time, <math>t_r</math>:</b>			
$R_L = 50 \Omega$ , $\lambda = 900$ nm,			
10% to 90% points	-	3	5
<b>Fall Time:</b>			
$R_L = 50 \Omega$ , $\lambda = 900$ nm,			
10% to 90% points	-	6	10

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Haykin Simon, Sistemas de Comunicación, Editorial Limusa, 2002.
- [2] Luque Joaquín, Modulación de Señales Digitales, Universidad de Sevilla, Departamento de Tecnología Electrónica, Servicio de Publicaciones Sevilla, 1995.
- [3] Briceño Márquez José, Transmisión de Datos, Tercera Edición, 2005.
- [4] Hornero Roberto, García María, Teoría de la Comunicación, Universidad de Valladolid, 2010.
- [5] Faúndez Marco, Sistemas de Comunicaciones, Marcombo S.A. Segunda Edición, 2001.
- [6] Sklar Bernard, Digital Communications, Pretince Hall, Second Edition, 2004.
- [7] Proakis John, Communications Systems Engineering, Pretince Hall, Second Edition, 2002.
- [8] Ghatak Ajoy, Introduction to Fiber Optics, Cambridge University Press, 1995.
- [9] Bailey David, Fiber Optics, Newnes First Edition, 2003.
- [10] Agrawal Govind, Fiber-Optic Communication System, Wiley Interscience Third Edition, 2002.

- [11] Keiser Gerd, Optical Fiber Communications, McGraw Hill, Second Edition, 1991.
- [12] González Edgar, El Láser Principios Básicos, Universidad Santo Tomás Colombia, 2005.
- [13] España María, Comunicaciones Ópticas, Ediciones Díaz de Santos, Primera Edición, 2005.
- [14] Huidobro José, Sistemas Telemáticos, Thomson Paraninfo Tercera Edición, 2003.
- [15] Chomycz Bob, Instalaciones de Fibra Óptica, McGraw Hill, Primera Edición, 1998.
- [16] Dpto. Ingeniería Producto Cables Ópticos TELNET, Curso de Fibra Óptica, <http://www.telnet-ri.es/download/preventa/FO-COP-FTTH/CursoFOv1/CursoFO-1-Conceptos.pdf>, Junio 2005.
- [17] Ziemer Rodger, Introduction to Digital Communication, Prentice Hall Second Edition, 2001.
- [18] Acosta José, Manual de Introducción a Simulink, Universidad de Sevilla, 2004.

- [19] TELNET Redes Inteligentes SA, Fibra Monomodo G.652.D Características Generales,[http://www.telnetri.es/fileadmin/user\\_upload/hojas\\_producto/CABLES\\_FO/Fibra\\_SM\\_G.652.D\\_ES\\_V1.0.pdf](http://www.telnetri.es/fileadmin/user_upload/hojas_producto/CABLES_FO/Fibra_SM_G.652.D_ES_V1.0.pdf)
- [20] Palais Joseph, Fiber Optic Communications, Prentice Hall Fourth Edition, 2001.