



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“Simulación de un sistema de transmisión OOK bajo fibra óptica”

TESINA DE SEMINARIO

Previo a la obtención del título de:

INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Presentada por:

Gisella Marola Señalin Aguirre

GUAYAQUIL - ECUADOR

2012

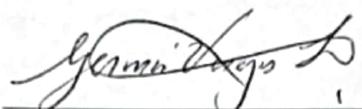
AGRADECIMIENTO

A Dios por guiar cada uno de mis pasos y sobre todo por darme la oportunidad de realizar cada una de mis metas y sueños en compañía de mi hermosa familia, quienes son la inspiración y motivación de cada uno de los días de mi vida, al Ing. German Vargas por la guía prestada en el desarrollo de este proyecto y a todas las personas que de una u otra forma hicieron posible la culminación con éxito de esta etapa de mi vida.

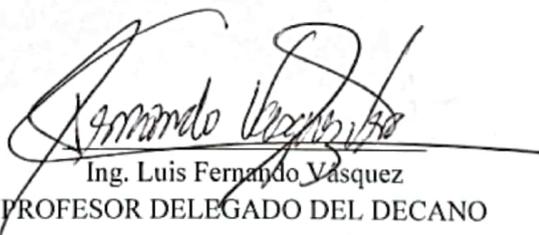
DEDICATORIA

Dedico este trabajo con todo mi amor a Dios, a mis padres Mercedes y Leonardo, a mis hermanos Julio y Priscila, a mis papitos Simón y Esperanza, a mi mamita Sarita Aguirre, por haber hecho de mí la persona que soy ahora, por creer en mí, brindarme su amor y apoyo incondicional durante toda mi vida y por representar mi más grande orgullo, los amo con todo mi corazón.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

A handwritten signature in black ink, appearing to read "German Vargas", written over a horizontal line.

Ing. German Vargas
PROFESOR DEL SEMINARIO

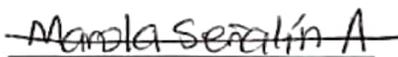
A handwritten signature in black ink, appearing to read "Luis Fernando Vasquez", written over a horizontal line.

Ing. Luis Fernando Vasquez
PROFESOR DELEGADO DEL DECANO

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este trabajo de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Gisella Marola Señalín Aguirre.

RESUMEN

El presente trabajo trata sobre la simulación de un sistema de transmisión OOK bajo fibra óptica, el cual permite analizar el comportamiento de la transmisión con respecto a diferentes parámetros que pueden alterar el funcionamiento del sistema de comunicaciones.

Este proyecto es de gran utilidad ya que gracias a su implementación se generara una herramienta de trabajo que permita al usuario ahorrar tiempo ya que es un banco de pruebas de comunicaciones ópticas que permite elegir parámetros para observar variaciones en la simulación.

Además puede ser utilizado como una herramienta didáctica para que los estudiantes puedan trabajar. Esta simulación es un paso previo para posteriormente analizar parámetros más complejos y avanzados.

Para la simulación se va a utilizar herramientas computacionales como MATLAB SIMULINK.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	II
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ABREVIATURAS.....	XV
SIMBOLOGÍA.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	XVII
CAPÍTULO 1	
1. SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA.....	1
1.1. Componentes de un enlace óptico.....	2
1.1.1 Fuentes de Luz.....	3
1.1.1.1 Diodos emisores de luz (LED).....	4

1.1.1.2	Diodos laser (LD).....	11
1.1.2	Fotodetectores.....	18
1.1.2.1	Fotodiodo PIN.....	22
1.1.2.2	Fotodiodo de Avalancha (APD).....	29
1.1.3	Fibra óptica.....	34
1.1.3.1	Fibra multimodo	35
1.1.3.2	Fibra monomodo.....	40
1.1.4	Factores que limitan la transmisión por fibra óptica.....	42
1.1.4.1	Atenuación.....	43
1.1.4.2	Ancho de banda.....	47
1.1.4.3	Dispersión.....	49
1.1.5	Componentes de conexión y acople.....	51
1.1.5.1	Acoplador.....	51
1.1.5.2	Conector.....	53
1.1.5.3	Empalme.....	54

CAPÍTULO 2

2.	MODULACIÓN Y RUIDO EN SISTEMAS ÓPTICOS.....	55
2.1	Modulación Diodo emisor de luz LED.....	56
2.1.1	Modulación analógica.....	56
2.1.2	Modulación digital.....	58

2.2	Formatos de modulación analógica.....	59
2.2.1	Modulación AM.....	59
2.2.2	Modulación FM.....	60
2.3	Formatos de modulación digital.....	61
2.3.1	Modulación OOK.....	62
2.3.2	Modulación por código de pulso (PCM).....	63
2.3.2.1	Formato de codificación no retorno cero (NRZ).....	63
2.3.2.2	Formato de codificación retorno cero (RZ).....	64
2.4	Ruido y detección.....	65
2.4.1	Ruido térmico.....	65
2.4.2	Ruido de disparo.....	67
2.4.3	Relación señal a ruido (SNR).....	68
2.4.4	Tasa de error (BER).....	69

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS CON TRANSMISIÓN OOK MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE MATLAB SIMULINK.....	71
---	-----------

3.1.	Criterio de diseño de un sistema de comunicaciones ópticas con transmisión OOK.....	73
3.1.1	Presupuesto de tiempo de subida.....	73
3.1.2	Presupuesto de potencia.....	75
3.2.	Desarrollo del transmisor óptico.....	78
3.2.1	Características y diagrama de bloques.....	78
3.2.2	Condiciones de diseño de los componentes utilizados...	79
3.2.3	Especificaciones de funcionamiento.....	81
3.3.	Desarrollo del canal de comunicaciones.....	88
3.3.1	Características y diagrama de bloque.....	88
3.3.2	Condiciones de diseño de los componentes utilizados...	90
3.3.3	Especificaciones de funcionamiento.....	91
3.4.	Desarrollo del receptor óptico.....	97
3.4.1	Características del diagrama de bloque.....	97
3.4.2	Condiciones de diseño de los componentes utilizados...	98
3.4.3	Especificaciones de funcionamiento.....	99
3.4.4	Evaluación de la señal en recepción.....	103
3.4.4.1	Análisis diagrama de ojo.....	104
3.4.4.2	Tasa de error.....	107
3.4.4.3	Retardo de la señal.....	108

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

APÉNDICE

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de bloques básico de un sistema de comunicaciones óptica.....	2
Figura 1.2: Semiconductor dopado con impurezas.....	6
Figura 1.3: Doblamiento de las bandas de energía.....	6
Figura 1.4: LED alimentado en directa.....	6
Figura 1.5: Curva característica de un diodo LED	9
Figura 1.6: Diodo de emisión lateral de luz.....	10
Figura 1.7: Mejorar del LD frente al LED.....	12
Figura 1.8: Emisión de un fotón estimulada.....	14
Figura 1.9: Espectro de emisión de un laser a 1500 nm.....	15
Figura 1.10: Configuración interna de un diodo laser (LD).....	16
Figura 1.11: Modelo de un láser normal.....	18
Figura 1.12: Tiempo de levantamiento de un detector óptico.....	20
Figura 1.13: Diagrama de un fotodetector diodo PIN y distribución del campo eléctrico al pasar por el mismo.....	23

Figura 1.14: Característica tensión/corriente de polarización de un fotodetector.....	23
Figura 1.15: Fotodiodo PIN.....	25
Figura 1.16: Terminal receptor.	27
Figura 1.17: Comparación entre las configuraciones y características V/I de fotodetectores PIN y APD para comunicaciones ópticas.....	30
Figura 1.18: Estructura de un fotodiodo de avalancha (APD) a base de InGaAsP (la región de avalancha esta en la unión P+ -N InP).....	34
Figura 1.19: Rayos meridionales.....	37
Figura 1.20: Rayos oblicuos.....	38
Figura 1.21: Transmisión de la luz por el interior de la fibra óptica multimodo (MM) de índice escalonado.....	38
Figura 1.22: Transmisión de la luz por el interior de la fibra óptica multimodo (MM) de índice gradual.....	40
Figura 1.23: Transmisión de la luz por el interior de la fibra óptica monomodo (SM).....	41
Figura 1.24: Curva de atenuación de una fibra óptica monomodo (SM).....	45

Figura 1.25: Ancho de banda de una fibra óptica multimodo (MM), donde el pulso de luz se ensancha.....	48
Figura 1.26: Ancho de banda de una fibra óptica monomodo (SM), donde el pulso de luz se ensancha.....	48
Figura 1.27: Dispersión del material o cromática de una fibra óptica monomodo (SM), con ensanchamiento del pulso emitido.....	50
Figura 1.28: Dispersión modal de una fibra óptica multimodo (MM), con ensanchamiento del pulso emitido.....	50
Figura 1.29: Acoplador en T.....	52
Figura 1.30: Acoplador en estrella.....	52
Figura 1.31: Conector óptico.....	53
Figura 1.32: Empalme óptico por fusión.....	54
Figura 2.1: Modulación analógica de un LED.....	56
Figura 2.2: a) Corriente del LED b) Potencia de salida resultante.....	57
Figura 2.3: Modulación Digital de un LED.....	58
Figura 2.4: Forma de onda AM.....	59
Figura 2.5: Forma de onda FM.....	61
Figura 2.6: Modulación OOK.....	62

Figura 2.7: Señal NRZ y RZ.....	64
Figura 2.8: Densidad espectral del valor cuadrático medio de la tensión de ruido.....	66
Figura 2.9: a) Fluctuaciones de la señal recibida en el receptor b) Densidades de probabilidad de “1” y “0”.....	70
Figura 3.1: Transmisor óptico Simulink.....	79
Figura 3.2: Potencia Vs. Corriente.....	80
Figura 3.3: Potencia Singlemode ELED Module.....	81
Figura 3.4: Parámetros Clock subsystem.....	82
Figura 3.5: Señal de entrada.....	83
Figura 3.6: Estructura interna del modulador OOK.....	84
Figura 3.7: Señal modulada OOK.....	85
Figura 3.8: Estructura interna del LED.....	86
Figura 3.9: Respuesta magnitud (azul) y fase (verde) del filtro pasa bajo del LED.....	86
Figura 3.10: Estructura del canal de comunicaciones.....	90
Figura 3.11: Conversión de campo eléctrico a potencia.....	92

Figura 3.12: Parámetro dimensión de campo eléctrico.....	92
Figura 3.13: Buffer canal de comunicación.....	92
Figura 3.14: Parámetros y función del canal de comunicación.....	94
Figura 3.15: Un-buffer bloque Simulink.....	94
Figura 3.16: a) Señal óptica transmisor b) Señal óptica atenuada 0.22 dB/km.....	96
Figura 3.17: Factor de pérdida.....	96
Figura 3.18: Estructura del receptor óptico.....	98
Figura 3.19: Estructura fotodetector.....	100
Figura 3.20: Estructura demodulador.....	102
Figura 3.21: Circuito de decisión.....	102
Figura 3.22: a) Diagrama de ojo b) Selección del nivel de discriminación...	105
Figura 3.23: Cálculo Bit Error Rate.....	107
Figura 3.24: Retardo de señal de entrada.....	108
Figura 3.25: Generador de ruido en el receptor óptico.....	108
Figura 3.26: Señal detectada y contribución de ruido.....	109

Figura 3.27: Diagrama de ojo del sistema óptico con ruido.....	110
Figura 3.28: Cálculo Bit Error Rate.....	111
Figura 3.29: Probabilidad de Error de Bit.....	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Comparación entre un LD y LED.....	13
Tabla 1.2: Porcentaje de potencia de salida en función de la pérdida en (dB).....	44
Tabla 3.1 Requerimientos enlace óptico.....	72
Tabla 3.2 Presupuesto de tiempo de subida.....	75
Tabla 3.3 Presupuesto de potencia.....	77
Tabla 3.4: Características Singlemode ELED Module.....	80
Tabla 3.5: Potencia Singlemode ELED Module.....	81
Tabla 3.6: Parámetros del generador de datos de la simulación.....	83
Tabla 3.7: Parámetros de la portadora de la simulación.....	84
Tabla 3.8: Características de filtro pasa bajo LED.....	86
Tabla 3.9: Perdidas por acople transmisor.....	87
Tabla 3.10: Capacidad de información enlace óptico.....	88
Tabla 3.11: Características SMF-28 single-mode optical fiber.....	91
Tabla 3.12: Perdidas canal de comunicación.....	95

Tabla 3.13: Características fotodetector J16 series.....	99
Tabla 3.14: Perdidas receptor óptico.....	101
Tabla 3.15: Bit Error Rate.....	106
Tabla 3.16: Bit Error Rate sistema con ruido, $E_b/N_0 = 10$	111
Tabla 3.17: Análisis SNR.....	112

ABREVIATURAS

SIGLAS	SIGNIFICADO
DL	Diodo Laser
LED	Diodo Emisor de Luz
APD	Fotodiodo de avalancha
CAG	Circuito automático de ganancia
GaAlSb	Galio Aluminio de Antimonio
CdHgTe	Cadmio Mercurio Teluro
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
SM	Single Mode
OOK	On-off keying
DC	Corriente Directa
PCM	Modulación por código de pulso
NRZ	No Retorno cero
RZ	Retorno cero
SNR	Relación señal a ruido
BER	Bit Error Rate

SIMBOLOGÍA

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
λ	Longitud de onda
τ_r	Tiempo de vida portadores
GHz	Giga-hertzios
R	Resistor
nF	Nano-Faradio
C	Capacitor
dB	decibelios
dBm	Mili-decibelios
μm	Micro-metros
nm	Nano-metros
fc	Frecuencia de Corte
Hz	Hertz
mW	Mili-vatios
mA	Mili-amperios
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
$^{\circ}\text{K}$	Grados Kelvin
Π	Pi
nS	Nano-Segundo
ρ	Responsividad
Mbps	Mega-bits por segundo

INTRODUCCIÓN

Todo sistema de comunicación óptica está diseñado con el fin de transmitir información de manera eficiente a altas velocidades de transmisión. El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un sistema de comunicación óptica que tenga las características antes mencionadas, pero que además sea capaz de evitar la distorsión de la señal óptica.

La fibra óptica debido a sus muchas propiedades favorables tales como su gran capacidad de transmisión, reducida atenuación de la señal óptica, inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, es el medio ideal para que el sistema de comunicación cumpla con las características que nuestro sistema de comunicación requiere.

Los primeros capítulos del presente trabajo explican conceptos básicos y esenciales para entender el funcionamiento del sistema de comunicación óptica. La siguiente parte será la explicación de su implementación y los pasos que se siguieron para la misma. La descripción detallada de cada etapa del sistema de comunicación óptica incluye: diseño y estructura del diagrama de bloques, variación de parámetros, análisis del comportamiento de la transmisión de señales ópticas con respecto a diferentes parámetros variables que intervienen en la propagación de señales luminosas por fibra

óptica como atenuación, dispersión, relación señal a ruido, tasa de datos, tasa de error de bits y de los efectos lineales de la fibra sobre los pulsos ópticos, su modificación y desempeño de la señal óptica.

CAPÍTULO 1

1. SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA

El presente capítulo describirá la fundamentación teórica de los sistemas de comunicación ópticas, específicamente el del funcionamiento general de un enlace de telecomunicaciones óptico punto a punto, para lo cual se verán las características principales de los elementos ópticos, electro-ópticos y opto-electrónicas que lo conforman. Estos elementos son un sistema óptico y un sistema electrónico de control que se desarrolló en MatLab -Simulink para la simulación.

1.1 Componentes de un enlace óptico

Los componentes básicos de un sistema de comunicación mediante enlace óptico son mostrados en el diagrama de bloques de la figura 1.1, donde el sistema electrónico genera una señal electrónica de información, que después debe modularse en amplitud a un dispositivo emisor de luz, generando una portadora luminosa con longitud de onda λ . La señal luminosa se transmite por cable de fibra óptica hacia el receptor, en donde, mediante un fotodiodo o fotocelda es transformada en una señal eléctrica, la cual es procesada por un sistema electrónico recuperando la señal de información.

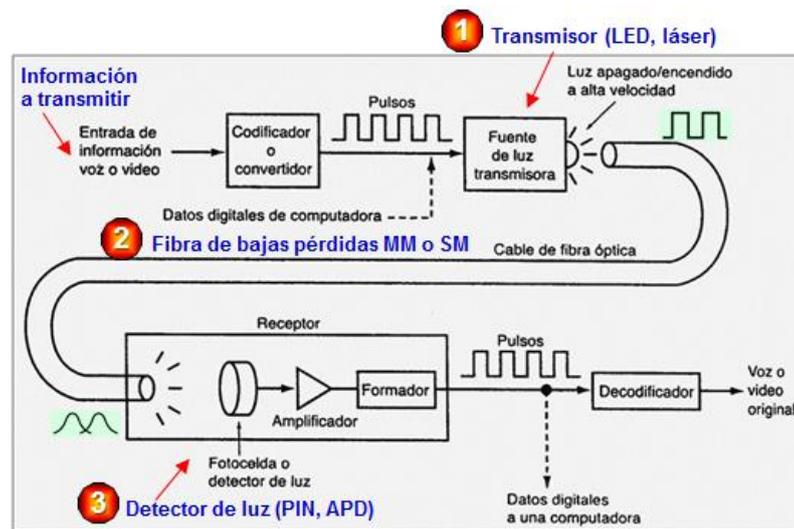


Figura 1.1: Diagrama de bloques básico de un sistema de comunicaciones óptica. [1]

A continuación se explican las características más importantes de los dispositivos emisores de luz y de los dispositivos Fotodetectores, los cuales son los elementos electroópticos y optoelectrónicas en un el enlace de telecomunicación óptico punto a punto.

1.1.1 Fuentes de luz

Las fuentes de luz también conocidas como fuentes luminosas se clasifican en naturales y artificiales. La fuente natural de luz es obtenida por el Sol, mientras que las artificiales citaremos las de incandescencia y las de luminiscencia. Donde las luminosas se encargan de generar la señal para ser acoplada y posteriormente enviada a través de la fibra óptica. Donde se debe garantizar la no presencia de dispersión cromática para así poder evitar la descomposición del haz en una franja de colores que se logra al asumir un intervalo de longitudes de onda reducido.

En la actualidad los dispositivos más utilizados para realizar esta función son los diodos láser (DL) y los diodos emisores de luz (LED), la elección del dispositivo a usar depende

directamente de las características del sistema a implementar.

1.1.1.1 Diodos emisores de luz LED.

Un diodo emisor de luz, es un dispositivo electrónico para comunicaciones ópticas, el cual se encarga de enviar la señal de información óptica a través de un medio de transmisión, que para el presente proyecto es el cable de fibra óptica, hacia el receptor. Un importante componente del procesado óptico de la información es la generación de señales ópticas.

Las señales ópticas se utilizan en comunicaciones donde los resultados que se obtienen al utilizar fibras ópticas para la transmisión de la información son mucho mejores que los obtenidos mediante la utilización de cables metálicos. Las señales ópticas son necesarias para la proyección de la información en dispositivos visualizadores. Los haces ópticos son necesarios también en sistemas de memoria basados en lectura óptica.

El diodo emisor de luz o LED es uno de los dispositivos fotónicos más sencillos y tiene importantes aplicaciones tanto para visualización como para generar señales ópticas en comunicaciones. Comparado con el diodo láser (LD) su fabricación es mucho más sencilla pues no requiere una cavidad óptica especial para su funcionamiento. Aunque sus desventajas son una baja señal óptica, un espectro muy ancho y de luz no coherente y una respuesta bastante lenta.

Ahora describiremos el funcionamiento del LED que electrónicamente es una unión p-n directamente polarizada (ver figura 1.4) en la que se inyectan electrones y huecos en una región en donde se recombinan. Cuando se une un semiconductor tipo n con un semiconductor tipo p, se tiene que tanto los electrones libres en la región n, como los huecos libres en la región p no tienen la suficiente energía para sobrepasar la barrera de unión y desplazarse hacia la región opuesta, como se muestra en la figura 1.2. En este punto, la energía potencial de los huecos, siendo opuesta a la de los electrones provoca un incremento en la barrera de unión, como se ilustra en la figura 1.3.

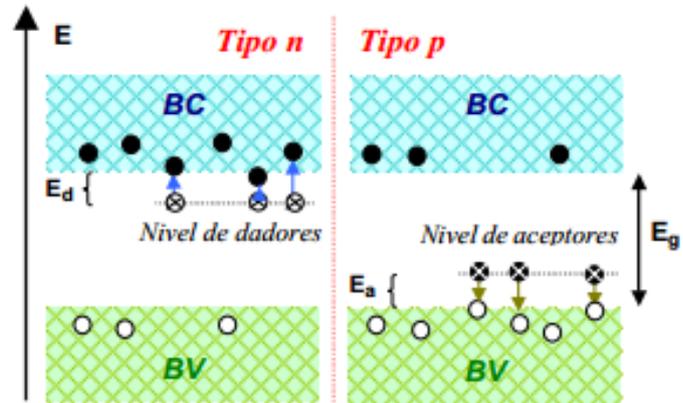


Figura 1.2: Semiconductor dopado con impurezas. [2]



Figura 1.3: Doblamiento de las bandas de energía. [2]

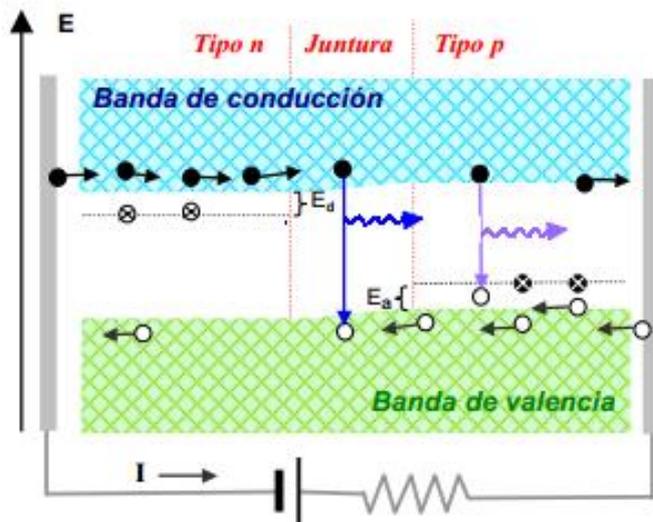


Figura 1.4: LED alimentado en directa. [2]

En la figura 1.4 podemos ver que al aplicar un voltaje directo en la unión y agregar impurezas dopantes para proveer una mayor cantidad de electrones y huecos durante la emisión, la barrera de separación se reduce. Si la energía suplida es al menos igual que la energía en la región prohibida (cantidad de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción) los electrones libres y los huecos libres tendrán la suficiente energía para moverse en la región de unión.

Cuando un electrón libre se une con un hueco libre en la barrera de unión, el electrón puede pasar a la banda de valencia. La energía perdida en la transición es convertida en energía óptica en forma de un fotón. En resumen, la emisión de un LED es causada por la recombinación de electrones y huecos que son introducidos en la unión de un semiconductor pn al aplicársele un voltaje directo.

En general, la recombinación se puede producir por procesos radiantes o no radiantes. En una recombinación radiante electrón y hueco se recombinan emitiendo un fotón.

En una recombinación no radiante, da lugar a calor o vibraciones de la estructura, para lo cual se puede definir un tiempo de vida para los portadores que se recombinen de forma radiante (τ_r) y otro para los que se recombinen de forma no radiante (τ_{nr}), siendo el tiempo de recombinación total:

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}} \quad (1.1)$$

De ahí que la eficiencia cuántica interna para el proceso radiante se define como:

$$\eta_{Qi} = \frac{\frac{1}{\tau_r}}{\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nr}}} \quad (1.2)$$

Como se dijo anteriormente el LED es un diodo p-n y como tal su curva característica es parecida a la de un diodo normal de unión p-n. Su tensión de codo está entre 1,2V y 2V dependiendo del material semiconductor. Su resistencia dinámica varía desde unos pocos ohms hasta decenas de ohms. La tensión de ruptura es de unos 5V.

En la figura 1.5 se muestra un factor de limitación muy importante para los LEDs, la potencia máxima disipable y su dependencia con la temperatura.

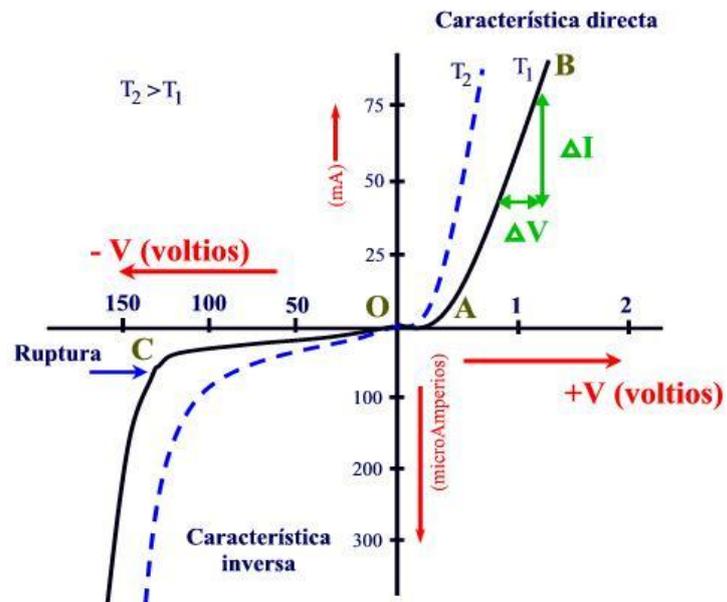


Figura 1.5: Curva característica de un diodo LED [3]

De acuerdo a lo descrito podemos deducir que es de suma importancia el acoplar una señal luminosa a una fibra óptica, dicho acoplamiento debe ser eficiente mediante un haz altamente colimado para un buen acoplamiento, para conseguirlo utilizamos una heteroestructura que transmite por su lado o borde (LED de emisión lateral), tal como se ilustra en la figura 1.6.



Figura 1.6: Diodo de emisión lateral de luz [4]

La estructura del Diodo de emisión lateral de luz, se asemeja a la del diodo láser, sólo que en el láser se debe diseñar de forma que se obtenga una cavidad óptica de alta calidad que produzca realimentación óptica. En este tipo de LED se añaden capas (recubrimientos) de materiales de gran anchura de la banda prohibida lo cual no únicamente confina a electrones y huecos a la capa activa, sino que también provoca que los fotones emitidos viajen a lo largo del eje del LED y emerjen por el borde del componente. Una variación escalón en el gap energético provoca una variación escalón de la constante dieléctrica y del índice de refracción de forma que, si estos son los adecuados, la onda óptica queda confinada en la zona activa (de forma similar a lo que sucedía en el caso de las guías de onda).

La parte posterior de la zona activa es reflectante y así también evita la pérdida de fotones por ella. Debido a la alta colimación del haz (30° de anchura en la perpendicular a la capa activa y 120° en la paralela a la capa activa) se mejora en gran medida la eficiencia del acoplamiento de su luz a fibras ópticas.

1.1.1.2 Diodos laser (LD)

Como se describió en el acápite anterior la emisión de fotones de un LED no guarda ninguna relación entre ellos, es decir que cada uno emite sin correlación alguna con los parámetros de los otros, cada uno tiene su energía, dirección, sentido y fase, independientemente de los parámetros de los demás fotones, sin embargo el láser tiene emisión coherente y en ésta cuando un fotón se emite tiene una correlación muy fuerte con los demás en todos los parámetros ya mencionados, debido a la emisión estimulada.

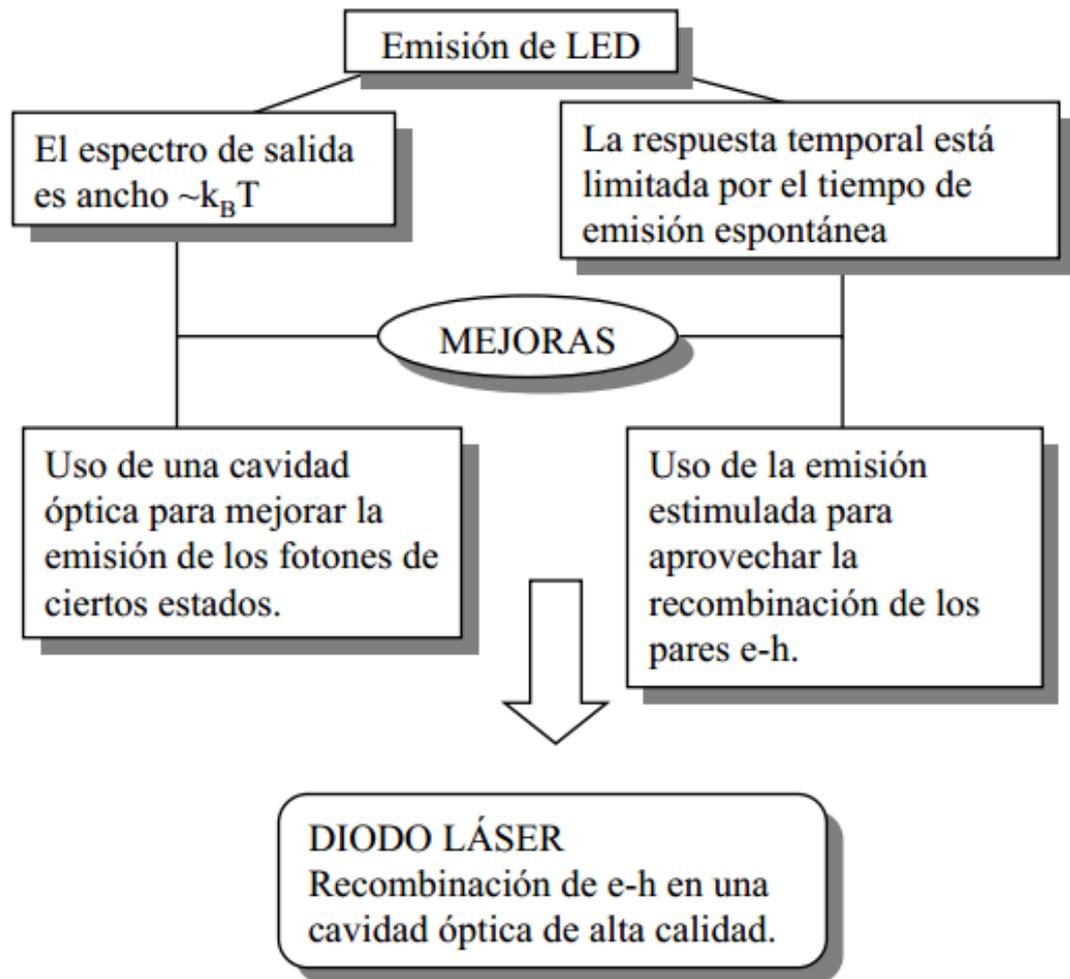


Figura 1.7: Mejorar del LD frente al LED.

En la tabla 1.1 se muestra la comparación entre el LD y LED, asimismo se mencionan 3 ventajas de un LD frente a un LED muy importantes: espectro de emisión muy estrecho, ancho de banda de hasta 50 GHz y un haz

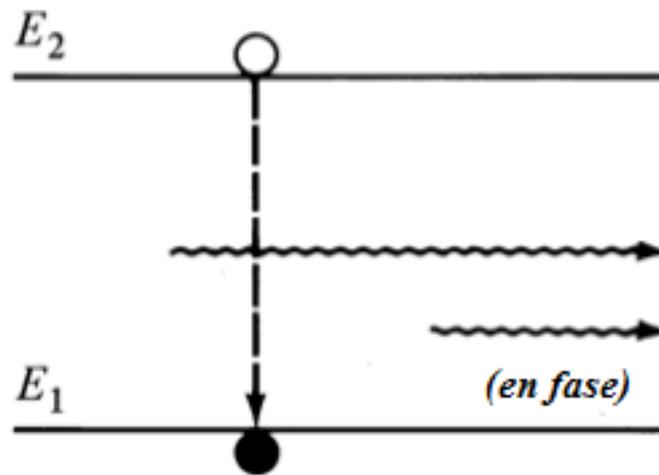
luminoso de mayor intensidad, en la figura 1.7 se muestra las mejoras del LD.

Características	LED	Láser
Potencia óptica (mW)	1	10
Potencia útil acoplada a la FO(mW)	0.3	3
Corriente de operación (mA)	100	30
Ancho de banda espectral (nm)	20 - 90	2- 10
Espectro de radiación		más monocromático
Ancho de banda eléctrico(posibilidad de modulación) (GHz)	0.1	10
Temperatura máxima de operación(°C)	80	50
Tipo de fibra	MM	MM, UM
Tiempo de subida (ns)	≈ 7	≈ 2
Perfil espectral	Gaussiano	Lambertiano
Longitud de onda (nm)	850 , 1300	1300, 1500
Tiempo de vida (horas)	1 000 000	100 000
Costo	menor	mayor
Complejidad del terminal	menor	mayor

Tabla 1.1: Comparación entre un LD y LED [5]

El descubrimiento de la emisión estimulada es otro de los hallazgos que le debemos a Albert Einstein, lo que describe

como una posibilidad en la interacción entre un fotón y un par electrón-hueco, como se muestra en la figura 1.8.



Emisión Estimulada
Stimulated emission

Figura 1.8: Emisión de un fotón estimulada.

Dicha interacción consiste en que un fotón estimule a un electrón situado en la banda de conducción para recombinarse con un hueco emitiendo un fotón con la misma energía, dirección, sentido y fase que el fotón que lo estimulo. La corriente de polarización alcanza un determinado nivel umbral, en este punto los fotones generados en el proceso de recombinación estimulan la emisión de más fotones dentro de una cavidad óptica, consiguiendo así, una elevada ganancia óptica y un

espectro de emisión muy estrecho que da lugar a luz coherente (ver figura 1.9).

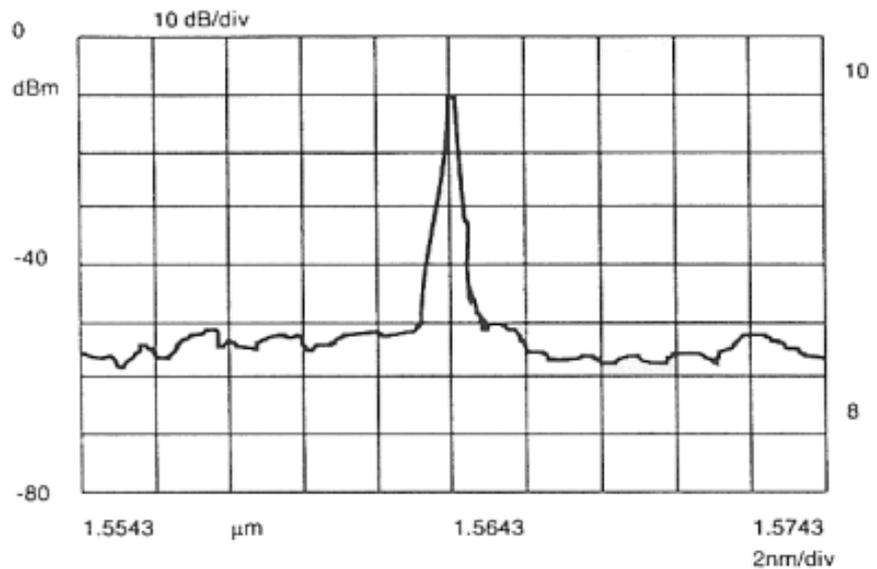


Figura 1.9: Espectro de emisión de un láser a 1500 nm [6]

Por lo tanto el diodo láser es otro dispositivo formado por semiconductores, pero a diferencia del LED, el diodo láser está confinado en una cavidad que le proporciona características muy especiales que se ilustran en la figura 1.10. Cuando el diodo es directamente polarizado, las cargas son introducidas dentro de la capa activa donde la recombinación tiene lugar causando la emisión espontánea de fotones, caso semejante al explicado para la emisión del LED, sólo que algunas de las cargas introducidas dentro del semiconductor son estimuladas para emitir otros fotones.

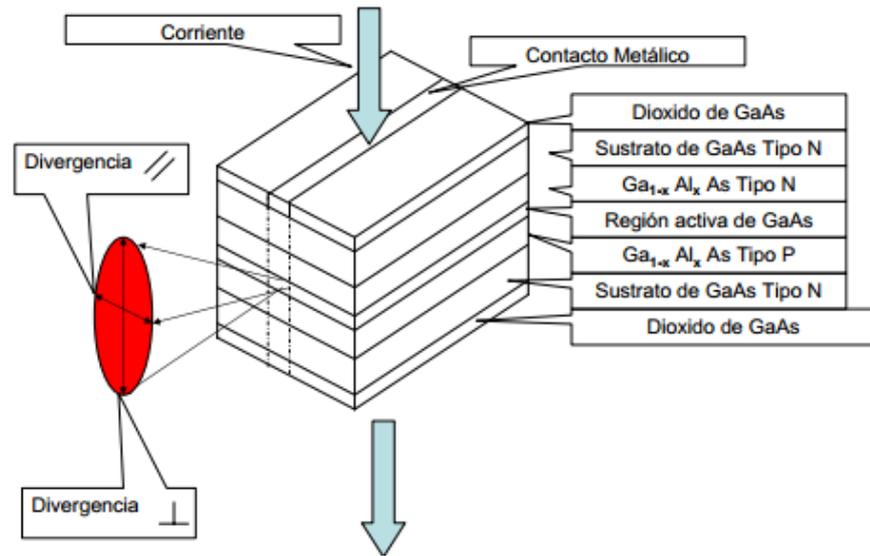


Figura 1.10: Configuración interna de un diodo láser (LD) [7]

Si la densidad de corriente es lo suficientemente alta, entonces un gran número de cargas introducidas están disponibles para estimular la recombinación. Entonces de este modo la ganancia óptica se hace mayor. La corriente de umbral es alcanzada cuando es lo suficientemente grande como para vencer las pérdidas del diodo. En este punto, la oscilación láser ocurre. La corriente de umbral debe ser pequeña para prevenir el sobrecalentamiento del semiconductor, particularmente cuando opera de forma continua o con altos picos de potencia.

En cuanto a la construcción de los diodos láser casi muy similar a los diodos emisores de luz, donde la cavidad láser, típicamente de 300 μm , se conforma al pegar a lo largo de las caras frontal y superior del semiconductor planos cristalinos paralelos. Por medio de esto, se logra una cantidad importante de reflexión que provee la suficiente realimentación para que se presente la oscilación y se genere así la emisión estimulada.

El diodo laser se trata en realidad de un haz fuerte, concentrado y direccional casi imposible de bifurcarse, mediante una intensa radiación al transformar la energía de un material activo en luz. Esto se logra mediante una fuente de poder, la misma que genera disparos con una frecuencia que permite establecer la intensidad de salida, que se alimenta a un tubo de excitación de destello encerrando el medio activo para generar el rayo láser de salida, tal y como se muestra en la figura 1.11. Es decir, que uno de los extremos del cilindro posee características de un espejo para evitar pérdidas hacia ese extremo, provocando la reflexión total y que el rayo sea guiado por el otro extremo.

En la actualidad existen tres tipos de diodo laser (LD): de gas, líquido, y sólido.

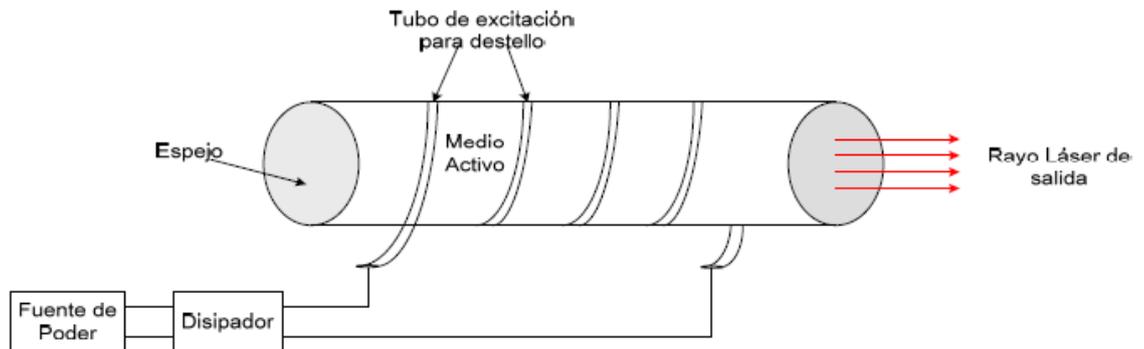


Figura 1.11: Modelo de un láser normal.

1.1.2 Fotodetectores

Dentro de un sistema de comunicación óptica se encuentra un fotodetector, que se encarga de transformar la energía radiante de la señal óptica proveniente del LED en energía eléctrica, para que sea recuperada la señal de información. Los Fotodetectores se clasifican en dos grupos: térmicos y fotoeléctricos:

- **Detectores térmicos:** el material del que se hallan fabricados es calentado por la radiación absorbida, y este calentamiento provoca un cambio en el comportamiento del material, como, por ejemplo, modificar su conductividad. Los bolómetros pertenecen a

este grupo de detectores. A causa de su reducida velocidad de respuesta, las aplicaciones de los detectores térmicos en comunicaciones ópticas y otras áreas de la fotónica son muy limitadas. [8]

- **Detectores fotoeléctricos:** la absorción de fotones resulta en un transición de los electrones presentes en el material hacia niveles de energía superior, donde son susceptible de ser transportados por un campo eléctrico, generando una corriente. [8]

Los mencionados dispositivos convierten la radiación óptica en señales eléctricas, ya sean estas de voltaje o corriente. Funcionan bajo el principio de que portadores de carga libres, sean estos electrones o huecos, son generados por absorción de fotones que entran a una sección del dispositivo. Este proceso se conoce como efecto fotoeléctrico interno. Entre las propiedades más importantes de los fotodetectores se pueden mencionar:

- a) Responsividad (ρ):** Es la razón de la corriente (i) de salida del detector a su potencia (P) óptica de entrada. Sus unidades son A/W.

$$\rho = \frac{i}{P} \quad (1.3)$$

b) Respuesta espectral: Se refiere a la curva de la Responsividad del detector como una función de su longitud de onda.

c) Tiempo de levantamiento: tiempo para el cual la corriente de salida del detector cambie de un 10% a un 90% de su valor final cuando la entrada es un escalón, tal y como se ilustra en la figura 1.12

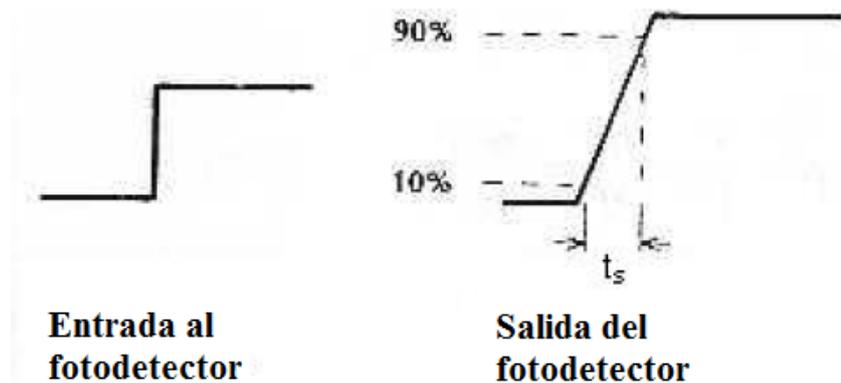


Figura 1.12: Tiempo de levantamiento de un detector óptico.

Asimismo, los fotodetectores tienen ciertos parámetros importantes para su correcto funcionamiento:

a) Respuesta espectral: establecida como la cantidad de corriente producida con cada longitud de onda (λ), asumiendo que todas las longitudes de onda tienen el mismo nivel de intensidad luminosa y absorbiendo

eficientemente energía de dichas señales luminosas recibidas.

- b) Fotosensitividad:** es la relación de la energía luminosa (Watts) incidente en el dispositivo con la corriente resultante (Amperios).
- c) Eficiencia de quantum:** es el número de pares de electrones- huecos generados (corriente) dividido por el número de fotones.
- d) Corrientes de oscuridad:** es el flujo de corriente que hay en el fotodiodo en ausencia de luz (oscuridad), cuando el fotodiodo está polarizado inversamente.
- e) Tiempo de tránsito:** es el tiempo que toma una portadora de luz inducida recorrer el área de agotamiento del fotodiodo, para obtener la tasa de bits máxima a la cual el fotodiodo funciona correctamente.

1.1.2.1 Fotodiodo PIN

El fotodetector más simple consiste en una unión PN formada en un semiconductor y con una banda de energía más estrecha que la correspondiente a la energía de un fotón de la señal que se desea detectar. Los fotones absorbidos crean pares electrón-hueco que se desplazan en sentido contrario dentro del campo del semiconductor y originan una fotocorriente, I_P , en un circuito exterior. La elección del material condiciona la eficiencia cuántica del fotodetector; en la región de 800-900 nm deben usarse detectores de silicio (que presentan unos rendimientos aceptables hasta 1100 nm). La segunda generación de sistemas, que operan en longitudes de onda de 1300 nm (segunda ventana) y 1550 nm (tercera ventana), conceden particular atención a los fotodiodos de germanio y de compuesto III y V, InGaAsP, por ejemplo.

Las prestaciones de la unión PN elemental se mejoran sensiblemente con una estructura PIN, en la cual la región intrínseca (I), escasamente dopada, se ubica entre dos regiones dopadas según P y tipo N (ver figura 1.13). El dispositivo opera normalmente con polarización inversa.

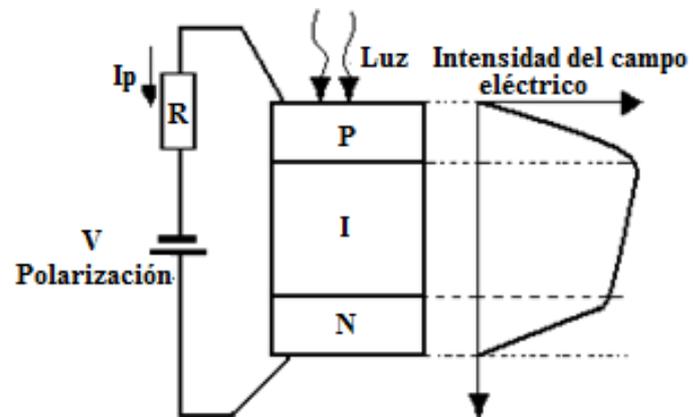


Figura 1.13: Diagrama de un fotodetector diodo PIN y distribución del campo eléctrico al pasar por el mismo.

La variación de la corriente con la tensión se ilustra en la figura 1.14.

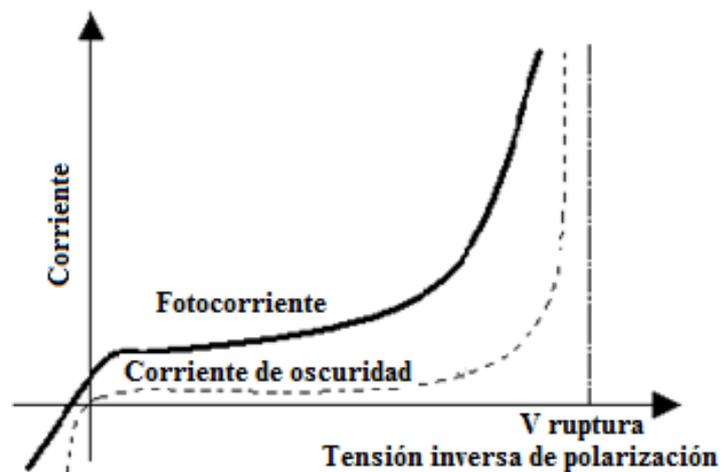


Figura 1.14: Característica tensión/corriente de polarización de un fotodetector.

Vale la pena resaltar dos aspectos:

- a) Con una alta polarización inversa, la fotocorriente se ve incrementada por un efecto multiplicativo de avalancha (esto se comentará posteriormente al tratar los fotodiodos de avalancha, APD), el resultado final es que produce una ganancia en corriente, M , en función de la tensión aplicada entre las uniones.

- b) Cuando no hay luz incidente, el fotodetector origina una cierta corriente parásita (corriente de oscuridad), el ruido asociado a este mecanismo puede ser el dominante en ciertos casos. En un dispositivo bien diseñado la corriente de oscuridad presenta un triple origen: difusión de portadores minoritarios originados térmicamente fuera de la región de deflexión del campo eléctrico; generación y recombinación, de origen térmico, de portadores dentro de la zona de deflexión ; y, paso por efecto túnel, de electrones desde la banda de valencia a la de conducción. Este último mecanismo es importante en los APD basados en compuestos III-V.

Como se trató anteriormente, el Fotodiodo PIN (positive–intrinsic–negative) mostrado en la figura 1.15, esta constituido por tres capas:

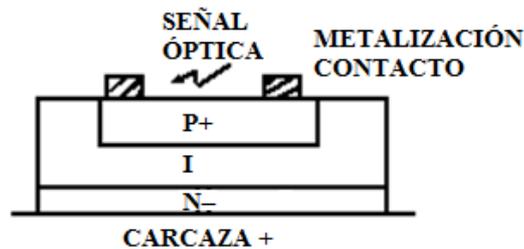


Figura 1.15: Fotodiodo PIN

- Una delgada tipo p con muchas impurezas.
- Una intermedia I (π) de elevada resistividad, notable grosor y poca contaminada que constituye la región activa conocida como zona intrínseca.
- Una capa n delgada y con gran cantidad de impurezas.

De la configuración de la Figura 1.15 se observa que el campo eléctrico se extiende por todo el grosor de la zona I en presencia de una polarización inversa de algunas decenas de voltios. La luz absorbida por la capa I, como P es muy delgada, origina la formación de pares electrón – huecos. El campo eléctrico separa las cargas y dirige los electrones hacia la capa N y los huecos hacia la P,

generando una corriente inversa proporcional a la luz recibida. En la oscuridad ésta corriente se reduce a unos pocos pA (dark current).

Requisitos de los receptores ópticos

Los receptores ópticos deben de reunir determinados requisitos prácticos para que tengan un buen desempeño en un sistema de transmisión dado. Entre ellos se encuentran los siguientes:

- **Alta sensibilidad de operación.**
- **Alta fidelidad:** Reproducir con fidelidad una transmisión analógica requiere de la linealidad de la respuesta del fotodetector.
- **Amplitud de respuesta eléctrica:** el fotodetector debe producir un máximo de corriente eléctrica para el total de la potencia óptica recibida.
- **Tiempos de respuesta cortos** para obtener el ancho de banda requerido.

Terminal receptor óptico

En la Figura 1.16 se muestra un esquema típico de un terminal receptor. Entre las partes integrantes del receptor se encuentran:

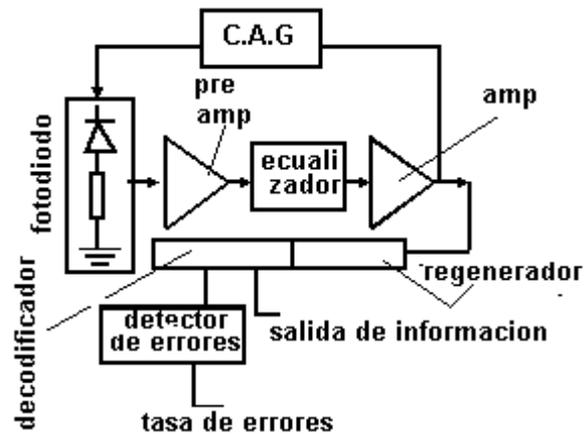


Figura 1.16: Terminal receptor.

Ecualizador: La señal a la salida del preamplificador tiene un carácter integrado debido al ancho de banda de la fibra, a la constante de tiempo del circuito del fotodetector y del ancho de banda del preamplificador, por lo que se pasa por un ecualizador para su derivación. Se utiliza una red RC diferenciadora.

Circuito Automático de Ganancia (CAG, AGC): Se emplea para diodos APD para modificar su ganancia con la tensión de polarización aplicada. Se compara la señal

eléctrica de salida del amplificador con los niveles requeridos para el decodificador. Si el nivel de señal es excesivo el CAG disminuye la tensión de polarización y viceversa. Un margen dinámico típico del CAG ≈ 20 dB.

Regenerador: Comparador que define cuando la marca de línea recibida es “0” o “1” lógico.

Decodificador: Necesario para la decodificación de los códigos de línea utilizados en la transmisión.

Detector de errores: Análisis de las violaciones de los códigos, lo cual, constituye un índice en la calidad de la transmisión.

Preamplificador: La impedancia de entrada es grande ya que el fotodetector está polarizado inversamente y presenta por ello alta impedancia dinámica.

Entre las condiciones que deben reunir los fotodetectores para su empleo en la comunicación por fibras ópticas se encuentran:

- Corriente en ausencia de luz muy pequeña, para poder discriminar impulsos de luz débiles.
- Rapidez de respuesta o su equivalente ancho de banda amplio.
- Mínimo nivel de ruido adicional generado por el fotodetector.

1.1.2.2 Fotodiodo de avalancha

Cuando la tensión de polarización inversa está próxima a la ruptura (V_R), los portadores pueden obtener a su paso por el campo eléctrico (del orden de 30 v/m) suficiente energía para crear nuevos pares de portadores por impactos de ionización es decir los fotodiodos al aplicárseles un voltaje de polarización generan una corriente primaria de electrones por la interacción luz–materia.

Si dicho voltaje es alto, se aceleran los electrones primarios de forma tal que al chocar con los átomos de la red cristalina se liberan nuevos electrones que a su vez serán capaces de romper nuevos enlaces, originando un efecto multiplicativo llamado multiplicación por avalancha. La fotocorriente multiplicada I_m , puede expresarse según:

$$I_m = MI_p \quad (1.4)$$

Siendo M la ganancia media del fotomultiplicador.

La multiplicación de avalancha presenta una naturaleza estadística, la cual da lugar a un proceso de ruido.

APD de silicio.

El silicio es un material idóneo para realizar APD en la región de 800 –900 nm, presenta muy bajo ruido y el rendimiento es de orden del 90%. La Figura 1.17 refleja una posible configuración, comparando los fotodiodos PIN con los APD.

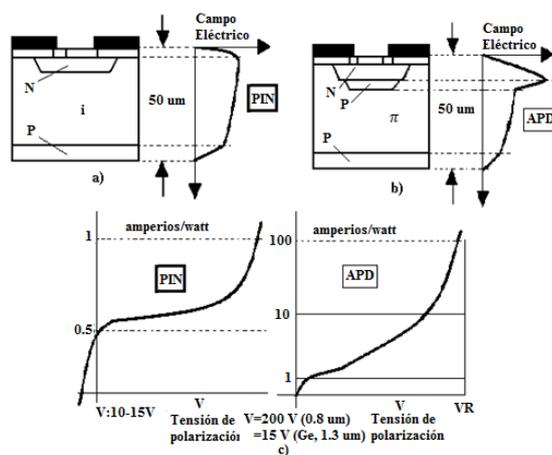


Figura 1.17: Comparación entre las configuraciones y características V/I de fotodetectores PIN y APD para comunicaciones ópticas.

Comercialmente hay disponibles fotodetectores APD con anchos de banda superiores a 1GHz. Puesto que el factor de ruido (cifra de ruido), F , es pequeño, el valor óptimo de la ganancia es alto (típicamente de 50 a 150), lo cual da lugar a receptores con buena sensibilidad, el control del dispositivo no es crítico, y es factible actuar sobre la multiplicación con el objetivo de obtener un efecto de control sobre la ganancia del receptor.

La sensibilidad de los receptores con APD de Si es casi inversa a la velocidad de transmisión, típicamente pueden obtenerse valores de - 63 dBm a 8 Mb/s y -50 dBm a 140 Mb/s, con rendimiento cuántico del 80 %.

En lo referente a la fiabilidad, se han publicado trabajos que presentan valores medio de tiempo entre fallos de 107 horas en fotodiodos diseñados para evitar la acumulación de cargas junto a la región en la que se produce la ganancia, de lo contrario el ruido de oscuridad podría dispararse bruscamente y degradar el APD.

Algunos resultados más recientes han propuesto estructuras optimizadas tipo N+ -P-P+. La gama de longitud de onda se ha elevado hasta 1100 nm, y con estructuras iluminadas por esquina ha sido posible mejorar el ancho de banda.

APD de germanio

Las configuraciones más simples, N+-P, están disponibles en el mercado desde hace varios años, con rendimientos del 70% entre 100 y 1600 nm. Pero por motivos de ruido, son preferibles las configuraciones del tipo N+-N-P. La corriente de oscuridad es la principal contribución de ruido hasta velocidades de modulación de 600 Mb/s.

El factor de multiplicación óptimo (M_{opt}), es de 5 a 20 y la sensibilidad del receptor, a 1300 y 1550 nm, es de unos 10 dB peor que en los APD de **Si** a 850 nm. El ajuste de la multiplicación óptima M_{opt} es crítico, además la sensibilidad depende de la temperatura por cuanto la corriente de oscuridad se duplica cada 8° K. A 20° C pueden considerarse como valores significativos de la sensibilidad las siguientes velocidades: a 34Mb/s, -44,3 dBm, a 140Mb/s, -40 dBm, a 400Mb/s, -36dBm y a 1200Mb/s, -31 dBm.

APD de compuestos III y V.

Con objeto de mejorar la sensibilidad de los APD de germanio se están estudiando estructuras de fotodetectores a base de semiconductores compuestos, particularmente los de tipo InGaAsP/InP, pueden cubrir la banda de 960 a 1670 nm, según se ajuste la proporción entre los componentes del semiconductor.

Las configuraciones más simples, tipo P⁺-N (realizables en fase líquida o fase de vapor), presentan baja corriente de oscuridad con bajas corrientes inversas de polarización (típicamente de 10^{-6} a 10^{-4} A/cm²). No obstante, cuando la polarización inversa se ajusta para originar el proceso de avalancha, la corriente de oscuridad se incrementa rápidamente por efecto túnel en los electrones.

Para darle solución a esta dificultad se están ensayando estructuras como las de la Figura 1.18, en las cuales las regiones de absorción y de avalancha están separadas. Aún no se han obtenido resultados prácticos definitivos, si bien se han logrado resultados de laboratorio esperanzadores: rendimientos del 81% y del 76% a 1,3 μm y 1,5 μm respectivamente; corrientes de oscuridad de 9,5 nA a tensiones de polarización del 90% de la ruptura; respuestas

en frecuencias planas hasta 1 GHz, y factores de ruido, F , de 3 a 7.

Se espera que estas estructuras lleguen a superar las prestaciones de los APD de germanio. Aunque en un estado más embrionario, también se están ensayando unos APD basados en GaAlSb o en CdHgTe, con esperanzadores resultados a 1300nm.

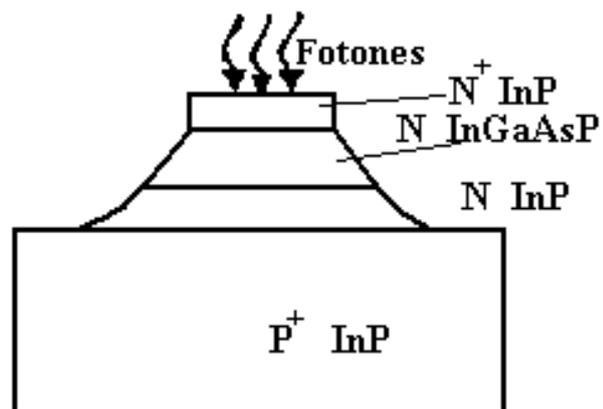


Figura 1.18: Estructura de un fotodiodo de avalancha (APD) a base de InGaAsP (la región de avalancha esta en la unión $P^+ - N \text{InP}$)

1.1.3 Fibra Óptica

La fibra óptica es un medio flexible y extremadamente fino, capaz de conducir energía de naturaleza óptica. La misma

presenta una serie de ventajas con respecto a otros medios de transmisión de datos, por ejemplo:

- Ancho de banda amplio.
- Atenuación baja.
- Inmunidad electromagnética.
- Peso liviano.
- Tamaño pequeño.
- Seguridad con respecto a su manipulación

Seguridad con respecto a la transmisión de datos

1.1.3.1 Fibra multimodo

En la actualidad existen dos tipos de fibra multimodo:

a) Fibra multimodo de índice escalonado.

Las fibras ópticas multimodo de índice escalonado, se caracterizan por:

- Permitir el establecimiento de diferentes modos de propagación. Esto ocurre ya que el diámetro del núcleo es varias veces mayor que la longitud de onda (0.85 - 1.3 μm).
- Índice de refracción en el núcleo n_1 y en el revestimiento n_2 constante. Donde n_1 es siempre mayor que n_2 y como

entre los dos índices se crea un salto se le denomina de índice en escalón. En este tipo de fibra hay un pequeño retardo entre los rayos que inciden paralelos al eje y aquellos que lo hacen con cierto ángulo, debido a la diferencia de distancia recorrida, provocando la deformación del pulso inicial.

$$n_2 = n_1(1 - \Delta) \quad (1.5)$$

$$\Delta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \quad (1.6)$$

En la frontera entre el núcleo y el revestimiento ocurre una reflexión total interna, el ángulo crítico en este caso será:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = 1 - \Delta \quad (1.7)$$

$$\theta_c = \sin^{-1}(1 - \Delta) \quad (1.8)$$

La diferencia de los índices de refracción de las fibras usadas en comunicaciones más común varía entre 0.007 y 0.02. Para una fibra SI (salto de índice), el número de modos conducido por la fibra es:

$$N = \frac{0.5(\pi d A_N)^2}{\lambda^2} \quad (1.9)$$

Donde: d es el diámetro del núcleo de la fibra.

En la fibra SI se presentan dos tipos de rayos: meridionales y oblicuos.

Rayos Meridionales

Entran a través del eje de la fibra y quedan contenidos en un plano perpendicular a su sección transversal, deben reflejarse internamente en la frontera entre el núcleo y el revestimiento, tal como se muestra en la figura 1.19. Para ello debe de cumplirse que:

$$\theta_o \leq \sin^{-1} \left\{ \frac{[n_1(2\Delta - \Delta^2)]^{\frac{1}{2}}}{n_o} \right\} \quad (1.10)$$

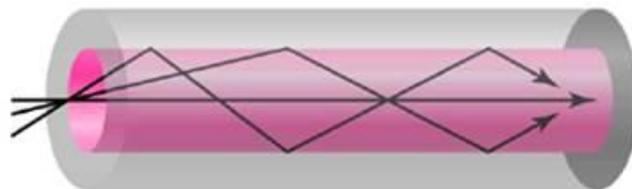


Figura 1.19: Rayos meridionales [1]

Rayos oblicuos

No entran a través del eje, ni son paralelos a él, sino que se reflejan internamente siguiendo una trayectoria helicoidal

como el mostrado por la figura 1.20. La ecuación que define al ángulo crítico para rayos oblicuos es:

$$\sin \theta_c = \sin^{-1} \left[1 - \left(\frac{r_o}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{n_1} (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

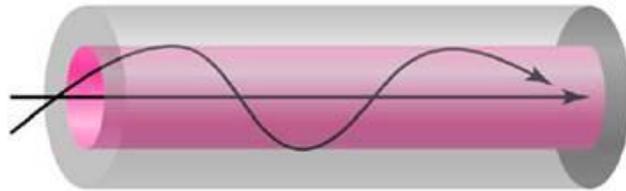


Figura 1.20: Rayos oblicuos [1]

Se deben procurar diferencias pequeñas entre los índices de refracción del núcleo y el revestimiento para lograr ángulos críticos grandes, para que los rayos vayan casi paralelos al eje, evitando pérdidas en la capacidad de información de la fibra, ya que los rayos que van por el eje de la fibra y los rayos meridionales de acuerdo a la figura 1.21, se desfazan ligeramente

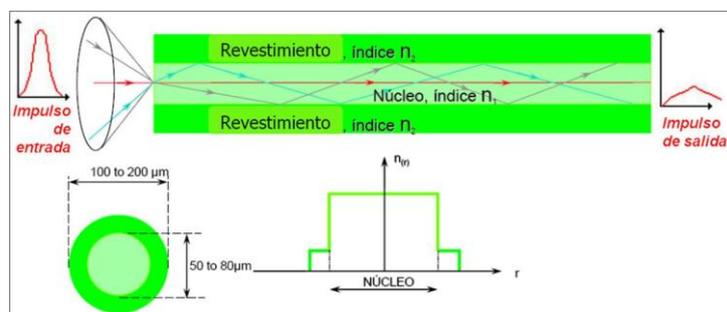


Figura 1.21: Transmisión de la luz por el interior de la fibra óptica MM de índice escalonado [1]

b) Fibra multimodo de índice gradual

En esta fibra el índice de refracción va decreciendo gradualmente del eje del núcleo al exterior (ley de variación aproximadamente parabólica), los rayos luminosos no son reflejados sino curvados según se aproximan al revestimiento. Los rayos que recorren un trayecto más largo permanecen más tiempo en la periferia de la fibra donde el índice de refracción es menor y por tanto la velocidad de propagación es mayor. Así los rayos que recorren más distancia se desplazan más rápidamente que los que cubren menor distancia, tal como se ilustra en la figura 1.22.

Por tanto todos los rayos llegan casi al mismo tiempo al final del recorrido. Con esto se logra menor atenuación. Para una fibra de índice gradual (GI), el número de modos conducido por la fibra es:

$$N = \frac{0.25(\pi d A_N)^2}{\lambda^2} \quad (1.11)$$

Las fibras MM son utilizadas para distancias de hasta 20 Km y no suelen emplearse con regeneradores intermedios.

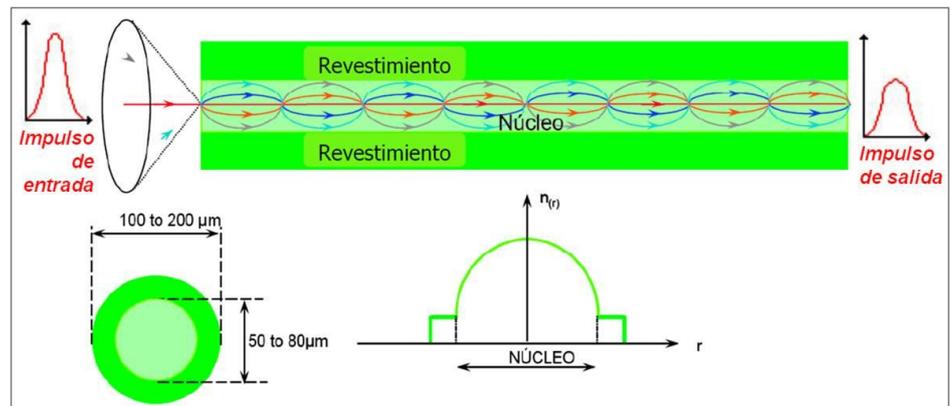


Figura 1.22: Transmisión de la luz por el interior de la fibra óptica MM de índice gradual [1]

1.1.3.2 Fibra monomodo

En la figura 1.23 se puede observar que la propagación tiene lugar de un sólo modo. Esto se logra por la disminución considerable del diámetro del núcleo, que hace que la luz se propague en un haz comprimido, evitando la dispersión modal. Utilizados para cables locales, largas distancia y submarinos con grandes velocidades de transmisión, ya que en actualidad son los soportes de las redes de transporte.

Existen 3 tipos de fibras ópticas monomodo estandarizadas por la UIT:

1. Rec. G-652: Fibra óptica Monomodo Estándar, cuya longitud de onda de dispersión nula esta situada en $\lambda=1310$ nm y puede utilizarse en $\lambda=1550$ nm.
2. Rec. G-653: Fibra óptica Monomodo con dispersión desplazada, cuya longitud de onda dispersión nula está situada en torno a $\lambda =1550$ nm y puede utilizarse en $\lambda =1310$ nm.
3. Rec. G-654: Fibra óptica monomodo con pérdida minimizada a 1550 nm.

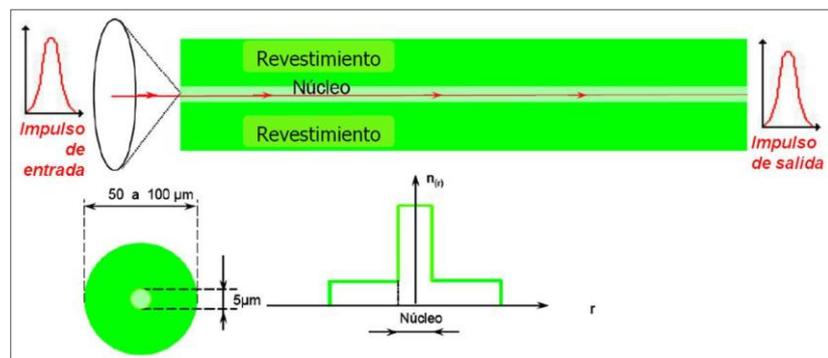


Figura 1.23: Transmisión de la luz por el interior de la fibra óptica SM [1]

La distancia entre repetidores depende del ancho de banda de la fibra, donde se ha logrado transmisiones con repetidores a 100Km en la tercera ventana de forma experimental con velocidad de 2 Gbps. La fibra SM puede transmitir las longitudes de onda mayores a la longitud de

corte, la cual es proporcional al índice de refracción del núcleo, es decir:

$$\lambda_c = \frac{2\pi a n_1 \sqrt{2\left(\frac{n_1 - n_2}{n_1}\right)}}{v_c} \quad (1.12)$$

De donde:

$\lambda_c \Rightarrow$ es la longitud de onda de corte (μm)

$a \Rightarrow$ es el radio del núcleo (μm)

$n_1 \Rightarrow$ es el índice de refracción del núcleo.

$n_2 \Rightarrow$ es el índice de refracción del revestimiento.

$v_c \Rightarrow$ es 2.405 frecuencia de corte normalizada para fibras SM.

1.1.4 Factores que limitan la transmisión por fibra óptica

Los pulsos propagados en una fibra sufren ensanchamientos que limitan la capacidad del ancho de banda, es decir el producto ancho de banda por distancia, ya sea por solapamiento entre pulsos contiguos conocido como interferencia entre símbolo (*ISI*). La señal también se atenúa por varios factores que ocurren de manera simultánea, lo cual da como resultado una limitación de distancia alcanzable por la señal.

1.1.4.1 Atenuación.

La atenuación no es más que la disminución de la potencia de señal a medida que ésta se propague, donde la reducción de potencia se produce exponencialmente con respecto a la longitud recorrida. [4] La atenuación tiene varios efectos adversos sobre el funcionamiento, que incluyen la reducción del ancho de banda del sistema, la rapidez de transmisión de información, la eficiencia y la capacidad general del sistema. [9]

De acuerdo a la siguiente expresión se calcula la pérdida de potencia en un cable de fibra óptica. [10]

$$A(dB) = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.13)$$

El ancho de banda determina la capacidad de transmitir información, es decir que los sistemas de gran capacidad codifican la información de forma binaria (unos y ceros). El número de pulsos (o bits) por segundo es inversamente proporcional a su duración, donde las propiedades del ancho de banda de una fibra óptica se pueden entender como el mínimo ancho de pulso que puede ser usado. [11]

Las pérdidas de potencia son debidas tanto a factores intrínsecos (características de las fibras como el índice de absorción de luz del material, la pureza de éste), como extrínsecos (cómo se produce la unión). Las fibras MM sufren mayores pérdidas de atenuación que las fibras SM, causadas principalmente por dispersión de la onda luminosa, generada por las impurezas. La tabla 1.2 se observa las diferentes potencias de salida como porcentajes de la de entrada, para cualquier cable de fibra óptica, con valores distintos de pérdidas en dB. Es decir, un cable que sufre una pérdida de 3 dB reduce la potencia de salida 50% de la de entrada.

Pérdida (dB)	Potencia salida (%)
1	79
3	50
6	25
9	12.5
10	10
13	5

Tabla 1.2: Porcentaje de potencia de salida en función de la pérdida en (dB). [9]

En la figura 1.24 muestra la atenuación típica de una fibra SM y el ancho aproximado de las bandas de transmisión.

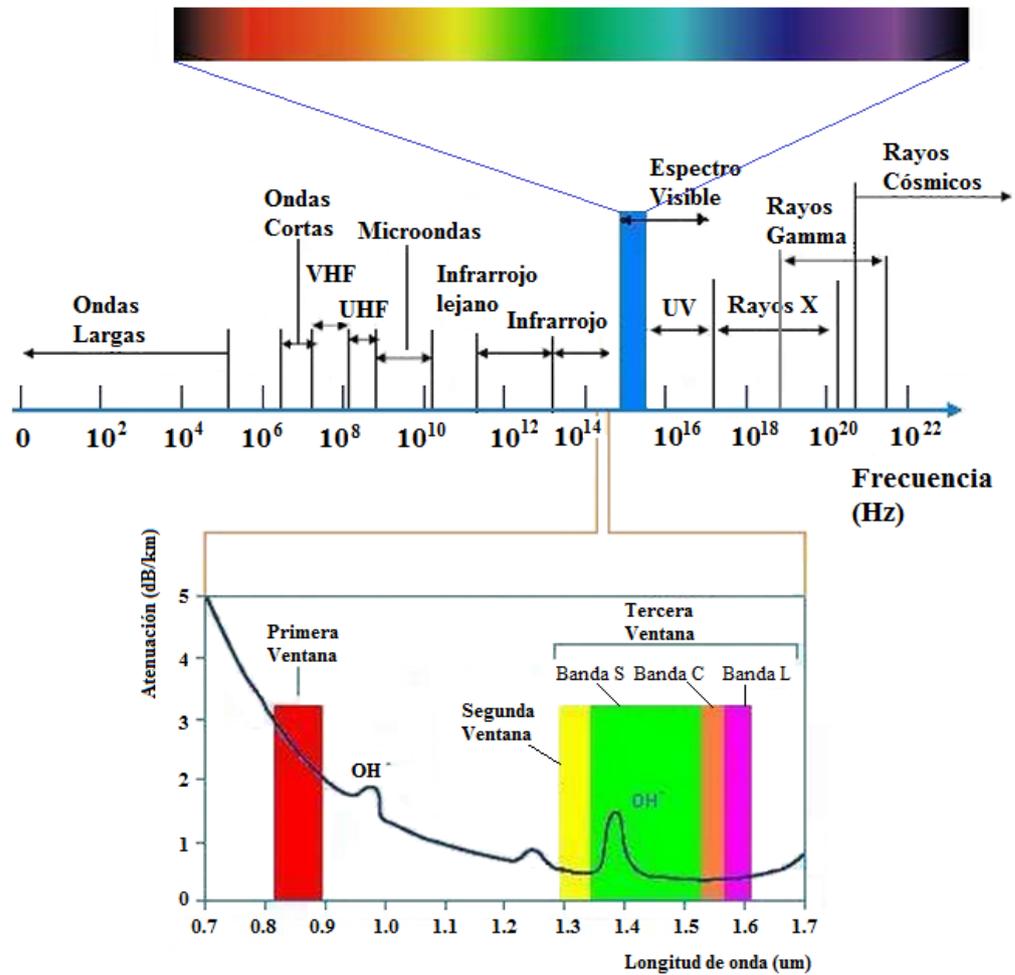


Figura 1.24: Curva de atenuación de una fibra monomodo (SM).

De la figura 1.24, la primera ventana se encuentra en $0.85\mu\text{m}$, la segunda ventana situada en $1.3\mu\text{m}$ y la tercera ventana situada en $1.55\mu\text{m}$. La tercera ventana a su vez se

divide en tres bandas, la banda S, la banda C y la banda L. Dichas bandas o regiones del espectro son empleados para la transmisión por fibra óptica, porque son zonas de baja atenuación.

La atenuación en la primera ventana es de 2.5 dB/km, en la segunda ventana es de 0.4 dB/km y en la tercera ventana de 0.2 dB/km. Como se ve en la figura 1.24 conforme aumenta la longitud de onda (λ), la atenuación disminuye, debido a la dispersión de Rayleigh, pero a partir de 1600nm aumenta debido a las pérdidas estimuladas por la absorción del silicio. A continuación se exponen algunas de las causas de atenuaciones en una fibra óptica. Entre ellas se encuentran:

- Pérdidas por Absorción: Intrínseca y Extrínseca.
- Pérdidas por Dispersión: Esparcimiento de Rayleigh, Raman y Brillouin.
- Temporal: Modal.
- Cromática: Material y Guía onda
- Pérdidas por reflexión de Fresnel.
- Pérdidas por Microcurvaturas.
- Pérdidas por Flexiones o Curvaturas.
- Pérdidas por los Empalmes.

- Pérdidas por Conexión (conectores).

1.1.4.2 Ancho de banda

Puesto que sólo es necesario transmitir el componente fundamental de la onda cuadrada en una aplicación digital, se puede decir que el ancho de banda eléctrico B de la fibra para máxima velocidad de transmisión será:

$$B = \frac{1}{2\Delta t} \quad (1.14)$$

Donde:

B = Ancho de banda eléctrico, en Hertz (Hz)

Δt = Dispersión (en el siguiente acápite se describe) total, en segundos (s)

Asimismo, el ancho de banda óptico es el producto del ancho de banda eléctrico B y la longitud de la fibra. En la figura 1.25 se muestra la forma de evaluar a las fibras MM y la ecuación para hallar dicho ancho de banda es: [1]

$$B_{\text{óptico}} = Bl \text{ [Hz} \cdot \text{km]} \quad (1.15)$$

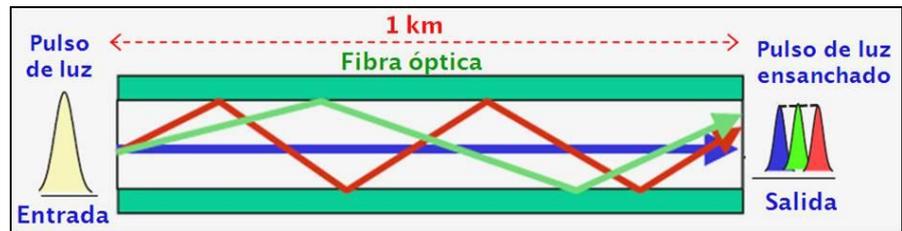


Figura 1.25: Ancho de banda de una fibra MM, donde el pulso de luz se ensancha. [1]

En la figura 1.26 se muestra la forma de evaluar a las fibras SM y la ecuación para hallar dicho ancho de banda es:

$$B_{\text{óptico}} = Bl = \frac{1}{2D} \quad [\text{Hz} \cdot \text{km}] \quad (1.16)$$

Donde:

B = Ancho de banda eléctrico, en Hz.

l = Longitud de la fibra óptica, en km.

D = Dispersión de la fibra, en ps/km.

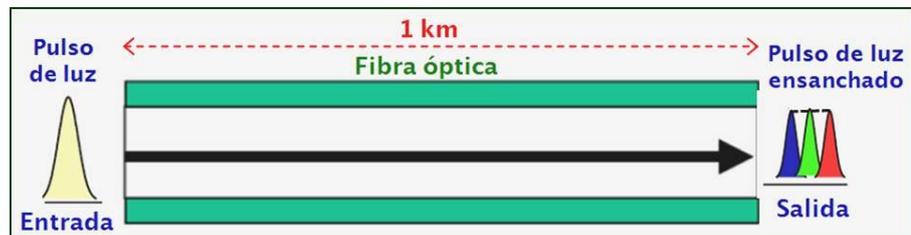


Figura 1.26: Ancho de banda de una fibra SM, donde el pulso de luz se ensancha. [1]

1.1.4.3 Dispersión

Teóricamente la dispersión se considera como el ensanchamiento de los pulsos de luz, donde la señal luminosa se deforma a medida que se propaga a través del canal óptico de la fibra. Existen 3 tipos de dispersión, y son:

- **Dispersión del material:** es debido al conjunto de longitudes de onda contenido en un pulso, ya que el índice de refracción varía con la longitud de onda (λ), la velocidad del grupo (v_g) de un modo será función de λ . Debido a que las fuentes de luz tienen diferentes componentes en su espectro, lo que tardará cada una distinto tiempo de transmisión, porque las velocidades a las que viajan no son iguales, produciendo ensanchamiento del pulso emitido (ver figura 1.27). Este tipo de dispersión se la conoce también como dispersión cromática. La manera de evaluar la dispersión del material es:

$$D = D_C \Delta\lambda \quad (1.17)$$

Donde:

D = Dispersión de la fibra. En ps/km.

D_C = Dispersión cromática. En ps/nm-km.

$\Delta\lambda$ = Ancho espectral de la fuente. En nm.

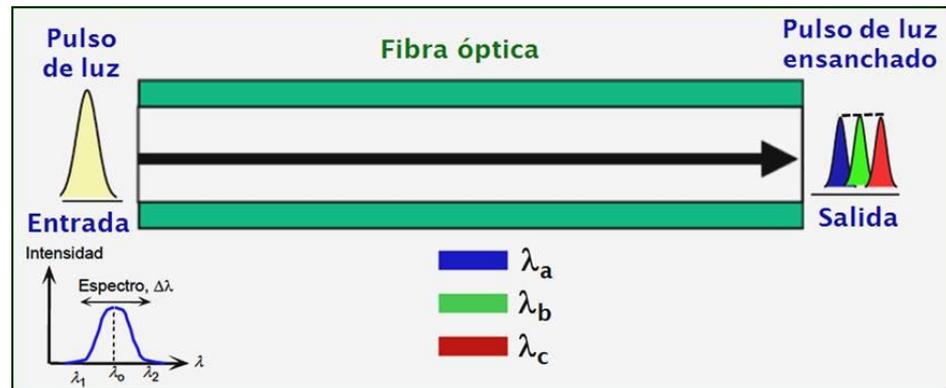


Figura 1.27: Dispersión del material o cromática de una fibra SM, con ensanchamiento del pulso emitido. [1]

- **Dispersión modal:** debido a que los haces de luz viajan en trayectorias diferentes para cada modo de la fibra óptica, llegando a destino en diferentes tiempos, como se muestra en la figura 1.28.

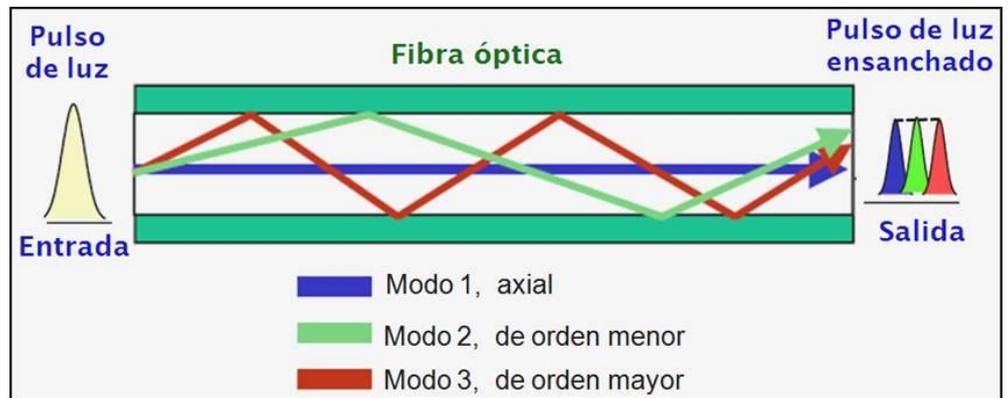


Figura 1.28: Dispersión moda de una fibra MM, con ensanchamiento del pulso emitido. [1]

- **Dispersión por guía de onda:** dependen del número de modos (5) que dependen de la longitud de onda. En el caso de guías de ondas en una fibra MM, son sensiblemente pequeñas para todos los modos alejados de la longitud de corte. Ya que los modos próximos al corte, generalmente, transportan una fracción pequeña de la potencia total y suelen sufrir pérdidas más elevadas, la contribución a la dispersión por esta causa puede ser omitida. [12]

1.1.5 Componentes de conexión y acople.

Los elementos de conexión de fibra óptica permiten la transferencia de potencia óptica de un componente a otro. Un sistema de conexión puede requerir de diferentes elementos de conexión, los cuales se detallan a continuación:

1.1.5.1 Acoplador

Cuando se debe propagar la luz de una a varias fibras, se debe usar un acoplador. El cual se encarga de dividir el foco luminoso en dos o más partes, inyectándolas en las fibras respectivas. Existen dos tipos de acopladores: acopladores en T y acopladores en estrella.

Los acopladores en T distribuyen la señal de una a dos fibras, mientras que los acopladores en estrella la distribuyen de una a más de dos fibras. Existen diversos problemas debido a que se reduce la potencia óptica y de margen dinámico, pues la potencia necesaria para llegar a los destinos más lejanos puede ser excesiva para los más cercanos

Los acopladores en T producen pérdidas que incrementan linealmente con el número de terminales, mientras que en un sistema con acopladores en estrella, las pérdidas son logarítmicas. [13]

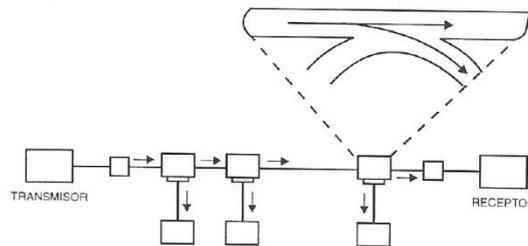


Figura 1.29: Acoplador en T. [13]

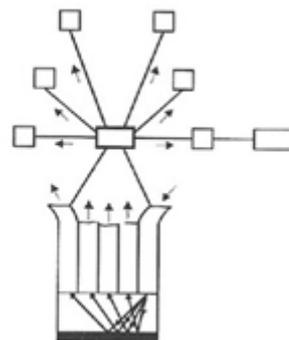


Figura 1.30: Acoplador en estrella. [13]

1.1.5.2 Conector

Los conectores ópticos son elementos que permiten unir una fibra con un componente activo, el cual puede ser una fuente de luz o un fotodetector, también permite unir una fibra óptica con otra.

Las pérdidas en un conector se producen por varios factores: mala alineación (transversal y angular), reflexión en las superficies aire-vidrio, separación entre las fibras, variaciones del tamaño del núcleo, de la apertura numérica de la fibra, etc.

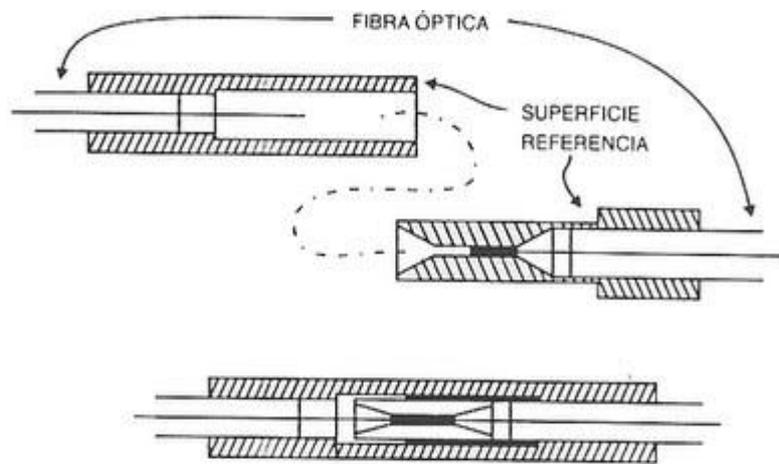


Figura 1.31: Conector óptico. [13]

1.1.5.3 Empalme

Son las uniones que se realizan entre dos fibras de cables diferentes. El método utilizado para realizar esta unión es el de la fusión por arco eléctrico.

El método de fusión consiste en la unión permanente de las fibras mediante la unión de las mismas, previo a la fusión las fibras se calientan para eliminar cualquier impureza y evitar la formación de burbujas, el empalme se realiza cuando las fibras a unir llegan a una temperatura suficientemente alta como para fundirlas.

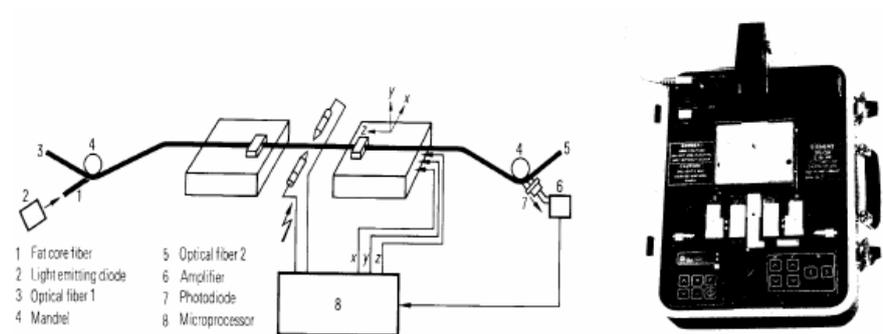


Figura 1.32: Empalme óptico por fusión. [14]

Además del empalme a fusión, existen otros tipos de empalme que se utilizan de manera temporal para reparaciones provisionales o en situaciones que no es necesario un empalme permanente. [15]

CAPÍTULO 2

2. MODULACIÓN Y RUIDO EN SISTEMAS ÓPTICOS

Las señales de transmisión se transportan entre un transmisor y un receptor a través de alguna forma de medio de transmisión. Sin embargo, casi nunca tienen las señales de información una forma adecuada para su transmisión. En consecuencia, se deben transformar a una forma mas adecuada. El proceso de imprimir señales de información de baja frecuencia en una señal portadora de alta frecuencia se denomina modulación. La demodulación es el proceso inverso, en el cual las señales recibidas regresan a su forma original. [9]

2.1 Modulación diodo emisor de luz LED

A continuación, se presentan los requisitos básicos de modulación y estrategias, las cuales se los ilustra con unos circuitos específicos mostrados a continuación.

2.1.1 Modulación Analógica.

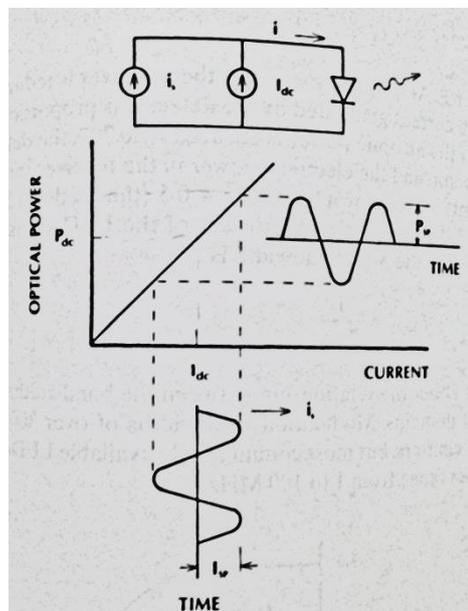


Figura 2.1: Modulación analógica de un LED. [16]

En la figura 2.1 se ilustran los requerimientos básicos para la modulación analógica de un LED (Diodo Emisor de Luz). Donde I_{dc} es la corriente DC e i_s , es la señal de corriente. P_{SP} es la amplitud máxima de la porción modulada potencia de salida y P_{DC} es la potencia promedio.

La corriente de total de modulación y la potencia óptica resultante, la cual se ilustra en la figura 2.2, esta dada por:

$$i = I_{dc} + I_{SP} \sin wt \quad (2.1)$$

Y

$$P = P_{dc} + P_{SP} \sin wt \quad (2.2)$$

En estas ecuaciones el primer término es el dc, el segundo término representa la información de la señal, la cual usará una onda sinusoidal para evaluar el rendimiento del enlace.

[16]

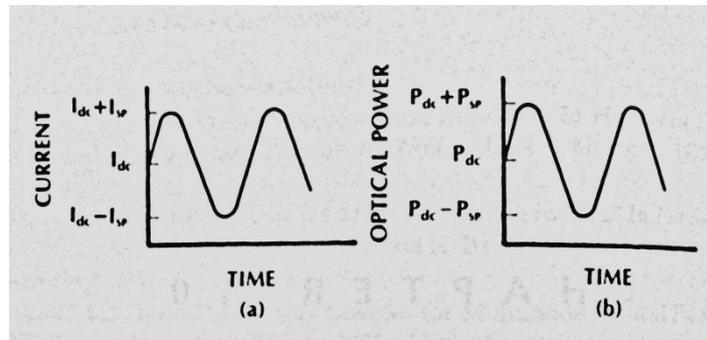


Figura 2.2: a) Corriente del LED b) Potencia de salida resultante. [16]

2.1.2 Modulación Digital.

A diferencia de los moduladores analógicos, los LEDs digitales no es necesario proporcionar una corriente dc. Los circuitos digitales simplemente convierten al LED en on (encendido) u off (apagado). En el estado apagado, la emisión del LED debe ser baja, creando una relación grande de potencia de encendido-apagado. En el estado encendido es deseable que la corriente sea independiente de la magnitud de la señal de entrada. Entonces la potencia de salida será idéntica para cada pulso, incluso si las señales de entrada sucesivas varían en algo.

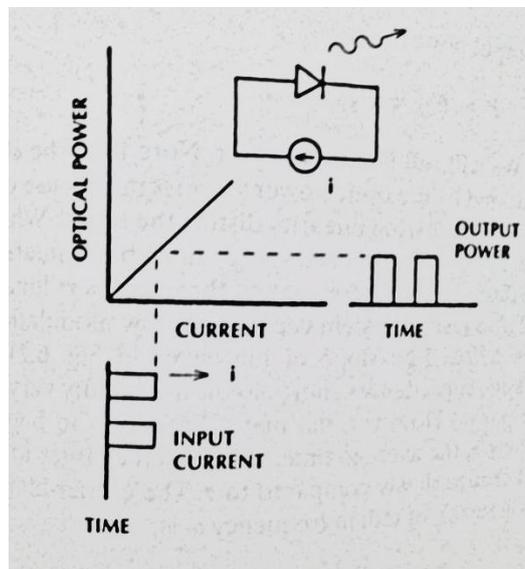


Figura 2.3: Modulación Digital de un LED. [16]

2.2 Formatos de modulación analógica.

El análisis ilustra la transmisión banda base, en el cual la señal es transportada en un haz de luz modulado en las frecuencias de banda base de la información. La potencia óptica varía en proporción a la corriente de entrada.

2.2.1 Modulación de amplitud (AM).

La modulación en amplitud ubica el mensaje en una portadora cuya frecuencia es mucho más grande que las frecuencias contenidas en la banda base.

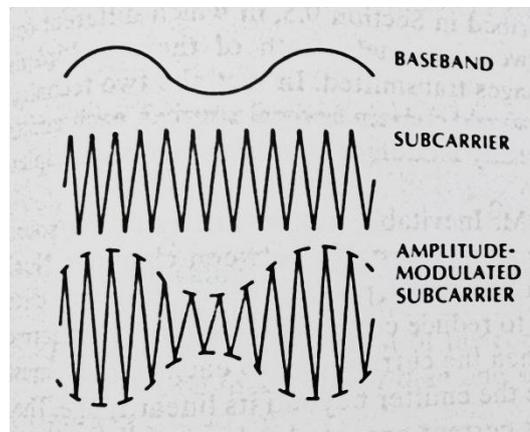


Figura 2.4: Forma de onda AM. [16]

La modulación de amplitud de una señal sinusoidal esta representada por la siguiente ecuación:

$$i = I_s(1 + m * \cos w_m t) \cos w_{sc} t \quad (2.3)$$

Donde w_{sc} es la frecuencia de portadora w_m es la frecuencia de modulación y para obtener una señal sin distorsión $m \leq 1$. Por otro lado, la recepción de la señal AM es el proceso inverso de la transmisión de AM. Un receptor de AM convencional, simplemente convierte una onda de amplitud modulada nuevamente a la fuente original de información. Cuando se demodula una onda AM, la portadora y la porción de la envolvente que lleva la información se convierten o se trasladan del espectro de radio frecuencia a la fuente original de información.

2.2.2 Modulación de frecuencia (FM).

La información transmitida esta contenida en la fase de la portadora. La corriente esta representada por la siguiente ecuación:

$$i = I_s \cos[w_{sc} t + \theta(t)] \quad (2.4)$$

Donde el mensaje se encuentra en la variación de tiempo de la fase del ángulo θ . Si la modulación es una sola señal

sinusoidal oscilando a una frecuencia $f_m = \omega_m / 2\pi$, la corriente FM toma la siguiente forma:

$$i = I_s \cos(\omega_{sc} t + \beta * \sin \omega_m t) \quad (2.5)$$

Donde β es el índice de modulación. En la figura 2.5 se muestra formas de onda FM

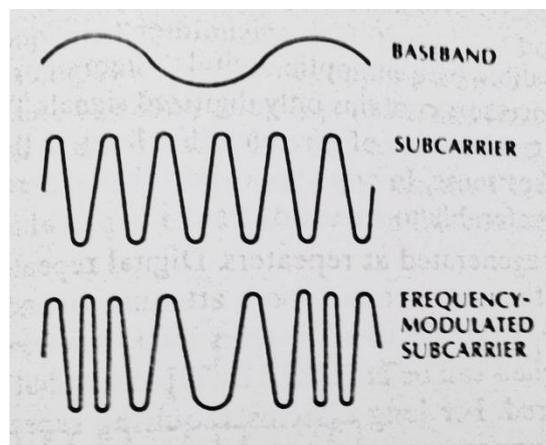


Figura 2.5: Forma de onda FM. [16]

2.3 Formatos de modulación digital.

La información digital puede ser codificada mediante señales analógicas o digitales. La elección de un tipo de codificación específico depende de los requerimientos que exige el medio de transmisión.

Para la transmisión de datos digitales, existen varios métodos de modulación que permiten alterar el ancho de banda sobre el cual será enviada la información.

2.3.1 Modulación OOK

Este esquema de modulación consistente en la emisión de luz («on») o la ausencia de ésta («off»), en función de si el dato que se transmite es un bit «1» o un bit «0», respectivamente.

Es una forma de modulación en la cual se representan los datos digitales como variaciones de amplitud de la onda portadora. La amplitud de una señal portadora análoga varía conforme a la corriente de bit (modulando la señal), manteniendo la frecuencia y la fase constante. El nivel de amplitud puede ser usado para representar los valores binarios 0s y 1s. Podemos pensar en la señal portadora como un interruptor ON/OFF. En la señal modulada, el valor lógico 0 es representado por la ausencia de portadora, así que da ON/OFF la operación de pulsación y de ahí el nombre dado.

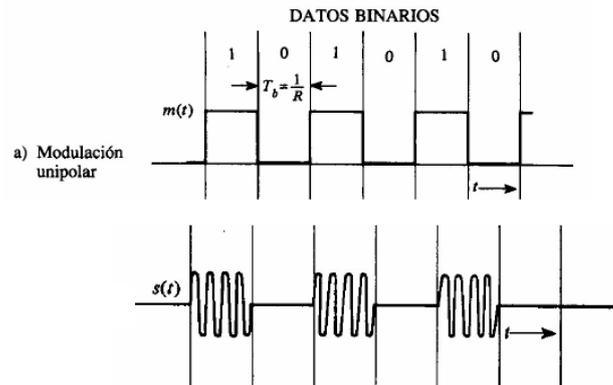


Figura 2.6: Modulación OOK [17]

2.3.2 Modulación por código de pulso (PCM).

Es un proceso digital de modulación para convertir una señal analógica en un código digital. La señal analógica se muestrea, es decir, se mide periódicamente. En un convertidor analógico/digital, los valores medidos se cuantifican, se convierten en un número binario y se decodifican en un tren de pulsos.

Unos ejemplos de modulación por código de pulso son los formatos unipolares, que se explicarán a continuación.

2.3.2.1 Formato de codificación no retorno cero (NRZ).

En el formato de *no retorno a cero* (NRZ, «Non-Return-to-Zero») el pulso abarca el intervalo de bit completo, de suerte

que, si se producen dos o más bits «1» sucesivos, la señal mantiene el nivel alto incluso durante las transiciones.

2.3.2.2 Formato de codificación retorno cero (RZ).

Cuando el pulso asociado a un «1» ocupa sólo una fracción del intervalo de bit, el formato de modulación recibe el nombre de *retorno a cero* o RZ («Return-to-Zero»), pues la transmisión de dos bits «1» consecutivos supone el paso por el nivel de «0».

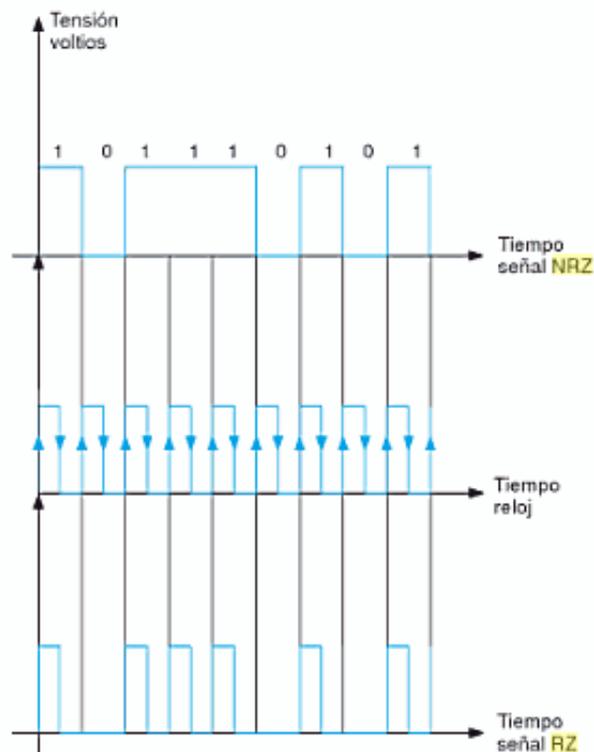


Figura 2.7: Señal NRZ y RZ [18]

2.4 Ruido y detección.

El proceso de transmisión de señales siempre se ve afectado por perturbaciones e interferencias no deseadas, que son producidas por señales ajenas a las mismas. Estas señales ajenas son las que ocasionan el ruido en los sistemas de comunicaciones, dado a que estas generalmente no son deseadas porque producen una distorsión en la recepción de la señal original.

2.4.1 Ruido térmico.

En transmisiones por fibra óptica la interacción térmica con los iones (que se encuentran vibrando) en un medio conductor, provocando el ruido principal en las resistencias. La corriente de ruido térmico i_t a través de una resistencia se expresa como:

$$\langle i_{termico}^2(t) \rangle = 4 \frac{k * T * B}{R} \quad (2.6)$$

Donde:

k = Es la constante de Boltzman, $1.28 \times 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right]$

T = Es la temperatura, en Kelvin (K).

B = Es el ancho de banda eléctrico.

R = Es la resistencia, en Ω

La densidad espectral de potencia (η), conocida como la potencia por unidad de frecuencia, por lo general se considera como una constante para todas las frecuencias ($0 < f < \infty$), es decir: [10]

$$\eta = 4kT \quad \left[\frac{W}{Hz} \right] \quad (2.7)$$

Y que la potencia sobre la resistencia es:

$$n = \frac{v_{neff}^2}{R} = i_{neff}^2 R \quad (2.8)$$

Puesto de la tensión o la corriente de ruido eficaces se expresan por:

$$\eta_v = 4kTR \quad \left[\frac{V^2}{Hz} \right] \quad (2.9)$$

$$\eta_i = \frac{4kT}{R} \quad \left[\frac{A^2}{Hz} \right] \quad (2.10)$$

Si el ancho de banda se encuentra entre las frecuencias f_1 y f_2 , que representa al ancho de banda $B = f_2 - f_1$ (ver figura 2.4), por lo tanto el cuadrado de la tensión eficaz de ruido, será:

$$v_{neff}^2 = \int_{f_1}^{f_2} \eta_v df = 4kTRB \quad [V^2] \quad (2.11)$$

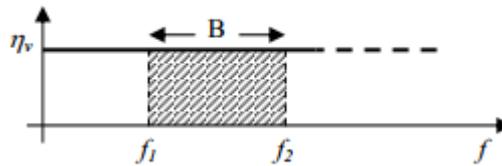


Figura 2.8: Densidad espectral del valor cuadrático medio de la tensión de ruido. [19]

2.4.2 Ruido de disparo.

Generado por la característica aleatoria del movimiento y generación de portadores en la juntura PN del foto-receptor. [20]

El ruido “shot” se debe a la propia naturaleza cuantificada de la detección de los fotones de la señal óptica incidente al fotodiodo. Esto va a hacer que la corriente eléctrica detectada de la señal sea un flujo discreto de electrones generados en instantes aleatorios. La corriente de ruido asociada al ruido shot de la señal empleada en el sistema se puede expresar de la siguiente forma:

$$\langle i_{shot}^2(t) \rangle = 2 * e * I_{DET} * B_{eq} \quad (2.12)$$

Donde I_{det} [A] es el valor promedio de la corriente instantánea detectada $i_{DET}(t)$. La corriente de oscuridad, se debe a la

generación térmica de pares e-h, que serán separados inmediatamente por la tensión inversa. Aunque la entrada al fotodiodo se cierre completamente, se generará corriente de oscuridad en su interior. El valor medio de la corriente de oscuridad va a depender del dispositivo fotodiodo empleado en el sistema. Como la generación térmica es de carácter estadístico también sobre la corriente media, I_{DARK} , se van a producir fluctuaciones que se manifiestan como ruido aditivo (ruido de oscuridad) a la fotocorriente detectada. La corriente de ruido asociada al ruido de oscuridad se puede expresar de la siguiente forma:

$$\langle i_{DARK}^2(t) \rangle = 2 * e * I_{DARK} * B_{eq} \quad (2.13)$$

Donde I_{DARK} es la corriente de ruido de fondo de entrada al fotodiodo. Normalmente $I_{DARK} \leq 10$ nA. La suma de las ecuaciones (2.6), (2.12) y (2.13) origina el término de corriente de ruido total presente en el circuito receptor:

$$\sqrt{\langle i_{RUIDO}^2(t) \rangle} = \sqrt{\langle i_{termico}^2(t) \rangle + \langle i_{shot}^2(t) \rangle + \langle i_{DARK}^2(t) \rangle} \quad (2.14)$$

2.4.3 Relación señal a ruido (SNR).

El desempeño de un receptor óptico depende de la relación señal a ruido (SNR). Esta relación esta dada por:

$$SNR = \frac{\text{Potencia promedio señal}}{\text{potencia ruido}} \quad (2.15)$$

Remplazando adecuadamente en la ecuación anterior, obtenemos la SNR para detector PIN:

$$SNR = \frac{(R * P_{in})^2}{\left[2 * q * (I_p + I_d) + 4 * \frac{K_B * T}{R_L} * F_n \right] * \Delta f} \quad (2.16)$$

En la mayoría de casos prácticos para receptores en donde domina el ruido térmico se tiene que $\sigma_T \gg \sigma_S$. En la siguiente ecuación se observa que la SNR se puede mejorar aumentando P_{in} o R_L :

$$SNR = \frac{R_L (R * P_{in})^2}{4 * K_B * T * F_n * \Delta f} \quad (2.17)$$

Para receptores en donde domina el ruido de disparo $\sigma_S \gg \sigma_T$ se tiene que:

$$SNR = \frac{R * P_{in}}{2 * q * \Delta f} \quad (2.18)$$

2.4.4 Tasa de error (BER).

Recordando, la probabilidad de error para una recepción digital:

$$BER = P(1/0) * p(0) + P(0/1) * p(1) \quad (2.19)$$

Donde $p(1)$ y $p(0)$ son las probabilidades de recibir un "1" y un "0", respectivamente. $P(1/0)$ es la probabilidad de decidir un "1" cuando se recibe un "0" y $P(0/1)$ es la probabilidad de decidir un "0" cuando se recibe un "1". Puesto que "1" y "0" tienen igual probabilidad de ocurrir $p(1) = p(0) = 1/2$. [21]

Entonces:

$$BER = \frac{1}{2}[P(1/0) + P(0/1)] \quad (2.20)$$

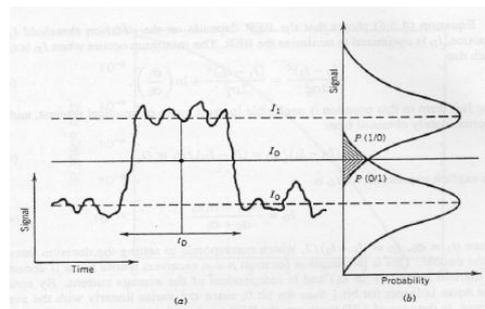


Figura 2.9: a) Fluctuaciones de la señal recibida en el receptor b) Densidades de probabilidad de "1" y "0". [21]

CAPITULO 3

3. DISEÑO Y ANÁLISIS DE RESULTADO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS CON TRANSMISIÓN OOK MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE MATLAB SIMULINK.

Para el diseño de un sistema de comunicaciones ópticas con transmisión digital, lo primero que debemos establecer son los requerimientos de nuestro enlace, es decir, velocidad de datos a la cual queremos transmitir la información, la distancia que va a cubrir nuestro enlace y sobretodo elegir de manera correcta los componentes que ayuden a cumplir de manera eficiente con los requerimientos establecidos. Las variables de los componentes opto

electrónicos deben estar interrelacionadas con las características de operación de la fibra, siendo estos de bajo costo y con un tiempo de vida durable de preferencia.

En este proyecto el sistema de comunicaciones ópticas a desarrollar será un sistema digital con una velocidad de datos y distancia determinada.

Requerimientos enlace óptico	
Velocidad de datos (Mb/s)	10
Distancia (km)	10

Tabla 3.1: Requerimientos enlace óptico

Para poder cumplir con estos requerimientos debemos realizar un diseño de ingeniería, en el cual se analizara cada una de las etapas del sistema, características de los componentes para de esta manera determinar si son aptos y tienen la capacidad de transmitir información con las especificaciones antes mencionadas. Los criterios de diseño del enlace óptico se detallan a continuación:

3.1 Criterio de diseño de un sistema de comunicaciones ópticas con transmisión OOK.

La base fundamental de un sistema de comunicaciones ópticas está comprendida por tres componentes fundamentales, fuente de luz, fotodetector y fibra óptica. Cada uno de estos componentes necesita estar en un circuito para poder realizar su respectiva función en el enlace óptico. También es importante destacar que estos componentes tienen características especiales que permiten determinar si cumplen con las especificaciones requeridas por el sistema óptico. Estas características son criterios fundamentales de diseño que nos permitirán determinar si un componente óptico puede interrelacionarse con otros para obtener un desempeño eficiente del enlace, los cuales describiremos de manera detallada a continuación.

3.1.1 Presupuesto de tiempo de subida.

Para calcular un estimado del tiempo de subida limitante total del sistema t_s requerido para un sistema óptico con esquema de codificación NRZ, modulación OOK y una tasa de datos R_{NRZ} , la cual es el factor principal que limita el tiempo de subida total del sistema t_s , está dado por la ecuación:

$$t_s = \frac{0.7}{R_{NRZ}} \quad (3.1)$$

De esta manera conoceremos el tiempo de subida permitido, el cual deberá estar repartido entre la fuente de luz, el fotodetector y la fibra de la siguiente manera:

$$t_s^2 = t_{LS}^2 + t_F^2 + t_{PD}^2 \quad (3.2)$$

Donde t_{LS} es el tiempo de subida de la fuente de luz y es un dato proporcionado por el respectivo fabricante, t_F es el tiempo de subida de la fibra el cual es un valor proporcional al producto del ancho espectral de la fuente de luz $\Delta\lambda$, la distancia en Km del enlace L y la dispersión de la fibra M_t , cabe recalcar que tanto el ancho de espectral de la fuente como la dispersión de la fibra son datos proporcionados por el fabricante. El tiempo de subida de la fibra se lo representa mediante la siguiente ecuación:

$$t_F = \Delta\lambda * L * M_t \quad (3.3)$$

El tiempo de subida del fotodetector, es el valor que limita la respuesta de velocidad de este componente opto electrónico. La resistencia de carga R_L y la capacitancia C_d son datos proporcionados por el fabricante. De esta manera el tiempo de subida de un fotodetector puede ser calculado mediante la ecuación:

$$t_r = 2.19 * R_L * C_d \quad (3.4)$$

El presupuesto de tiempo de subida nos permite diseñar un sistema en el cual la fibra aporta de manera mínima para la limitación del ancho de banda de un enlace.

Presupuesto de tiempo de subida	
Componente	Tiempo de subida (ns)
Presupuesto del sistema, $t_s = 0.7/R_{NRZ}$	70
Fuente de luz, t_{LS}	2.5
Fibra, $t_F = \Delta\tau$	48.50
Fotodetector, t_{PD}	0.9
Tiempo de subida del sistema, $(t_{LS}^2 + t_F^2 + t_{PD}^2)^{1/2}$	48.57

Tabla 3.2: Presupuesto de tiempo de subida

3.1.2. Presupuesto de potencia.

El presupuesto de potencia de un sistema de comunicaciones ópticas es un análisis que se realiza en el diseño debido a que los diferentes componentes del enlace óptico generan pérdidas, es decir que la potencia emitida por la fuente de luz a

lo largo de la transmisión sufre pérdidas, y no toda la potencia que emite la fuente de luz es recibida por el receptor. Las pérdidas de potencia en los sistemas de comunicaciones ópticas inician desde el momento en que la potencia es emitida por el transmisor, ya que el transmisor para funcionar de manera correcta necesita estar interrelacionado con la fibra, y para realizar esto debemos hacer uso de componentes opto electrónicos tales como conectores, acopladores, pigtails, empalmes, etc. los cuales nos permitirán recoger la mayor cantidad de luz y también nos permitirán lograr el acoplamiento entre el transmisor y la fibra óptica.

Por otro lado, el medio de transmisión sufre otro tipo de pérdidas, la primera pérdida que sufre el medio transmisión es la atenuación de la fibra por longitud del enlace, esta pérdida depende tanto de las características de la fibra las cuales son proporcionadas por el fabricante como también depende de la longitud del enlace. El otro tipo de pérdida, es la que ocurre a partir de los empalmes en la fibra, los cuales generan una pérdida de N empalmes ubicados a cierta distancia de separación, con el fin de interconectar la fibra.

Las pérdidas en el receptor son las mismas que en el transmisor, ya que este necesita de los mismos componentes para poder conectarse y acoplarse a la fibra.

El presupuesto de potencia considera el total de potencia óptica de pérdida permitido entre la fuente y el detector. El diseñador aparte de tomar en cuenta todas las pérdidas antes mencionadas debe considerar y permitir un "margen del sistema", como un factor de seguridad. La medida de la pérdida total de potencia se da como:

$$P = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (3.5)$$

Presupuesto de potencia			
Potencia de salida LED		-23.01 dBm	
Perdidas del sistema			
Componente	Perdidas (dB)	Cantidad	Perdida total (dB)
Perdida Pigtail	0.2	2	0.4
Perdida conector	0.1	2	0.2
Perdida empalme	0.4	3	1.2
Perdida Patchcord	0.4	2	0.8
Atenuación fibra	0.22 dB/km	10 km	2.2
Perdida total		4.8	
Receptor PIN			
Potencia disponible receptor (dBm)		-27.81	
Sensibilidad (dBm)		-39.54	
Margen de perdida (dB)		11.73	

Tabla 3.3: Presupuesto de potencia

3.2 Desarrollo del transmisor óptico

La fuente de luz es el componente principal del transmisor, pero no es el único elemento que lo conforma, ya que el transmisor necesita de otros componentes que en conjunto con la fuente de luz puedan transmitir información de manera eficiente. Este sistema de comunicación óptica es también un sistema digital unipolar, con esquema de codificación NRZ, por lo tanto, lo que el transmisor enviara son bits 0 o 1, esta secuencia de bits a su vez serán modulados por un modulador OOK, para luego pasar la fuente de luz, la cual se encarga de convertir la señal de entrada en potencia óptica, para enviarla al medio de transmisión.

3.2.1 Características y diagrama de bloques

Luego de un análisis de selección de fuentes de luz, se llegó a la conclusión que el mejor componente opto electrónico que permite obtener la velocidad de datos requerida por el sistema con esquema de codificación NRZ, tomando en consideración parámetros de distancia, longitudes de onda, ancho espectral y sobre todo el factor importante que limita la tasa de datos del sistema el tiempo de subida de la fuente, es un Diodo Emisor de Luz o conocido también como LED. Como se lo explico en capítulos anteriores existen varios tipos de

LED, en este proyecto el tipo de LED que permite satisfacer los requerimientos del sistema es el Edge Emitting Led (ELED). Como ya se mencionó anteriormente el transmisor tendrá un generador de datos binarios, los cuales serán modulados y finalmente convertidos en potencia óptica. Es oportuno recalcar que la potencia óptica total de salida del transmisor como ya se mencionó anteriormente tendrá ciertas pérdidas, estas pérdidas son representadas como una ganancia en el software de simulación. Toda esta explicación se la resume en el siguiente diagrama de bloques que representa la estructura de un transmisor óptico:

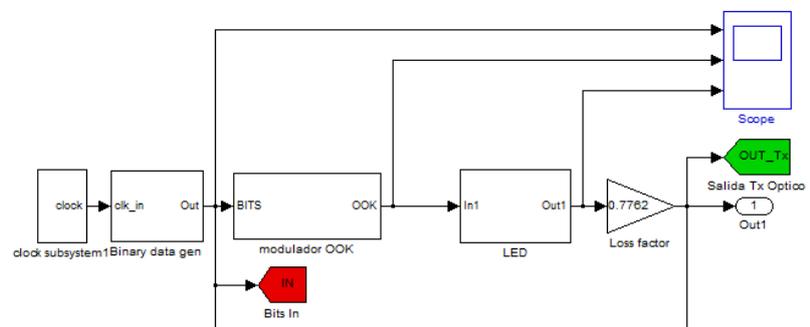


Figura 3.1: Transmisor óptico Simulink

3.2.2 Condiciones de diseño de los componentes utilizados.

El componente utilizado como fuente de luz es el 1550 nm Singlemode ELED Module, modelo ETX 1550FJ-S del fabricante EPITAXX.

EPITAXX ETX 1550FJ-S es un diodo LED de emisión lateral de alta potencia con pigtailed de fibra Monomodo. Ofrecen una alternativa de menor costo con respecto a los diodos láser de inyección en aplicaciones que requieren menos energía.

Las características del diodo LED de emisión lateral son las siguientes:

Características: 1550 nm Singlemode ELED Module				
CARACTERÍSTICAS ELECTRO ÓPTICAS				
Parámetros	Condiciones	Mínima	Típica	Máxima
Potencia óptica (μW)	$I_F = 100mA$	2	5	
Longitud de onda pico (nm)	$I_F = 100mA$	1520	1550	1580
Ancho espectral (nm)	$I_F = 100mA$		75	100
Tiempo de subida (nS)	$I_F = 100mA$		2.5	5

Tabla 3.4: Características Singlemode ELED Module

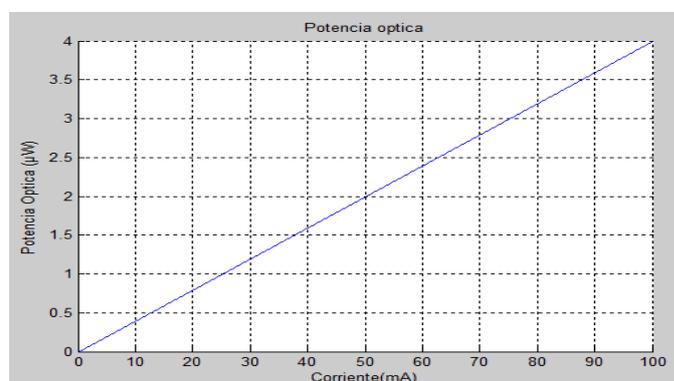


Figura 3.2: Potencia Vs. Corriente

POTENCIA LED		
Potencia DC	P_{DC}	$3\mu W$
Potencia AC	P_{AC}	$0.04 * (25e^{-3}) * \sin wt$
Potencia TOTAL	P_{TOTAL}	$3\mu W + 0.04 * (25e^{-3}) * \sin wt$
Potencia PROMEDIO	P_{AVG}	$2\mu W$

Tabla 3.5: Potencia Singlemode ELED Module

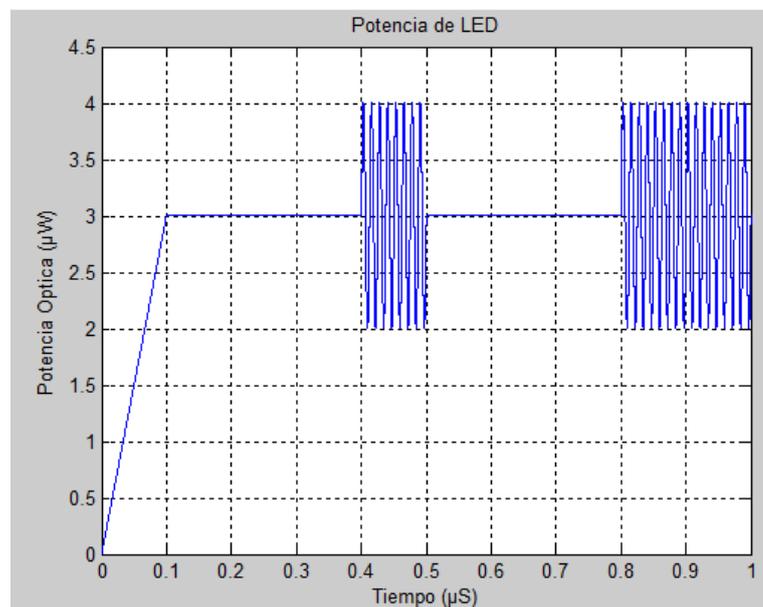


Figura 3.3: Potencia Singlemode ELED Module

3.2.3 Especificación del funcionamiento

El transmisor óptico está estructurado de la siguiente manera:

Clock subsystem:

El Transmisor óptico tiene un clock con frecuencia de 10 MHz, el cual ayuda a determinar la tasa de transmisión del enlace, controla que tan rápido se generan los bits.

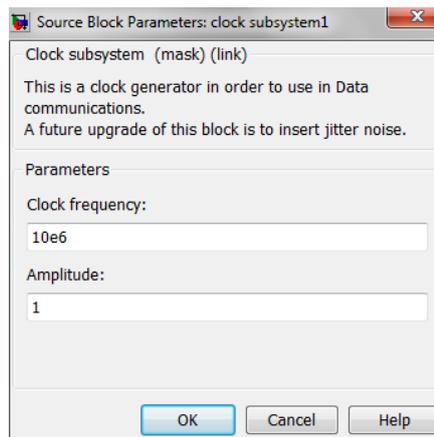


Figura 3.4: Parámetros Clock subsystem

Generador de datos binarios:

Necesita de la señal de reloj para generar secuencias de 32 bits a 10 MHz, transmite unos y ceros con probabilidad de 0.5, es decir igual cantidad de ceros e igual cantidad de unos transmitidos, con un número de muestras por bit, velocidad de transmisión y frecuencia de muestreo determinados a continuación:

PARÁMETROS SIMULACIÓN	
Generador de datos binarios	
Data Rate (Mb/s)	10
Tiempo de bit (μ S)	0.1
Núm. Muestras / bit	64
Tiempo de muestreo (nS)	1.56
Frecuencia de muestreo (MHz)	640

Tabla 3.6: Parámetros del generador de datos de la simulación

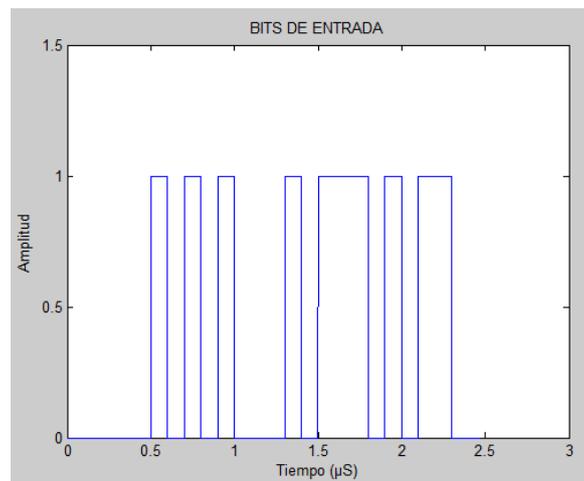


Figura 3.5: Señal de entrada

Modulador OOK:

Una vez generada la secuencia de bits, ingresa a un modulador OOK, el cual se encarga de multiplicar la señal

binaria por una portadora, creándose de esta manera la señal modulada On-Off, que se encarga de transportar la información, cuando el bit es un 1 la portadora esta On, caso contrario no existe portadora.

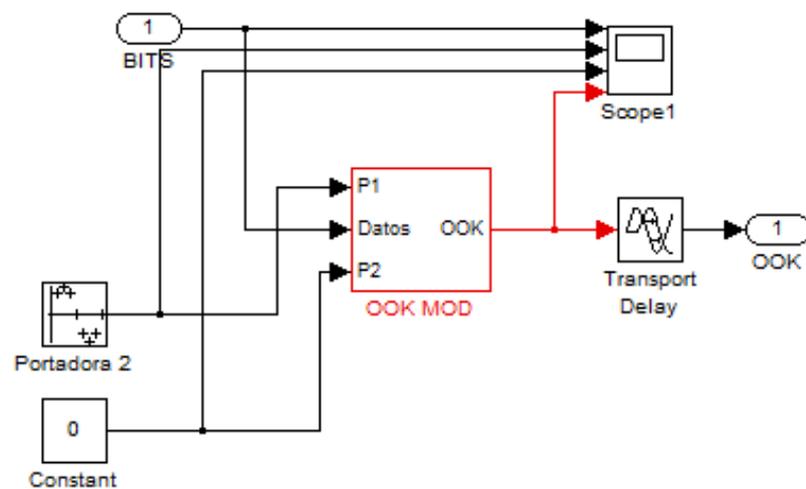


Figura 3.6: Estructura interna del modulador OOK

PARÁMETROS SIMULACION	
Portadora	
Tiempo de portadora (nS)	12.5
N oscilaciones / bits	8
Frecuencia portadora (MHz)	80
Delay (ns)	100

Tabla 3.7: Parámetros de la portadora de la simulación

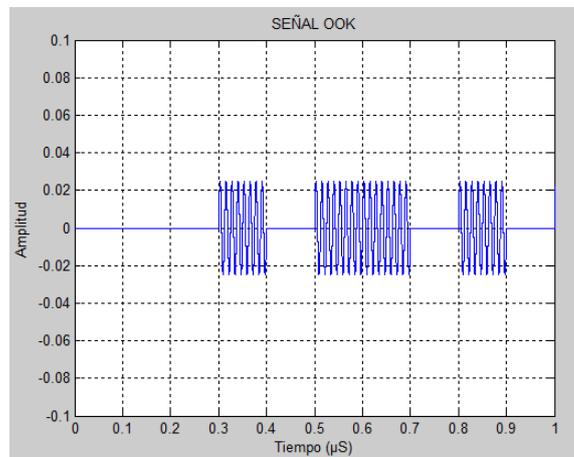


Figura 3.7: Señal modulada OOK

Fuente de luz:

La fuente de luz en este transmisor es un ELED, el cual tiene un tiempo de subida de 2.5 ns, el tiempo de subida es una característica muy importante, ya que nos permite saber cuál es la capacidad de ancho de banda del diodo emisor de luz ELED.

Se ha colocado un tiempo de retardo de 100 ns como un promedio para el circuito del LED.

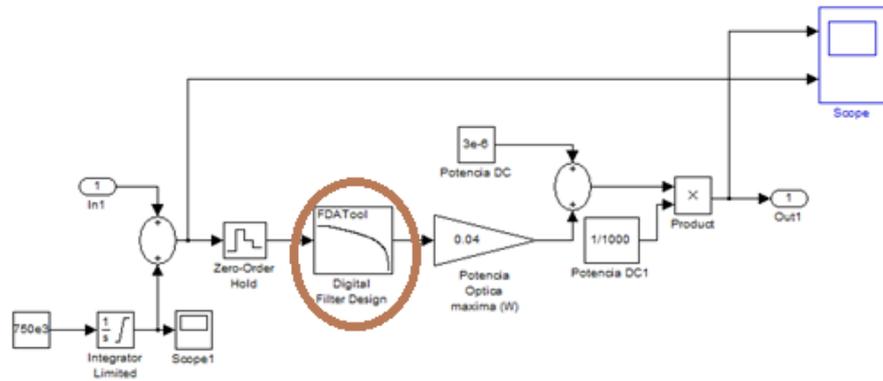


Figura 3.8: Estructura interna del LED

En la simulación el diodo ELED está representado por un filtro paso bajo, el cual tiene las siguientes características:

LED	
Características filtro pasa bajo	
Frecuencia de muestreo (MHz)	460
Frecuencia de corte (MHz)	80

Tabla 3.8: Características de filtro pasa bajo LED

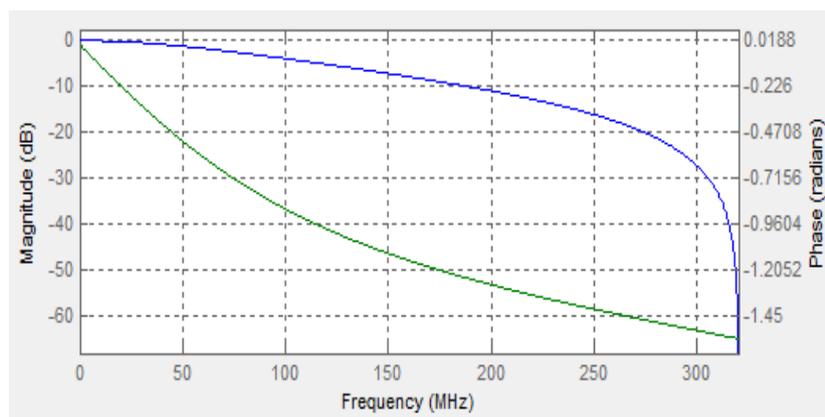


Figura 3.9: Respuesta magnitud (azul) y fase (verde) del filtro pasa bajo del LED

Perdidas por acople:

El acoplador de canal, esta representado por diferentes componentes electro ópticos, que se encargan de conectar la fuente de luz con la fibra.

Todos estos componentes, están representados como ganancia de perdida en la simulación.

Las perdidas en el transmisor son las siguientes:

Perdidas por acople (dB)	
Patchcord	0,6
Conector	0.1
Empalme	0.2
Pigtail	0.2
Perdida total en el transmisor	1.1

Tabla 3.9: Perdidas por acople transmisor

En términos de ganancia:

$$P_2 = P_1(0,772) \quad (3.6)$$

3.3 Desarrollo del canal de comunicaciones.

El canal de comunicación o medio de transmisión es la fibra óptica, la cual puede tener longitudes desde algunos metros hasta alcanzar varios kilómetros. A tramos regulares se interconectan repetidores que reconvierten las señales modificadas por la ruta de transmisión nuevamente en su forma original, en este proyecto debido a que el sistema de comunicaciones ópticas tiene un enlace corto no se hará uso de repetidores. A todo este se debe considerar el ruido y las perturbaciones, que provocan la pérdida de sincronismo así como el aumento de la cuota de error en las transmisiones digitales.

La capacidad de transmisión de la fibra depende de la distorsión de pulso.

Capacidad de Información						
		Óptico			Eléctrico	
		$\Delta(\tau/L)$	$f_{3-dB} * L$	$R_{NRZ} * L$	$f_{3-dB} * L$	
Fuente	$\lambda(\text{nm})$	$\Delta\lambda(\text{nm})$	(ns/km)	(MHz*km)	(Mb/s*km)	(MHz*km)
LED	1550	75	4.850	103.10	144.34	72.17

Tabla 3.10: Capacidad de información enlace óptico

3.3.1 Características y diagrama de bloque.

El medio de transmisión son tramos de fibra óptica del tipo monomodo, debido a su mayor anchura de banda ya que en

ella solo hay un único modo y por lo tanto desaparece la dispersión modal. Esta ventaja se aprecia especialmente cuando también se puede mantener pequeña la dispersión del material. En este momento cobra importancia el siguiente fenómeno: la distribución de campo y constante de propagación de los modos en guía ondas dependen de la relación entre la longitud de onda y la dimensión de la guía onda. Puesto que esta última permanece constante se obtiene una división de cada uno de los modos de la guía de onda, que es función de la longitud de onda denominada dispersión de la guía onda y que así mismo conduce a una propagación con diferentes velocidades de las fracciones monocromáticas contiguas de un paquete de ondas y, con ello a un ensanchamiento del pulso.

Estos fenómenos de dispersión todavía muy pequeños posibilitan la transmisión de casi cualquier cantidad de información, alcanzándose sobre todo también el margen de longitud de onda de alrededor de los 1300nm, atenuaciones muy pequeñas (hasta 0.5 dB/km).

Los retardos relativos ocasionan ensanchamiento de del impulso que, a una velocidad dada, conducen a confluencias de los impulsos que se hacen mayores con rutas de

transmisión más largas. De ello resulta una limitación general de la longitud de las fibras para la transmisión óptica.

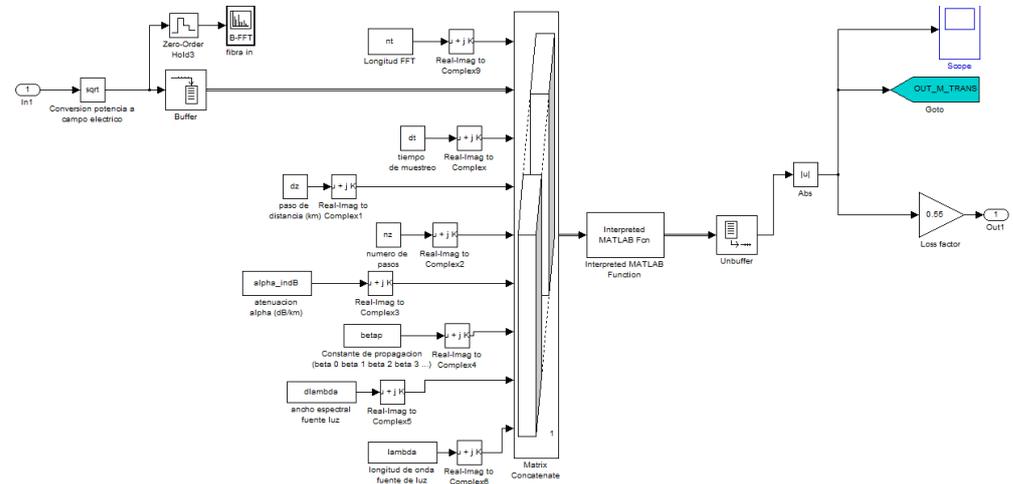


Figura 3.10: Estructura del canal de comunicaciones

3.3.2 Condiciones de diseño de los componentes utilizados.

Fibra óptica como canal de transmisión, la cual tiene las siguientes características y parámetros:

- Transmisión sin distorsión, conversión potencia óptica en campo eléctrico.
- Muy baja potencia de pérdidas de la Fibra.
- Dispersión que genera ensanchamiento del impulso óptico.
- En las Fibras monomodo el ensanchamiento es menor.

- La dispersión del material es el último límite de la transmisión **B**.

CANAL DE COMUNICACIONES		
SMF-28 single-mode optical fiber		
CARACTERÍSTICAS		
Diametro (μm)	d	8.2
Apertura numérica	NA	0.14
Longitud de onda de dispersión cero (nm)	λ_0	1313
Diferencia de índice de refracción	Δn	0.36%
Índice de refracción del grupo efectivo (a 1550 nm)	N_{eff}	1.4682
Atenuación (d_B/km)	α	0.22
Dispersión (ps / nm * km)	D	64.66

Tabla 3.11: Características SMF-28 single-mode optical fiber

3.3.3 Especificación del funcionamiento

La propagación de pulso ópticos, están representados por la ecuación de Schrödinger, la cual se resuelve utilizando Split Step Fourier Method. Lo que considera a la fibra como un filtro pasa bajo. Es importante recalcar que lo que se transmite en la fibra es campo eléctrico. Transformado de potencia óptica a campo a eléctrico. Para efectos prácticos se considera que la potencia es el cuadrado del campo eléctrico, es decir para tener campo eléctrico a partir de potencia óptica se obtiene la

raíz cuadrada de la potencia, ignorando de esta manera la impedancia de onda.

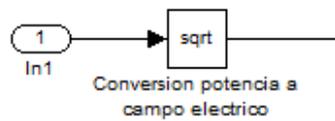


Figura 3.11: Conversión de campo eléctrico a potencia

La señal de campo eléctrico obtenida de 32 bits, se muestrea 64 veces, por lo tanto la dimensión de la trama es de 2048. Este parámetro en la simulación se denomina *nt*.

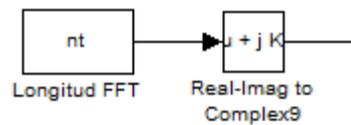


Figura 3.12: Parámetro dimensión de campo eléctrico

El buffer convierte la señal de tiempo en un vector, para que la matriz pueda procesar, concatenar los datos.



Figura 3.13: Buffer canal de comunicación

Otros parámetros detallados a continuación, están definidos según el requerimiento del enlace y características establecidas por el fabricante. Todos estos parámetros son constantes que están definidas en el archivo inicial, el cual se encarga de guardar los datos en el Workspace del software MATLAB.

- Parámetro tiempo de muestreo dt .
- Parámetro paso de distancia dz .
- Parámetro numero de pasos nz .
- Parámetro atenuación $alpha_indB$.
- Parámetro constante de propagación $betap$.
- Parámetro ancho espectral fuente de luz $d\lambda$.
- Parámetro longitud de onda fuente de luz λ .

Estos parámetros ingresan a una matriz, la cual se encarga de concatenar, es decir se encarga de agregar todos los parámetros antes mencionados al vector de dimensión de 2048.

Este vector ingresa a una función de MATLAB, la cual resuelve toda la información, dando como resultado un vector de mayor dimensión. Esta función divide la fibra y hace un análisis por cada pedazo de fibra para la transmisión y compensación de la dispersión.

Figura 3.15: Un-buffer bloque Simulink

Perdidas por acople:

El medio de transmisión, se divide en dos tramos de fibra, los cuales se empalman a 5km. Esta y otras pérdidas características de la fibra. Causan perdidas las cuales se detallan a continuación:

Perdidas Canal Comunicación (dB)	
Atenuación	2.2
Empalme	0.2
Perdida total	2.4

Tabla 3.12: Perdidas canal de comunicación

En términos de ganancia :

$$P_2 = P_1(0,555) \quad (3.7)$$

Las perdidas en el canal de comunicación podrucenn una perdida de energia , esta perdida de energia es conocida como atenuación, en nuestro sistema la señal se atenúa de la siguiente manera:

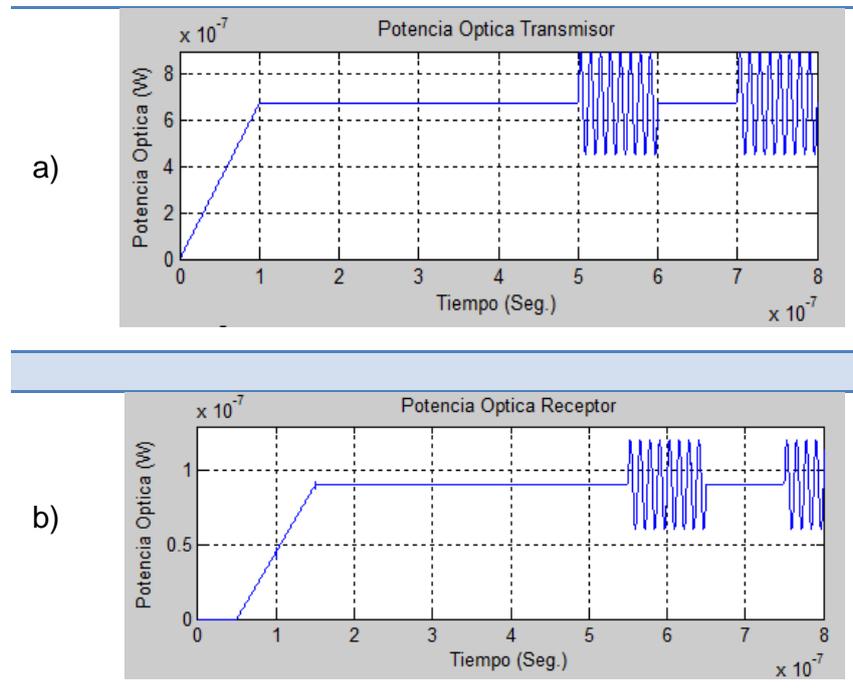


Figura 3.16: a) Señal óptica transmisor b) Señal óptica atenuada 0.22 dB/km

El factor de pérdida dentro de la simulación se representa en el siguiente bloque:



Figura 3.17: Factor de pérdida

3.4 Desarrollo del receptor óptico.

El circuito de recepción es el elemento más complejo del sistema de Comunicaciones Ópticas, ya que es el encargado de realizar la fotodetección, es decir recibir la secuencia de bits ópticos, para transformarla en secuencia de bits eléctricos, también tiene la función de recuperar la sincronización. Se conforma también por un demodulador el cual se encarga de multiplicar la señal que ingresa por un oscilador local y por último mediante un circuito de decisión, decide sobre el valor de bit recibido, mediante un valor umbral preestablecido y fijo.

3.4.1 Características y diagrama de bloque.

Consta de un detector opto electrónico el cual puede ser un fotodiodo PIN o un fotodiodo de avalancha (APD) y de una serie de circuitos recuperadores de la señal: filtro, comparador, etc.

El receptor de un sistema de comunicación óptico está formado por dos bloques funcionales fundamentales:

- El bloque detector, su componente fundamental es el detector de luz, un dispositivo optoelectrónico semiconductor, su

función principal transformar la luz recibida en corriente eléctrica.

- El circuito de recepción. Se ocupa de amplificar y depurar la señal recibida. Consta de diversos módulos: amplificador, filtro, comparador, circuito de decisión, etc.

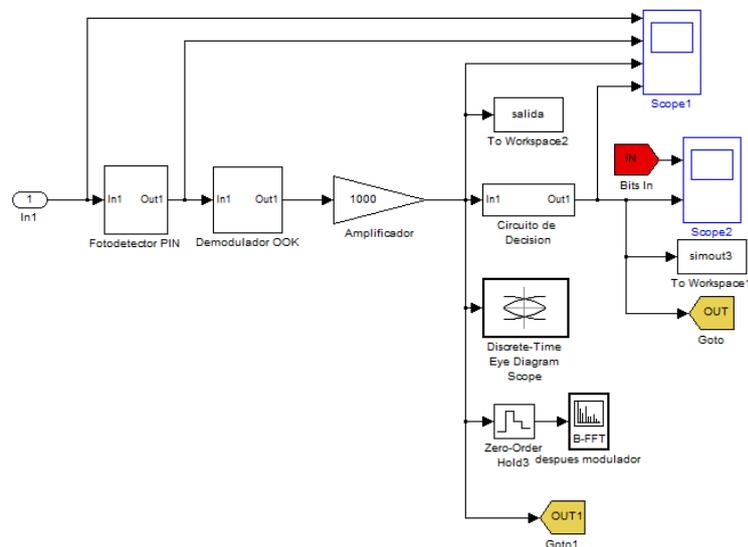


Figura 3.18: Estructura del receptor óptico

3.4.2 Condiciones de diseño de los componentes utilizados.

El fotodetector utilizado en este sistema óptico es el J16 series Germanium PIN detector, modelo J16-18AR250U-HS del fabricante G&G JUDSON.

J16-18AR250U-HS series Germanium detector, esta diseñado para operar a un rango de longitud de onda de 0,8 μm a 1,8 μm . Tiene un circuito de realimentación que convierte la corriente del fotodetector a voltaje, mientras que un opamp mantiene el detector cerca de cero voltios de polarización para minimizar el ruido.

Las características del fotodetector de germanio son las siguientes:

CARACTERÍSTICAS ELECTRO ÓPTICAS			
Fotodetector: J16 series Germanium PIN detector			
Material	Germanio	Corriente oscura (μA)	0.1
Estructura	PIN	Capacitancia (nF)	0.02
Tiempo de subida (nS)	0.9	Resistencia de carga (Ω)	50
Longitud de onda (nm)	800-1800	Frecuencia de corte (MHz)	400
Responsividad (A/W)	0.9		

Tabla 3.13: Características fotodetector J16 series

3.4.3 Especificación del funcionamiento.

Fotodetector:

Como ya se menciona anteriormente, el fotodetector se encarga de transformar los pulsos ópticos en pulsos eléctricos; en la simulación esta representado por la detección de ley cuadrática, es decir elevar al cuadrado la señal de entrada, lo

que significa que el fotodetector absorbe la energía óptica y luego la convierte en corriente eléctrica.

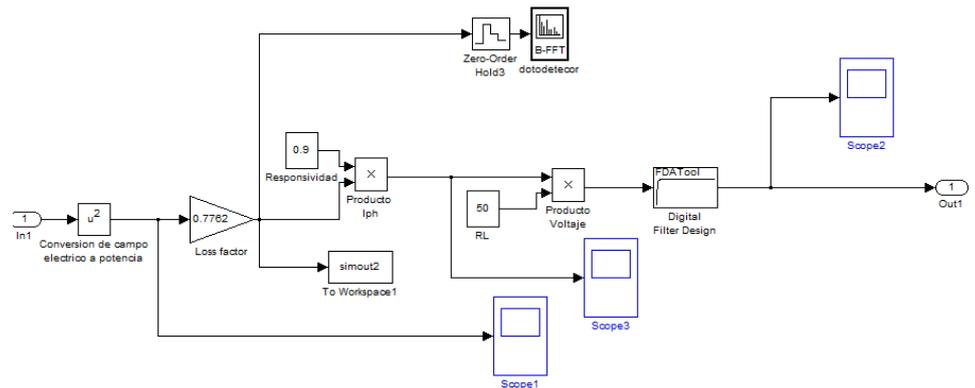


Figura 3.19: Estructura fotodetector

La señal de salida del medio de transmisión (campo eléctrico), es convertida a potencia óptica, el acoplador enfoca esta señal mediante el uso de componentes electroópticos que se encargan de conectar el medio de transmisión con el fotodetector.

Todos estos componentes, están representados como ganancia de pérdida en la simulación.

Las pérdidas en el receptor son las siguientes:

Perdidas por acople (dB)	
Patchcord	0,6
Conector	0.1
Empalme	0.2
Pigtail	0.2
Perdida total en el transmisor	1.1

Tabla 3.14: Perdidas receptor óptico

En términos de ganancia:

$$P_3 = P_2(0,772) \quad (3.8)$$

La potencia con las pérdidas, se multiplica por la Responsividad, característica dada por el fabricante, de este producto se obtiene la corriente de fotodetector, la cual pasa por un convertidor de corriente a voltaje.

Demodulador:

Multiplica la señal que ingresa por un oscilador local de 80 MHz. A continuación la señal resultante se hace pasar por un filtro pasa bajo.

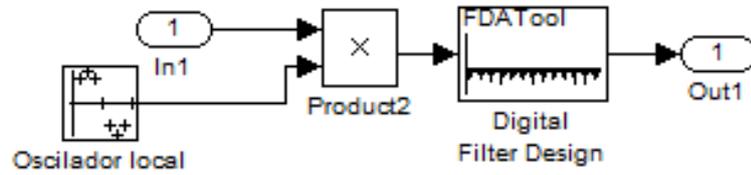


Figura 3.20: Estructura demodulador

Circuito de decisión:

El circuito de decisión, tiene la función de decidir sobre el bit recibido, mediante la comparación con un valor umbral fijo. Si el valor recibido, supera al valor del umbral del detector será “1”, caso contrario decidirá “0”. Un error de detección se produce cuando un bit “1” es detectado como un bit “0” y viceversa.

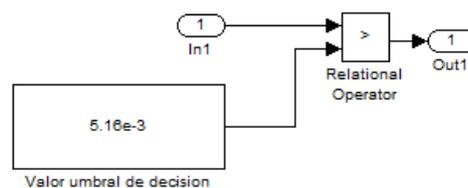


Figura 3.21: Circuito de decisión

3.4.4 EVALUACIÓN DE LA SEÑAL EN RECEPCIÓN:

La señal recibida por el fotodiodo, pasa por una serie de circuitos los cuales recuperan la información original con la

mayor fidelidad posible. En este proyecto de transmisión digital estos circuitos son un filtro y un circuito de decisión. Para evaluar la calidad de la señal recibida se realizan los siguientes análisis:

3.4.4.1 Análisis de diagrama de ojo.

Un diagrama de ojo es una representación de los pulsos recibidos, es una imagen mostrada en la cual una señal de información digital perteneciente a un receptor es muestreada varias veces y es mostrada en la entrada vertical.

Análisis del comportamiento de la señal como la prolongación de la señal sea esta demasiado larga o demasiado corta; sincronización de la señal con respecto al reloj del sistema, cambios muy lentos, offset muy grande, el diagrama de ojos hace posible todos estos análisis. Un diagrama de ojo abierto corresponde a la mínima distorsión de la señal. La distorsión de la forma de la señal con respecto a la interferencia entre símbolos y al ruido, aparece mientras se cierra el diagrama de ojo.

El diagrama de ojos es una herramienta fundamental para la evaluación del efecto de la interferencia entre símbolos y el

ruido en el sistema de comunicación. La gráfica de un diagrama de ojo es la superposición sincronizada de todas las posibles realizaciones de la señal de salida del receptor vistas dentro de un intervalo de tiempo. La grafica resultante se asemeja a un ojo humano, cuando la señal es binaria. La región interior del diagrama de ojo es llamada apertura del ojo.

Un diagrama de ojos proporciona la siguiente información:

- La amplitud de la apertura del ojo, define el intervalo de tiempo sobre el cual la señal recibida puede ser muestreada sin errores debidos al ISI.
- El instante de muestreo preferido es el máximo punto de apertura del ojo.
- La sensibilidad del sistema a errores de temporización es determinada por la tasa de clausura del ojo mientras se varía el tiempo de muestreo.
- La altura de la apertura del ojo a un tiempo de muestreo específico define el margen de error del sistema.
- Cuando el efecto del ISI es severo, el ojo esta casi cerrado.
- Las no linealidades en el canal de comunicación causan asimetrías en el patrón de ojos; de otra manera es simétrico.

La interpretación de un diagrama de ojos se muestra en la siguiente figura:

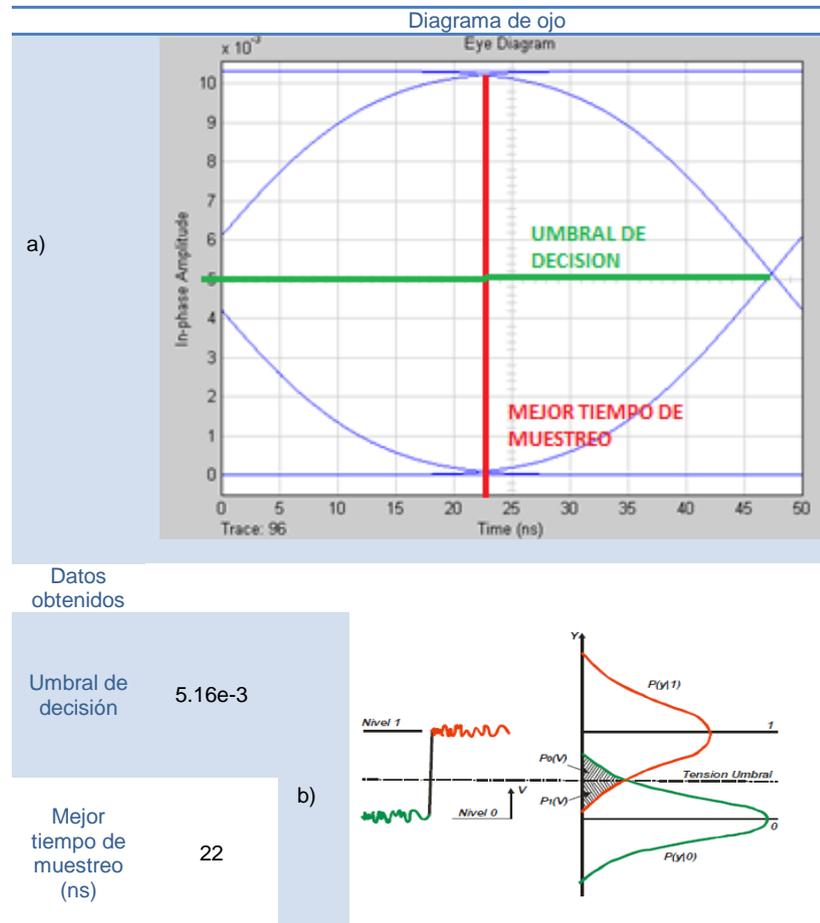


Figura 3.22: a) Diagrama de ojo b) Selección del nivel de discriminación

3.4.4.2 Tasa de error

La tasa de error de bit o BER mide el promedio de errores ocurridos en la transmisión. El BER se emplea como parámetro de diseño del sistema.

$$BER = \frac{\text{Número de errores}}{\text{Números de bits transmitidos}}$$

En el receptor, si estamos detectando una señal ruidosa, habrá “ceros” que se puedan confundir como “unos” y “unos” que se puedan confundir como ceros, dependiendo de lo ruidosa que sea la señal y de donde coloquemos el umbral de decisión.

Bit Error Rate	
Números de bits enviados	4.633e4
Números de bits errados	0
BER	0

Tabla 3.15: Bit Error Rate

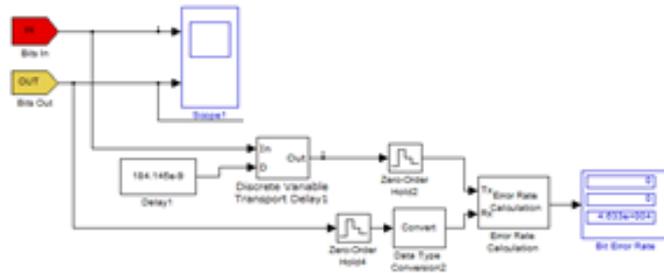


Figura 3.23: Cálculo Bit Error Rate

3.4.4.3 Retardo de la señal.

Es el tiempo que tarda la información en viajar por la línea de transmisión desde el emisor hasta el receptor, depende de la distancia y del medio. Existe en todo sistema de comunicaciones debido a diferentes factores. El retardo de la señal de este sistema de comunicaciones ópticas se muestra en la siguiente grafica, y es igual a 184.145 ns.

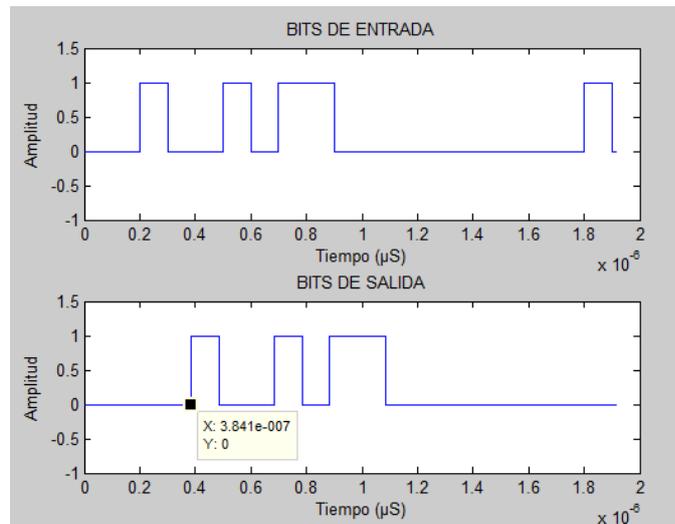


Figura 3.24: Retardo de señal de entrada.

3.4.4.4 Contribución de ruido.

Para el análisis del comportamiento del enlace óptico frente a la contribución de ruido, se ha colocado un generador de ruido blanco (AWGN) en el receptor óptico como se muestra continuación:

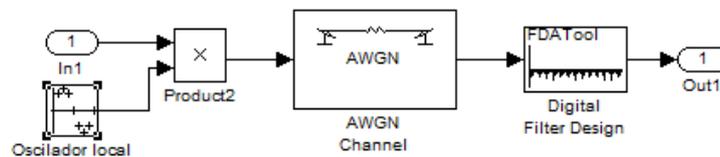


Figura 3.25: Generador de ruido en el receptor óptico.

La señal detectada con contribución de ruido tiene el siguiente comportamiento:

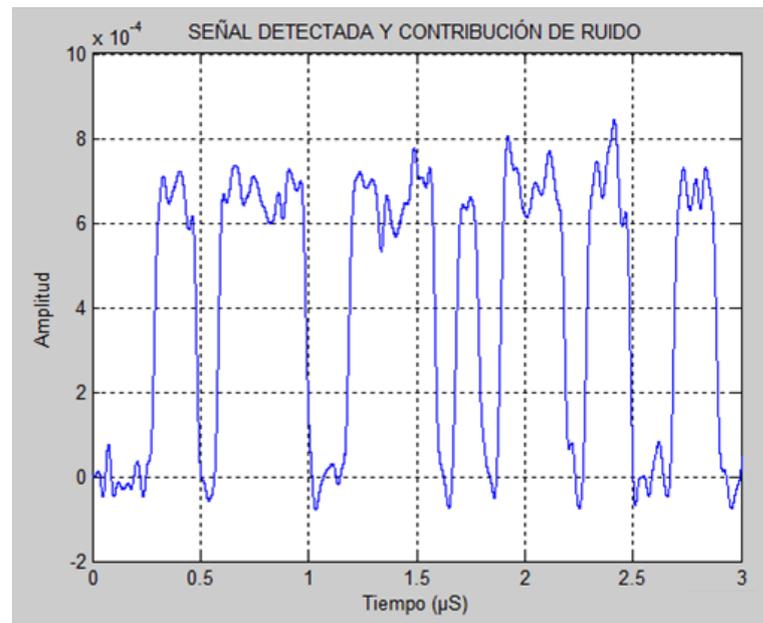


Figura 3.26: Señal detectada y contribución de ruido.

En el diagrama de ojo del sistema de comunicación óptico con ruido, los pulsos recibidos no tienen todos ellos la misma amplitud, debido a la presencia de ruido se adelantan o atrasan respecto a su reloj, por la presencia de jitter.

Mientras mayor sean las distorsiones, el ojo será más cerrado, y por lo tanto será más difícil establecer el umbral de decisión entre un nivel alto “1” y uno bajo “0”.

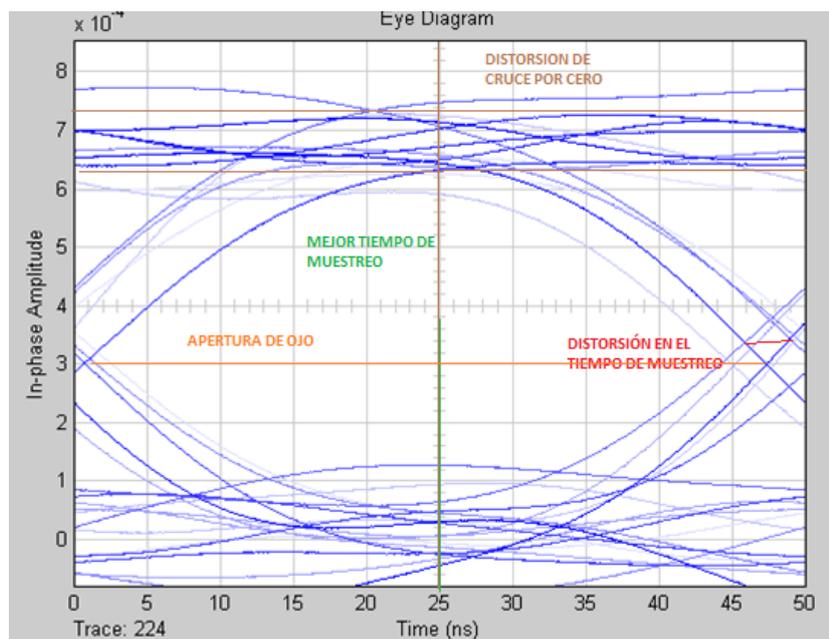


Figura 3.27: Diagrama de ojo del sistema óptico con ruido.

Como ya se menciona anteriormente, debido a que la señal detectada es una señal ruidosa, habrá “ceros” que se confundan con “unos” y “unos” que se confundan con “ceros”, todo esto dependerá de lo ruidosa que sea la señal. El promedio de errores ocurridos en la transmisión con presencia de ruido es:

Bit Error Rate	
Números de bits enviados	4.096e5
Números de bits errados	3369
BER	0.008225

Tabla 3.16: Bit Error Rate sistema con ruido, $E_b/N_0 = 10$.

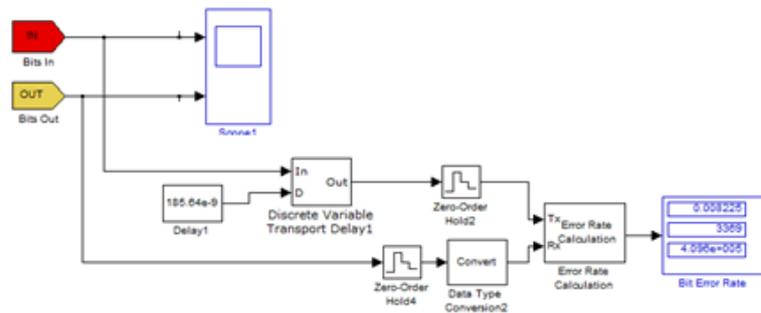


Figura 3.28: Cálculo Bit Error Rate.

Para el análisis de la relación de señal a ruido (SNR) para este sistema se han considerado valores de 0 a 10 dB para el parámetro E_b/N_0 (relación de energía por bit / densidad espectral de potencia).

Análisis SNR	
E_b/N_0	BER
2	2.606e-2
4	2.109e-2
6	0.0178
8	0.008
10	8.225e-5

Tabla 3.17: Análisis SNR

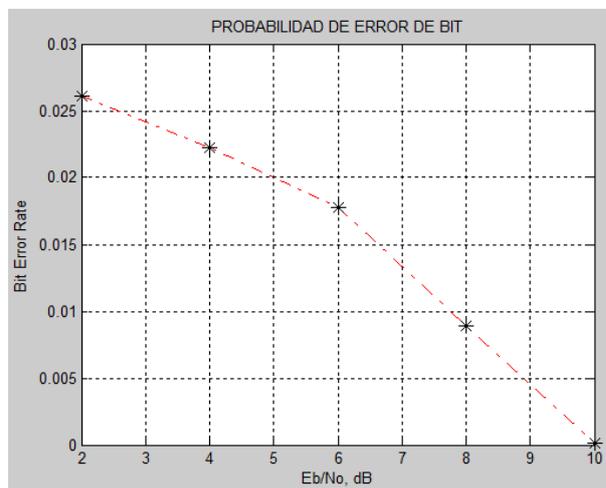


Figura 3.29: Probabilidad de Error de Bit.

CONCLUSIONES

1. Transmitir información a altas velocidades y de manera eficiente es el objetivo principal de todo sistema de comunicación. Mediante el uso correcto de la fibra óptica y gracias a sus características, esto es posible, ya que mediante impulsos de señales moduladas de luz se puede transmitir en un canal más grande gran cantidad de información a altas velocidades de datos.
2. La fibra óptica es un medio transmisión ideal, ya que su material dieléctrico, lo convierte en un sistema totalmente independiente, inmune a interferencias electromagnéticas y sin posibilidad de causar interferencia a otros sistemas.
3. La fibra óptica gracias a sus características produce una reducida atenuación a la señal, es decir la potencia de luz disminuye a medida que viaja por la fibra, cabe destacar que este factor se produce por imperfecciones propias del material de la fibra como por ejemplo impurezas de vidrio o las estructuras heterogéneas que se forman

durante el proceso de fabricación, por lo tanto queda a decisión del diseñador el tipo de fibra a escoger, el cual deberá ser el que tenga reducida atenuación para optimizar el funcionamiento del enlace óptico.

4. En la propagación de luz en fibras ópticas, el límite de la capacidad de la fibra esta determinado por la dispersión, a mayor dispersión, el pulso se integra en el siguiente periodo de bit y esto produce interferencia entre símbolos.
5. Para diseñar un sistema de comunicaciones ópticas, es de gran importancia establecer requerimientos, en base a estos requerimientos se facilita la elección de los componentes que proporcionen un desempeño eficiente al sistema.
6. En base a los conocimientos adquiridos en la elaboración de este proyecto, se puede decir que los parámetros fundamentales para diseñar un sistema óptico eficiente son las elecciones correctas de tiempo de muestreo, correcto diseño de la señal de entrada y la portadora.
7. En todo sistema de comunicaciones ópticas se debe usar conectores, los cuales permiten el acoplamiento o la interconexión entre la fuente y la

fibra o la fibra y el fotodetector; todos estos componentes permiten transferir el máximo de energía luminosa de un elemento o de otro.

8. El empalme de dos fibras entre sí, es imprescindible cuando la fibra resulta más corta que la longitud total que abarca el sistema de comunicación óptico; los empalmes producen pérdidas al sistema, las cuales pueden ser mínimas o considerables, dependiendo del número de empalmes a utilizar por el diseñador.

9. Al incrementar la longitud del enlace, la señal sufre distorsión, a medida que aumenta la longitud del enlace aumenta la dispersión y por lo tanto aumenta el ancho de pulso, uniéndose entre si, haciéndose indistinguibles para el receptor.

10. En el diseño de un sistema de comunicación óptica se deben considerar dos aspectos fundamentales: cálculo de las pérdidas de la potencia óptica que ocurre entre la fuente de luz y el fotodetector y la Determinación de las limitaciones de ancho de banda para la transmisión de datos impuestas por el transmisor, fibra óptica y receptor.

11. La distorsión durante la transmisión es inevitable debido a las diferentes fuentes de distorsión. Los filtros de canal son de suma importancia ya que hacen más eficiente el ancho de banda y ayudan a reducir la

interferencia, pero tienen sus desventajas, ya que los filtros también distorsionan la señal.

12. Otro tipo de distorsión ocurre, cuando el tiempo de muestreo no funciona de manera correcta, es decir la señal es muestreada muy rápido o muy lento. Todo lo antes mencionado produce interferencia entre símbolos que es el efecto de un pulso en la detección en otros intervalos.

RECOMENDACIONES

1. Tener en consideración que para enlaces mayores a 2 km es recomendable usar fibra monomodo, mientras que para enlaces menores a 2 km se puede utilizar fibra multimodo.
2. Se recomienda para enlaces de corta distancia utilizar un LED, el cual emite un haz de luz infrarrojo de baja intensidad. Para un enlace de larga distancia se utiliza el diodo láser que se conmuta a una velocidad mucho más alta y emite una luz coherente y de mayor potencia.
3. Si en este diseño se cambiara el tipo de fibra a utilizar, en vez de monomodo se utilizara fibra multimodo, se recomienda verificar el parámetro de dispersión, ya que este no sería el mismo, la dispersión de una fibra multimodo depende de la dispersión de material y la dispersión modal.
4. Se recomienda incorporar un sistema de ruido y realizar un análisis para la mejora del sistema de comunicaciones, incrementando la velocidad de

datos y la distancia de alcance, para lo cual se debe encontrar los componentes apropiados.

5. Se debe tener presente que todos los resultados son obtenidos a partir de simulaciones, si se desea realizar una implementación física se deberá realizar ajustes y análisis experimentales.

APÉNDICE

DATASHEET LED

EPITAXX INC

24E D ■ 3360406 0000115 2 ■

EPITAXX

ETX 1550FJ-S, ETX 1550FC-S/XX

T-41-07

1550 nm Singlemode ELED Module

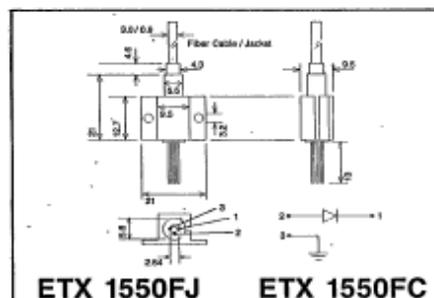
Description:

EPITAXX ETX 1550FJ-S and ETX 1550FC-S are high power edge-emitting LED modules with singlemode fiber pigtails. The devices are mounted in a flanged package for heatsinking. They offer a lower cost alternative to injection laser diodes in applications requiring less power such as fiber optic test equipment. The FJ model has a jacketed fiber pigtail while the FC model comes with a buffer cable terminated with a choice of connectors.

Features:

- 5 μ W at 100mA
- 1550nm peak wavelength
- 75nm spectral width
- XX=FC, ST, BC (Biconic), D4
- 3nS rise/fall time

Dimensions:



Maximum Ratings:

Parameter	Rating
Reverse Voltage	1V
Forward Current	100mA
Operating Temperature	-20/ + 65C
Storage Temperature	-40/ + 85C

Optical/Electrical Characteristics (@ 25C)

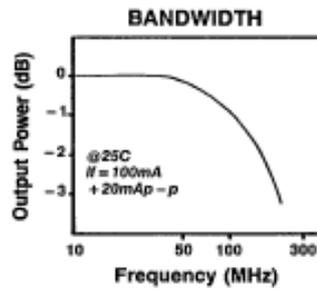
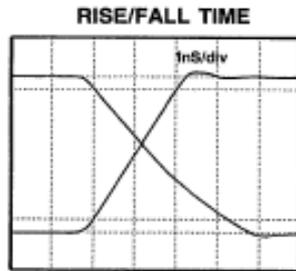
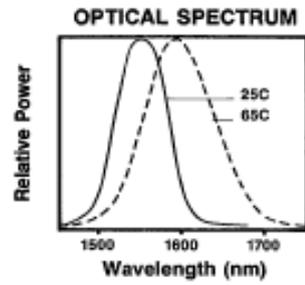
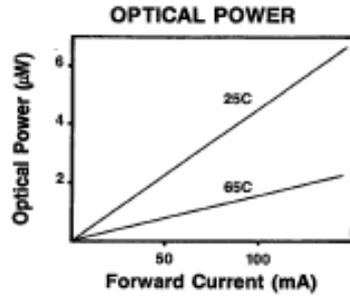
Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Optical Power	I _F = 100mA	2	5		μ W
Forward Voltage	I _F = 100mA		1.5	2	V
Peak Wavelength	I _F = 100mA	1520	1550	1580	nm
Spectral Half Width	I _F = 100mA		75	100	nm
Rise Time	R _L = 50 Ω		2.5	5	nS
Fall Time	R _L = 50 Ω		3.5	5	nS

Corporate Headquarters

West Coast Sales Office

3490 US Route 1 • Princeton, NJ 08540
(609) 452-1188 • TLX: 759363 • FAX: (609) 452-0824

2121 Ave. of the Stars, 6 Fl • Los Angeles, CA 90067
(213) 551-6507 • FAX (213) 551-6577



Disclaimer

Pitaxx, Inc., believes the information contained in this document to be accurate. However, no responsibility is assumed for its use or for any infringement of the rights of third parties. Right to introduce changes without notice is reserved. IT is a registered trademark of AT&T.

DATASHEET FIBRA ÓPTICA

Corning® SMF-28™ Optical Fiber

Product Information



PI1036
Issued: April 2002
Supersedes: December 2001
ISO 9001 Registered

Corning® Single-Mode Optical Fiber

The Standard For Performance

Corning® SMF-28™ single-mode optical fiber has set the standard for value and performance for telephony, cable television, submarine, and utility network applications. Widely used in the transmission of voice, data, and/or video services, SMF-28 fiber is manufactured to the most demanding specifications in the industry. SMF-28 fiber meets or exceeds ITU-T Recommendation G.652, TIA/EIA-492CAAA, IEC Publication 60793-2 and GR-20-CORE requirements.

Taking advantage of today's high-capacity, low-cost transmission components developed for the 1310 nm window, SMF-28 fiber features low dispersion and is optimized for use in the 1310 nm wavelength region. SMF-28 fiber also can be used effectively with TDM and WDM systems operating in the 1550 nm wavelength region.

Features And Benefits

- Versatility in 1310 nm and 1550 nm applications
- Enhanced optical properties that optimize transmission performance
- Outstanding geometrical properties for low splice loss and high splice yield
- OVD manufacturing reliability and product consistency
- Optimized for use in loose tube, ribbon, and other common cable design

The Sales Leader

Corning SMF-28 fiber is the world's best selling fiber. In 2001, SMF-28 fiber was deployed in over 45 countries around the world. All types of network providers count on this fiber to support network expansion into the 21st Century.

Protection And Versatility

SMF-28 fiber is protected for long-term performance and reliability by the CPC® coating system. Corning's enhanced, dual acrylate CPC coatings provide excellent fiber protection and are easy to work with. CPC coatings are designed to be mechanically stripped and have an outside diameter of 245 µm. They are optimized for use in many single- and multi-fiber cable designs including loose tube, ribbon, slotted core, and tight buffer cables.

Patented Quality Process

SMF-28 fiber is manufactured using the Outside Vapor Deposition (OVD) process, which produces a totally synthetic ultra-pure fiber. As a result, Corning SMF-28 fiber has consistent geometric properties, high strength, and low attenuation. Corning SMF-28 fiber can be counted on to deliver excellent performance and high reliability, reel after reel. Measurement methods comply with ITU recommendations G.650, IEC 60793-1, and Bellcore GR-20-CORE.

Optical Specifications

Attenuation

Wavelength (nm)	Attenuation* (dB/km)	
	Premium	Standard
1310	≤0.34	≤0.35
1550	≤0.20	≤0.22

*Alternate attenuation values available upon request

Point Discontinuity

No point discontinuity greater than 0.10 dB at either 1310 nm or 1550 nm.

Attenuation at the Water Peak

The attenuation at 1383 ± 3 nm shall not exceed 2.1 dB/km.

Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. Δ Difference (dB/km)
1285 - 1330	1310	0.05
1525 - 1575	1550	0.05

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α.

Attenuation with Bending

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550	≤0.50
50	100	1310	≤0.05
50	100	1550	≤0.10
60	100	1550	≤0.05

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

Cable Cutoff Wavelength (λ_{cutoff})

$$\lambda_{\text{cutoff}} \leq 1260 \text{ nm}$$

Mode-Field Diameter

$$9.2 \pm 0.4 \text{ } \mu\text{m at 1310 nm}$$

$$10.4 \pm 0.8 \text{ } \mu\text{m at 1550 nm}$$

Dispersion

Zero Dispersion Wavelength (λ₀):

$$1302 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1322 \text{ nm}$$

Zero Dispersion Slope (S₀):

$$\leq 0.092 \text{ ps}^2/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$$

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) = -\frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ ps}^2/(\text{nm} \cdot \text{km}),$$

for 1200 nm ≤ λ ≤ 1600 nm

λ = Operating Wavelength

Polarization Mode Dispersion

Fiber Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps ² /√km)
PMD Link Value	≤0.1*
Maximum Individual Fiber	≤0.2

* Complies with IEC 60794-3:2001, section 5.5, Method 1, September 2001.

The PMD link value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as the link quadrature average). This value is used to determine a statistical upper limit for system PMD performance.

Individual PMD values may change when cabled. Corning's fiber specification supports network design requirements for a 0.5 ps²/√km maximum PMD.

Environmental Specifications

Environmental Test Condition	Induced Attenuation 1310 nm/1550 nm (dB/km)
Temperature Dependence -60°C to +85°C*	≤0.05
Temperature-Humidity Cycling -10°C to +85°C*, up to 98% RH	≤0.05
Water Immersion, 23'± 2°C*	≤0.05
Heat Aging, 85° ± 2°C*	≤0.05

*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range

-60°C to +85°C

Dimensional Specifications

Length (km/reel): fiber lengths available up to 50.4*

* Longer spliced lengths available as a premium.

Glass Geometry

Fiber Curl: ≥ 4.0 m radius of curvature
Cladding Diameter: 125.0 ± 0.7 μm
Core-Clad Concentricity: ≤ 0.5 μm
Cladding Non-Circularity: ≤ 1.0%

Defined as: $\left[1 - \frac{\text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}} \right] \times 100$

Coating Geometry

Coating Diameter: 245 ± 5 μm
Coating-Cladding Concentricity: <12 μm

Mechanical Specifications

Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile proof stress ≥ 100 kpsi (0.7 GN/m²)*.

* Higher proof test levels available as a premium.

Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Core Diameter: 8.2 μm

Numerical Aperture: 0.14

NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.

Zero Dispersion Wavelength (λ_0): 1313 nm

Zero Dispersion Slope (S_0): 0.086 ps²/(nm²·km)

Refractive Index Difference: 0.36%

Effective Group Index of Refraction, (N_{eff} @ nominal MFD):

1.4677 at 1310 nm

1.4682 at 1550 nm

Fatigue Resistance Parameter (n_f): 20

Coating Strip Force:

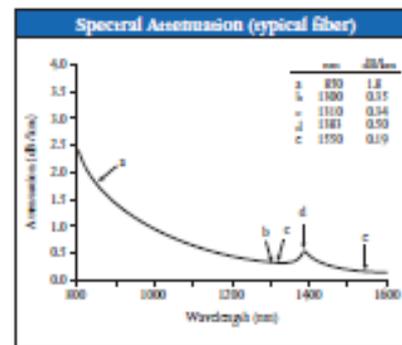
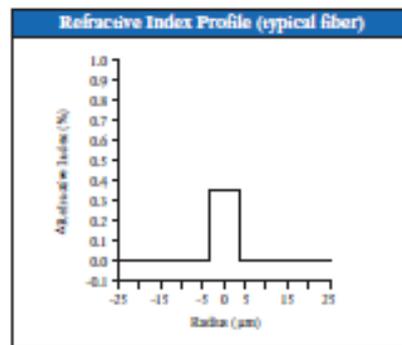
Dry: 0.6 lbs. (3N)

Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)

Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns pulse width):

1310 nm: -77 dB

1550 nm: -82 dB



DATASHEET FOTODETECTOR



Germanium Detector Operating Notes
0.8 to 1.8 μm

General

J16 Series detectors are high-quality Germanium photodiodes designed for the 800 to 1800 nm wavelength range.

The equivalent circuit for a Germanium photodiode (Fig. 2-1) is a photon-generated current source with shunt resistance R_D , parallel capacitance C_D , and series resistance R_S . The value R_D is very small compared to R_S and can be disregarded except at high power levels (more than 3 mW).

Detailed specifications are listed for J16 Series uncooled detectors on pages 4-5 and for high performance J16TE detectors on pages 10-11 and Figure 2-2.

J16P and J16M Series Ge photodiode arrays are described on pages 9 and 12-13 respectively.

Figure 2-1
Germanium Photodiode Equivalent Circuit

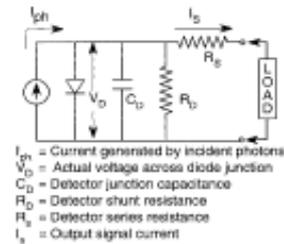
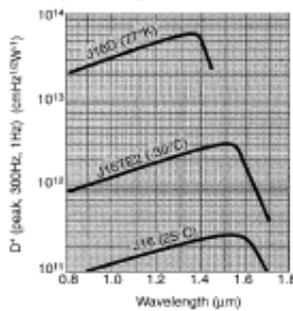


Figure 2-2
Detectivity vs Wavelength for J16 Series Ge



Responsivity

A Ge photodiode generates a current across the p-n or p-i-n junction when photons of sufficient energy are absorbed within the active region. The responsivity (Amps/Watt) is a function of wavelength and detector temperature (Fig. 2-3).

Temperature changes have little effect on the detector responsivity at wavelengths below the peak, but can be important at the longer wavelengths (Figs. 2-3 and 2-4). For example, at 1.2 μm the change in response of a room temperature detector is less than 0.1% per $^{\circ}\text{C}$, while at 1.7 μm the change is approximately 1.5% per $^{\circ}\text{C}$ (Fig. 2-4).

Uniformity of response within the active region of a room-temperature detector is typically better than $\pm 2\%$ at 1300 nm.

Figure 2-3
Typical Responsivity for J16 Series Ge

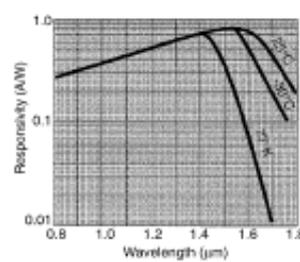
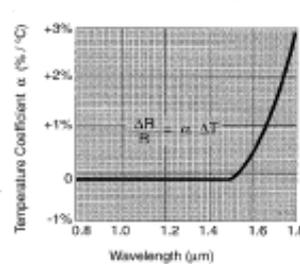


Figure 2-4
Temperature Coefficient of Responsivity at 25 $^{\circ}\text{C}$



Operating Circuit

The recommended operating circuit for most applications is an operational amplifier in a negative-feedback transimpedance configuration (Fig. 2-5). The feedback circuit converts the detector output current to a voltage, while the op-amp maintains the detector near zero-volt bias for lowest noise (see "Shunt Resistance and Dark Current").

Selection of the proper op-amp is important, as the wrong choice can add excess preamp noise or limit system bandwidth. Judson has a complete line of preamps designed to match each detector type and application. Preamp recommendations are included with the detector specifications.

For high frequency applications, the detector may be reverse biased and terminated into a low impedance load (Fig. 2-6). Reverse biasing the detector significantly reduces junction capacitance for faster pulse response; however, the dark currents and low-frequency noise are increased.

Figure 2-5
Basic Operating Circuit

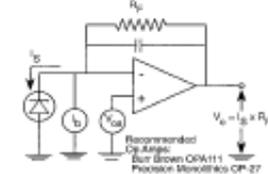
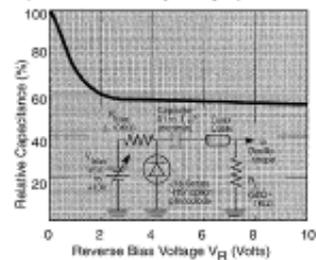


Figure 2-6
Capacitance vs Bias Voltage for High Speed



Shunt Resistance and Dark Current

When the detector is used in the basic circuit of Figure 2-5, an undesirable DC offset current, or "dark current," will be produced. It is a function of the preamp input bias current I_b , the preamp input offset voltage V_{os} , and the detector shunt resistance R_D . This total "dark current" is: $\text{Total } I_D = I_b + (V_{os} / R_D)$.

High shunt resistance detectors will result in lowest overall DC "dark current." Preamp selection is also important; for higher shunt impedance detectors, choose a preamp with low bias current; for lower shunt impedance detectors, choose a preamp with low offset voltage (Fig. 3-1).

When the detector is reverse biased and used in the high-speed circuit of Figure 2-6, the predominant dark current is a function of the applied bias voltage (Fig. 3-2).

Figure 3-1
Total Dark Current vs Detector Resistance

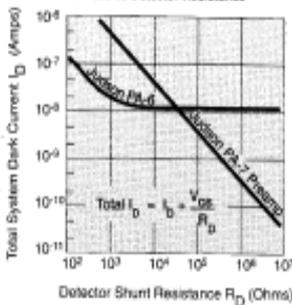
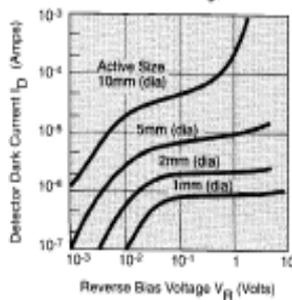


Figure 3-2
Dark Current vs Reverse Bias Voltage



Device Selection

Two key factors to consider when selecting a Judson Ge detector are: detector operating temperature and detector active area.

1. **Detector Temperature:** Cooling the detector reduces dark current and increases the shunt resistance R_D (Fig. 3-3). Shunt resistance data at 25°C is listed on the specification table on page 5. The data can be applied to Figure 3-3 to estimate R_D for detector temperatures from -40 to +60°C.

2. **Active Area:** Larger active areas have lower shunt resistance R_D (Fig. 3-4), and therefore higher dark currents. When low noise is critical, the smallest detector acceptable for the application should be selected. Focusing optics may be added for increased light collection.

Figure 3-3
Change in Shunt Resistance vs Temperature

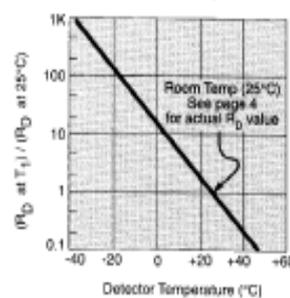
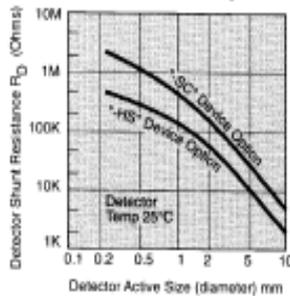


Figure 3-4
Shunt Resistance vs Size and Device Option



Linearity

Ge photodiode responsivity in A/W (current output per input optical power) is extremely linear with low input power levels. Response linearity is ultimately limited at high input power levels by photodiode series resistance, R_{sp} , depicted in Figure 2-1 on page 2. Large amounts of output signal current I_o can significantly forward bias the photodiode junction resulting in nonlinear output response.

Response linearity to well within $\pm 0.04\text{dB}$ ($\pm 1\%$) is maintained with input power levels up to 15dBm at 1550nm. Power levels in excess of 15dBm result in nonlinearities as depicted in Figure 3-5.

Both absorptive and reflective attenuation filters are available for increased high power linearity. Different levels of attenuation are available to meet any high power application.

Figure 3-5
Typical 1550nm High Power Linearity

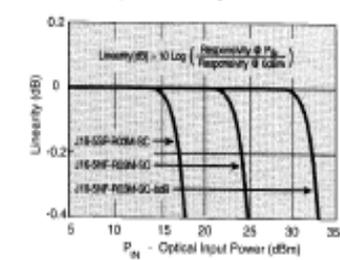
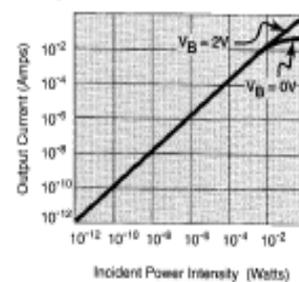


Figure 3-6
Linearity for J16 Series Ge



Typical Specifications J16 Series Room Temperature Ge @ 25°C

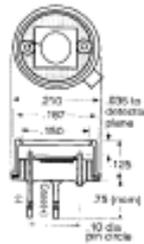
Model Number	Active Size (dia.) (mm)	Shunt Resistance R_s @ $V_{ph} = 10mV$ (k Ω)		Dark Current I_d @ Maximum V_{ph} (μA)		Maximum Reverse Voltage V_{ph} (V)	Typical NEP @ 1 μm and 300Hz (pW/Hz ^{1/2})	Capacitance C_d @ $V_{ph} = 0V$ (nF)	Cutoff Frequency @ Max. V_{ph} and $R = 50\Omega$ (MHz)	Other Options (see page 6)
		Min.	Typ.	Typ.	Max.					
LOW CAPACITANCE OPTION ("HS")										
J16-18A-R250U-HS	0.25	400	600	0.1	3	10	0.15	0.02	400	LD, CO2, C11, 18D
J16-18A-R500U-HS	0.5	200	300	0.3	5	10	0.2	0.03	250	
J16-18A-R01M-HS	1.0	100	200	1	5	10	0.3	0.15	50	
J16-8SP-R02M-HS	2.0	25	50	4	10	5	0.6	0.6	12	8NF, LD, 8SP, 8NF, C11
J16-8SP-R03M-HS	3.0	15	30	7	20	5	0.8	1	8	
J16-8SP-R05M-HS	5.0	10	15	10	40	5	1	3	2.5	8NF, P2, C12
J16-P1-R10M-HS	10.0	1	2	100	400	2	4	12	0.6	P2
HIGH SHUNT RESISTANCE OPTION ("SC")										
J16-18A-R250U-SC	0.25	1400	2400	0.025	.05	0.25	0.10	0.14	40	LD, CO2, C11, 18D
J16-18A-R500U-SC	0.5	700	1200	0.05	0.1	0.25	0.1	0.50	10	
J16-18A-R01M-SC	1.0	250	350	0.1	0.2	0.25	0.2	2	2	
J16-8SP-R02M-SC	2.0	80	120	0.2	1	0.25	0.4	8	0.5	8NF, LD, 8SP, 8NF, C11
J16-8SP-R03M-SC	3.0	36	60	0.5	5	0.25	0.6	14	0.2	
J16-8SP-R05M-SC	5.0	14	20	1.5	10	0.25	1	36	0.1	8NF, P2, C12
J16-P1-R10M-SC	10.0	3	5	25	50	0.25	2	120	0.03	P2
J16-P1-R13M-SC	13.0	1.5	2.5	50	100	0.25	3	200	0.02	
STANDARD										
J16-18A-R01M	1.0	100	200	1	5	10	0.3	1	15	LD, CO2, C11, 18D
J16-8SP-R02M	2.0	25	50	4	10	10	0.6	4	4	8NF, LD, 8SP, 8NF, C11
J16-8SP-R03M	3.0	15	30	7	30	5	0.8	7	2	
J16-8SP-R05M	5.0	10	15	15	50	5	1.4	18	0.8	8NF, P2, C12
J16-P1-R10M	10.0	1	2	100	400	5	3.0	60	0.1	P2
J16-P1-R13M	13.0	0.5	1	250	800	2	4.5	100	0.07	

Detector (+) → Anode

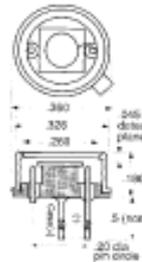
Detector (-) → Cathode

Note: Standard packages have clear glass windows. AR-coated glass windows are available upon request.

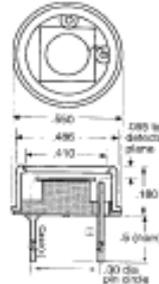
■ 18A



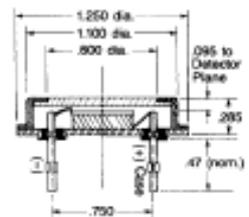
■ 8SP



■ 8SP



■ P1



■ 3030605 0000326 505 ■

BIBLIOGRAFÍA

[1] Coimbra G. Edison, Curso Sistemas Electrónicos de Comunicaciones, <http://www.coimbraweb.com/linkcursos.html>, fecha de consulta 10 mayo 2012

[2] Romano Carla López Cecilia, Medición de la constante de Planck utilizando LEDs, http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_mod/panck_diodos2k1.pdf, fecha de consulta 10 mayo 2012

[3] Pedro de Valdivia, Construcción de una lámpara con diodos LED, <http://www.tecnologia-informatica.es/tecnologia/lampara-con-diodos-leds.php>, fecha de consulta 26 de mayo 2012

[4] Pedro de Valdivia, Fibras ópticas Monomodo y Multimodo, <http://www.tecnologia-informatica.es/tecnologia/lampara-con-diodos-leds.php>, fecha de consulta 25 de mayo 2012

[5] Infante R. Arturo L., Sistemas de Transmisión Ópticos, Universidad de Oriente Santiago de Cuba 1era Edición, 2008.

[6] Instituto Tecnológico de la Laguna, Emisores y Detectores, http://www.itlalaguna.edu.mx/academico/carreras/electronica/opteca/OPTOPDF7_archivos/UNIDAD7TEMA3.PDF, fecha de consulta 10 mayo 2012

[7] Javier Herrera, LED y LASER, <http://www.herrera.unt.edu.ar/opto/material/apuntes/LED%20LASER%20-%20LD.pdf>, fecha de consulta 20 mayo 2012

[8] España B. María, C, Comunicaciones ópticas: conceptos esenciales y resolución de ejercicios, Díaz de Santos 2da Edición, 2005.

[9] Tomasi Wayne, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Pearson Educación 1era Edición, 2003.

[10] Blake Roy, *Sistemas Electrónicos de Comunicaciones*, Cengage Learning 2da Edición, 2004.

[11] E. E. Bert Basch, *Optical-Fiber Transmission*, Howars W. Sams & Co. 1era Edición, 1987

[12] Thomas G. Giallorenzi, *Optical Communications Research and Technology: Fiber Optics*. Volumen 66 de la IEEE magazine, Prentice Hall 7ma Edición, 1978.

[13] Ricardo Gómez, Redes de Acceso, <http://ricardo-redesdeacceso.blogspot.com/2011/05/conectores-y-acopladores-de-fibra.html>, fecha de consulta 10 mayo 2012

[14] Carlos Bianchi, Empalmes, <http://www.freewebs.com/carlosbianchi/08-Empalmes.pdf>, fecha de consulta 28 Mayo 2012

[15] Isidro Gormaz Gonzáles, Técnicas y Procesos en las Instalaciones Singulares en los edificios, Paraninfo 2da Edición, 2002.

[16] Joseph C. Palais, Fiber Optic Communications, Pearson Prentice Hall fifth edition, 2005.

[17] León W. Couch, Sistemas de comunicación digitales y analógico, Pearson Prentice Hall sexta Edición, 2001.

[18] José Damián Cabezas Pozo, Sistemas de telefonía, Paraninfo cuarta edición, 2007.

[19] García M. Eugeni, *Sistemas Electrónicos de Comunicaciones*, http://www.uib.es/depart/dfs/GTE/education/telematica/sis_ele_comunicacio/index.htm, fecha de consulta 10 mayo 2012

[20] Fulvio Grassi Marangione, modelo Simulink para redes de comunicaciones ópticas multiservicio, http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12897/01_Tesina%20Master%20Fulvio%20Grassi%20Marangione.pdf?sequence=1, fecha de consulta 20 mayo 2012

[21] Universidad técnica Federico Santa María, comunicaciones por fibra óptica, capítulo 5: Receptores ópticos, <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo357/clases/Capitulo%205.pdf>, fecha de consulta 20 de mayo 2012