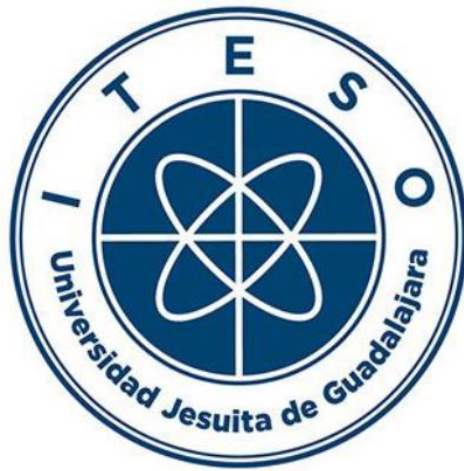


Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial
15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento de Electrónica, Sistemas e Informática
Maestría en Diseño Electrónico



PLATAFORMA ÓPTICA EXPERIMENTAL TOSA ROSA

ESTUDIO DE CASO que para obtener el GRADO de
MAESTRO EN DISEÑO ELECTRÓNICO

Presenta: Raymundo Castro Alba

Director: Dr. Jorge Arturo Pardiñas Mir

Tlaquepaque, Jalisco. 4 de septiembre de 2024

Dedico este trabajo a mis padres.

Resumen

Este trabajo de obtención de grado presenta el marco que he desarrollado para la formación de ingenieros de análisis de fallas y personal técnico en el tema de las comunicaciones ópticas, con el objetivo de apoyar el análisis del funcionamiento y las fallas presentes en dispositivos de transmisión y recepción óptica, área de trabajo de la empresa en donde laboro.

El trabajo está dividido en dos: la descripción de los principios de las comunicaciones ópticas y el desarrollo y uso de una plataforma experimental.

La primera parte describe los elementos más relevantes para el contexto del trabajo de análisis de funcionamiento y fallas en módems ópticos: Redes y Módems Ópticos, Fundamentos de Óptica, Láser y Fotodetectores PIN-APD, Fibras Ópticas, Transmisores Ópticos y Receptores Ópticos.

La segunda parte describe la plataforma experimental, la cual es un sistema mínimo de comunicaciones ópticas que contiene un transmisor **TOSA** (*Transmitter Optical SubAssembly*), un receptor **ROSA** (*Receiver Optical SubAssembly*), y la fibra óptica como medio de transmisión. Con la plataforma óptica se pueden entender varios elementos de un módem óptico como son: El láser, los diodos PIN, la fibra óptica y el acondicionamiento de señal.

La capacitación, objetivo de las evidencias presentadas en este trabajo, ha sido impartida a técnicos e ingenieros y se han obtenido buenos resultados en relación con la reducción de un *bonepile* (conjunto de tarjetas electrónicas con fallas funcionales) de 15 millones a 2 millones de dólares.

Contenido

Resumen	v
Contenido	vii
Introducción	1
1. Redes y Módems Ópticos	3
1.1. Introducción	3
1.2. Redes ópticas	3
1.2.1. Red óptica (<i>Metropolitan, Core, Long Haul</i>)	4
1.2.2. ROADM <i>Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer</i>	6
1.2.3. <i>PON Passive Optical Network</i>	12
1.2.4. Módem óptico, <i>Switch, Routers</i>	13
1.3. Arquitectura de módems ópticos	14
2. Fundamentos de Óptica	19
2.1. Introducción	19
2.2. Naturaleza de la Luz	19
2.2.1. Teoría Corpuscular	19
2.2.2. Teoría Ondulatoria	20
2.2.3. Teoría Electromagnética de la Luz	20
2.2.4. Teoría de los Cuantos para la Luz	21
2.2.5. Teoría de la Mecánica Ondulatoria	21
2.3. Reflexión	21
2.4. Refracción	23
2.5. Índice de Refracción	24
2.6. Reflexión Interna Total	25
2.7. Dispersión	26

3. Láser y Fotodetectores PIN-APD	27
3.1. Introducción	27
3.2. Láser	27
3.2.1. Ganancia y Oscilación Óptica	27
3.2.2. Amplificación en un semiconductor	30
3.2.3. Frecuencia <i>chirp</i>	31
3.2.4. Estructura del láser semiconductor	31
3.2.5. DFB (<i>Distributed feedback</i>) láser	33
3.2.6. Láser VCSEL (<i>Vertical Surface Emmiting Laser</i>)	34
3.3. Fotodetectores	35
3.4. Diodo PIN	35
3.4.1. Características Estáticas del Diodo PIN	35
3.4.2. Características Dinámicas del Diodo PIN	37
3.4.3. Estructura del Diodo PIN	38
3.5. Diodo APD	40
3.5.1. Estructura del APD	42
3.6. Materiales de los Fotodetectores	43
3.7. Ruido en Fotodetectores	44
3.7.1. Ruido <i>Shot</i>	44
3.7.2. Ruido Térmico	45
3.7.3. SNR	46
4. Fibras Ópticas	47
4.1. Introducción	47
4.2. Características de la Fibra Óptica	48
4.3. Modos Guiados	49
4.4. Degradación de la Señal en Fibras Ópticas	51
4.4.1. Atenuación Lineal	51
4.4.2. Atenuación Lineal por Absorción	52
4.4.3. Atenuación Lineal por <i>Scattering</i>	53
4.4.4. Degradación Lineal de la señal por Dispersión	53
4.4.5. Degradación Lineal de la señal por Dispersión Modal	54
4.4.6. Degradación Lineal de la señal por Dispersión Cromática	56
4.4.7. Degradación lineal de la señal por Dispersión de Guía de Onda	56
4.4.8. Degradación lineal de la señal por dispersión por modo de polarización	57
4.4.9. Degradación No Lineal de la señal	58

5. Transmisores Ópticos	59
5.1. Introducción	59
5.2. TOSA	60
5.2.1. Polarización del Láser: La Curva Básica Luz-Corriente LI	61
5.2.2. Esquemas de Modulación	62
5.2.3. Circuito, Driver Básico	62
5.2.4. Modulador Externo y Estabilización Espectral	63
5.2.5. TOSA, aplicación en la industria de las comunicaciones ópticas	64
6. Receptores Ópticos	67
6.1. Introducción	67
6.2. ROSA	67
6.2.1. Amplificador de Transimpedancia TIA	68
6.2.2. TIA Conexiones en un Subensamble Óptico	69
6.2.3. Amplificador de Límite LIA	70
6.2.4. Recuperación de reloj y datos CDR	72
7. Plataforma de Experimentación	75
7.1. Introducción	75
7.2. Descripción de la plataforma	75
7.2.1. El TOSA	77
7.2.2. El ROSA	78
7.2.3. Acondicionador de señal para el modulador	79
7.2.4. Acondicionador de señal recibida	80
7.3. Experimentación	80
7.3.1. Experimento 1: Tren de Pulsos	80
7.3.2. Experimento 2: Comunicación Serial	85
7.3.3. Experimento 3: Comunicación Serial con Monitor	87
Conclusiones	96
Apéndice	99
A. TOSA Datasheet	101
B. ROSA Datasheet	105
Bibliografía	110

Introducción

En la empresa de manufactura electrónica para la cual trabajo, se desarrollan proyectos de fabricación de módems ópticos, los cuales requieren de un conocimiento particular para mejorar la eficiencia de la manufactura. El hecho de que la empresa que manufactura estas plataformas ópticas no realice el diseño de las mismas, tiene como desventaja que los ingenieros y el personal técnico no cuenten con el conocimiento de nivel de profundidad necesario para trabajar adecuadamente en las pruebas y análisis de fallas de estos dispositivos.

Esta falta de conocimiento impacta métricos de manufactura como *bonepile* y métricos de *yields*. El primero se refiere a las unidades que fallan, que son muy difíciles de analizar y requieren de niveles de dominio técnico de mayor nivel comparado con otro tipo de unidades que fallan en la manufactura. El segundo, *yields*, corresponde a las unidades que cumplen con el nivel de calidad requerido y que han sido producidas en un cierto intervalo de tiempo.

La preocupación de la empresa por mejorar el desempeño en la manufactura se vio reflejado en el apoyo para aumentar la formación en comunicaciones ópticas de los empleados, apoyo del que fui beneficiado para estudiar la maestría en diseño electrónico. Estos esfuerzos han impactado en la calidad de las unidades manufacturadas, por ejemplo, en el pasado existía un *bonepile* muy elevado de 12 millones de dólares y la capacitación fue un factor muy importante en la reducción de dicho *bonepile*, estando actualmente por debajo de los 800,000 dólares.

Mi trayectoria en la maestría en diseño electrónico, además de mi propia capacitación con el cliente, ha tenido el objetivo de generar un marco para la formación de ingenieros de análisis de fallas y personal técnico en el tema de las comunicaciones ópticas, en particular en aquellos elementos relevantes para analizar el funcionamiento y fallas presentes en dispositivos de transmisión y recepción óptica, como los módems. Este material ha sido la base para la capacitación de otros ingenieros y técnicos de mayor experiencia.

El marco de formación que desarrollé como trabajo para la obtención de grado consiste en una parte teórica y una parte experimental. La primera corresponde a los elementos teóricos que se estudian durante las sesiones de formación, mientras que la segunda se trata de una plataforma que permite experimentar la transmisión y recepción óptica.

Capítulo 1

Redes y Módems Ópticos

1.1. Introducción

Las redes y los módems ópticos juegan un papel importante en las comunicaciones ópticas. En este capítulo se explica, de forma breve, cómo funcionan las redes ópticas y el funcionamiento interno de los módems, haciéndolo principalmente mediante diagramas de bloques. También se describen algunos dispositivos de las redes como los **ROADM** (*Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer*) y dispositivos complementarios de los módems como los *Form Factor Pluggable* o *transceivers* ópticos.

1.2. Redes ópticas

En esta sección se describe parte del hardware que constituye la infraestructura de las redes ópticas como las configuraciones de los ROADMs, se menciona también conceptos de las redes pasivas ópticas, módems ópticos, *switches* y *routers*.

El flujo de los datos a través de las redes es fundamental para llevar información de un nodo a otro. En las redes ópticas tenemos 2 tipos de redes: *Metro* y *Core*.

La red *Metro* puede abarcar distancias desde 80 km hasta 1,000 km.

La red *Core* puede abarcar distancias desde 1,000 km hasta 2,500 km o más.

El dispositivo que impulsó el rápido desarrollo de las redes de alta velocidad en la transmisión de datos fue el ROADM, el cual permitió configurar las redes dependiendo del tráfico de datos de forma remota. También el rápido crecimiento en la tecnología de los *transceivers* ópticos (*Form Factor Pluggable*) hizo posible el rápido crecimiento, llegando a la transmisión de datos del orden de los 800 Gbps y 1.6 Tbps. Dentro de estas enormes redes se encuentran las redes pasivas ópticas que juegan un papel crucial en la distribución de información hacia los clientes.

1.2.1. Red óptica (*Metropolitan, Core, Long Haul*)

El objetivo de las redes ópticas es llevar información de alta velocidad de un punto a otro, por medio de luz en fibras ópticas. En este tipo de redes existen varias configuraciones y elementos que hacen funcional el flujo de los datos, algunas de estas configuraciones, como ya se mencionó, son las redes *Metropolitan* y *Core*.

Cada fibra de las redes *Metropolitan* y *Core* pueden soportar varios canales o longitudes de onda usando la tecnología **WDM** (*Wavelength Division Multiplexing*) y cada longitud de onda representa un canal independiente que maneja sus propios datos. Existe dos tipos de tecnología WDM:

- **CWDM** (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*).
- **DWDM** (*Dense Wavelength Division Multiplexing*).

La **Tabla 1.1** muestra una comparación entre las 2 tecnologías CWDM y DWDM, en dicha tabla se puede observar la separación por canal y la cantidad de canales que pueden soportar cada tecnología.

CWDM VS DWDM	
CWDM	DWDM
Soporta como máximo 18 longitudes de onda.	Soporta como máximo 160 canales.
Está definido por Longitud de Onda.	Definido por frecuencias y longitudes de onda.
Diseñado para cortas distancias.	Diseñado para transmisiones de larga distancia.
Longitudes de ondas separadas.	Las longitudes de onda no tienen mucha separación.
La señal de luz no es amplificada.	Es necesaria la amplificación de la señal óptica.
Más barata en la implementación.	Tiene un mayor costo de operación.
Habilidad para transportar 18 canales desde 1271 nm hasta 1611 nm con 20 nm de espaciado entre canales.	Habilidad para transportar más de 96 canales con 50 GHz de separación en el área de 1550 nm, con la mayoría de estos canales en el espectro <i>C-Band</i> . La designación por canal (ITU <i>International Telecommunication Union</i>) es de una separación de 100 GHz, iniciando el canal 1 de 190.1 THz (1577.03 nm), hasta el canal 80 con 198 THz (1514.1 nm).
Divide el espectro en secciones más grandes.	Divide el espectro en secciones más pequeñas.
El láser usado no tiene refrigerante, esto debido al mayor espaciado entre canales.	El láser necesita refrigerante para tener una mayor precisión en las longitudes de onda.

Tabla 1.1: Comparación entre las características CWDM y DWDM.

En la **Figura 1.1** se muestra el funcionamiento WDM para una fibra, se puede observar que a la entrada hay varias longitudes de onda que son multiplexadas para entrar a la fibra óptica, después hay un módulo **OADM** (*Optical Add Drop Multiplexer*) el cual puede extraer un canal (una longitud de onda) o también puede agregar un canal o longitud de onda. Las dos últimas etapas son: un amplificador **EDFA** (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) y un demultiplexor.

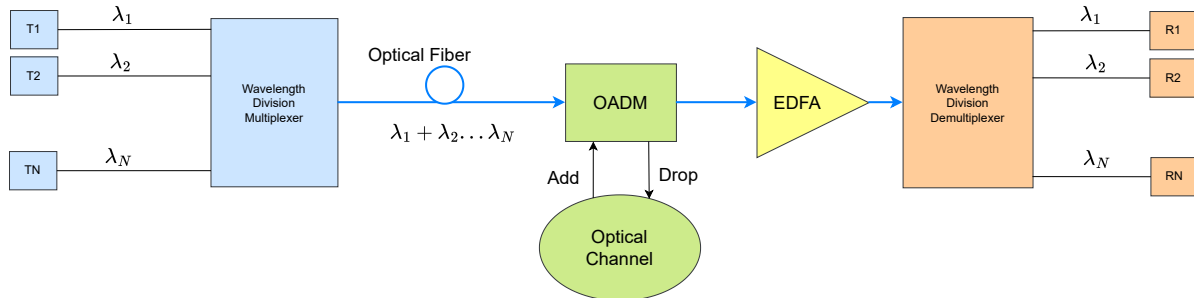


Figura 1.1: Concepto WDM.

En la **Figura 1.2** se muestran el concepto de la red *Metropolitan* y de la red *Core*, también se muestra parte del *hardware* que compone la red, como los son los ROADM, los OLT, *Router*, *Racks* de módems ópticos, CFP y la fibra óptica. Cada ROADM puede introducir canales o quitar canales de la red óptica (concepto *Add/Drop*). Un ejemplo es que el ROADM tome un canal para un *access network* el cual es una red de distribución para los usuarios finales, otro ejemplo es que el ROADM anexe un canal de algún *data center* que proporciona información a la red. Cada símbolo en la red, es en realidad un rack con varias tarjetas electro-ópticas (*modems*, *switch*, *routers*, *mappers* y amplificadores ópticos). La siguiente lista muestra algunos acrónimos usados en las redes ópticas, estos también aparecen en la **Figura 1.2**.

TOSA: *Transmitter Optical SubAssembly.*

ROSA: *Receiver optical SubAssembly.*

CFP: *C Form Factor Pluggable.*

PON: *Passive Optical Network.*

OLT: *Optical Line Terminal.*

HFC: *Hybrid Fiber Coaxial.*

ROADM: *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer.*

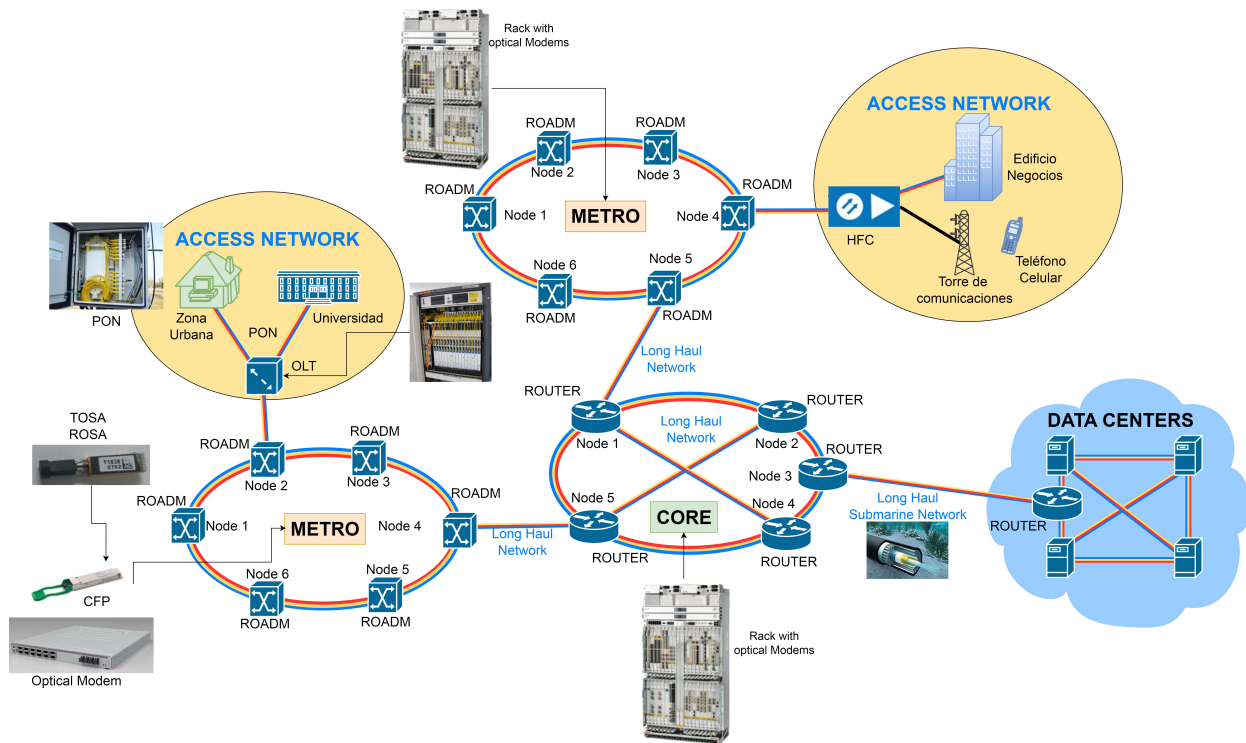


Figura 1.2: Redes ópticas, donde se muestra el flujo de la información y el uso de los *form factor*.

1.2.2. ROADM *Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer*

Las redes ROADM modernas se pueden usar para automatizar la configuración de puertos *Add/Drop* y escalar fácilmente a nuevas rutas de fibra. Dependiendo de la arquitectura, los ROADM pueden reducir drásticamente la cantidad de enrutamiento de longitud de onda y la planificación previa de la asignación que se requiere para las redes que emplean WDM. Los ROADM se pueden utilizar en arquitecturas de anillo o de malla. Con la capacidad de redirigir las rutas de longitud de onda a través de la red, los ROADM se pueden usar para proporcionar restauración de la capa óptica. El ROADM es la evolución del OADM.

El OADM tiene acceso a todas las longitudes de onda en una fibra, pero puede manipular sólo una en específico, dejándola pasar, extrayéndola o anexando otra longitud de onda. Los OADM pueden reutilizar las longitudes de onda extrayéndola del nodo y después volviéndola a agregar al nodo pero hacia la otra dirección. Una desventaja de los OADM es que son fijos, es decir, no se pueden reconfigurar una vez instalados aunque el volumen de tráfico lo requiera, otra desventaja es que está limitado a 2 direcciones.

En la **Figura 1.3** se observa como el OADM extrae la λ_1 y después la reintegra a la misma línea, pero en sentido contrario, también puede hacer que la λ_1 pase sin necesidad de ir a los *transponders* (Módem óptico Tx-Rx).

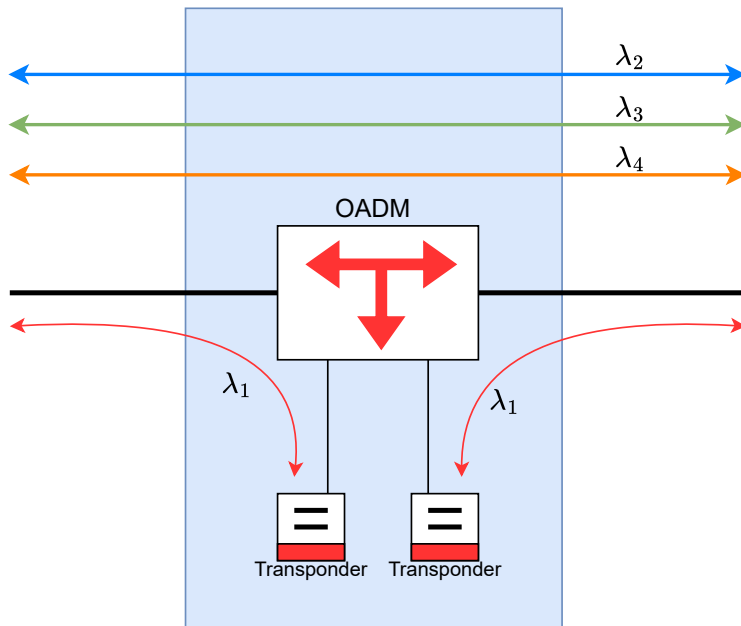


Figura 1.3: Bloque OADM, extrae λ_1 y después la vuelve a agregar pero hacia otra dirección. [1]

En el año 2000, los ROADM fueron introducidos para resolver las demandas cambiantes de tráfico.

El ROADM tiene la ventaja de configurarse y manejar más de 2 direcciones en nodos de una red de malla, también tiene acceso a todas las longitudes de onda para poder dejarlas pasar, extraer o agregar otra longitud de onda.

El ROADM hace de forma automática el enrutamiento de una longitud de onda para llevarla de un nodo a otro, sin la necesidad de personal técnico que lo haga de forma física, ya que el enrutamiento se puede hacer vía remota.

Los primeros ROADM utilizaban **WSS** (*Wavelength Selective Switch*) de red fija con espacio de 50 GHz a 100 GHz y cada longitud de onda tenía que adaptarse a esta restricción, actualmente los ROADM manejan una red flexible con mayor espacio entre canales y más del 90 % de los ROADM usan esta tecnología WSS de red flexible.

Se observa en la **Figura 1.4** cómo se pueden rutear las longitudes de onda entre diferentes nodos y cómo dichas longitudes pasan a través de los ROADM sin necesidad de tocar base con los transponder, también se puede observar cómo se forma una red de malla con todos los ROADM.

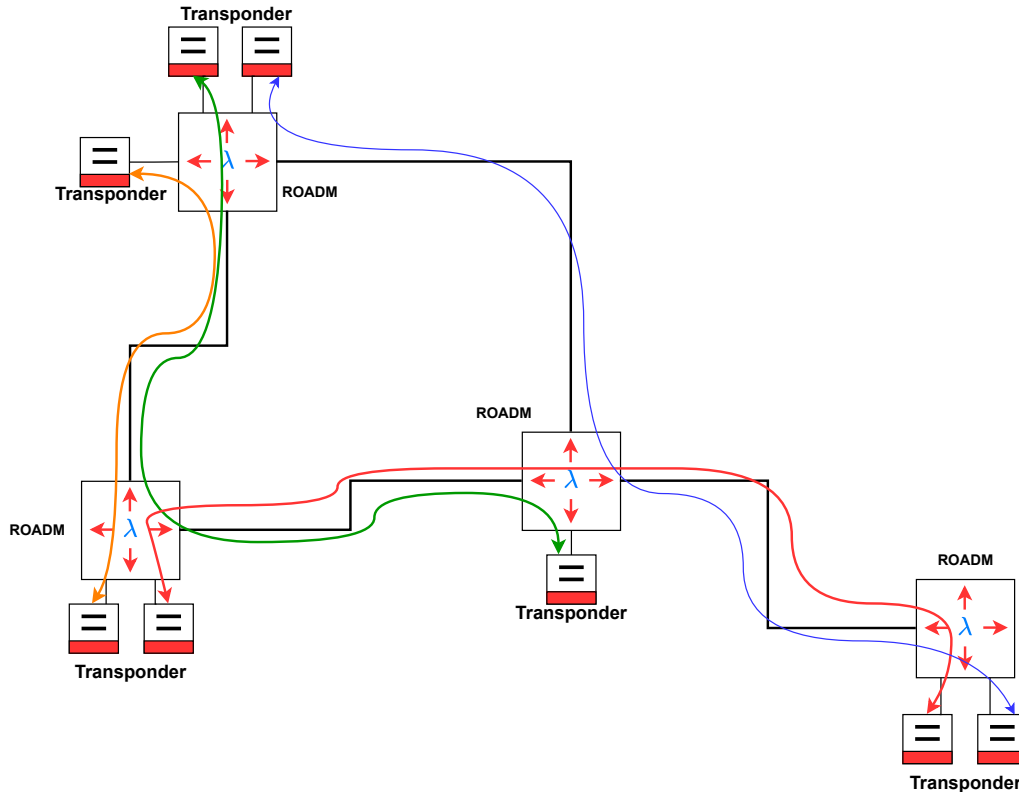


Figura 1.4: Las longitudes de onda pueden pasar por los ROADM sin necesidad de un transponder o bien los ROADM pueden reconfigurar la ruta de las longitudes de onda y seleccionar el nodo de donde extraer o agregar una longitud de onda. [1]

Existen diferentes arquitecturas que los nodos ROADM pueden soportar:

- *Fixed Filter ROADM.*
- *Colorless ROADM.*
- *Colorless Directionless ROADM.*
- **CDC** (*Colorless Directionless Contentionless*) ROADM.

Fixed Filter ROADM. Es la opción más barata pero la menos flexible. El ROADM tiene la capacidad de seleccionar las longitudes de onda que se agregan y se extraen, y puede redireccionar las longitudes de onda que pasan por el nodo.

Esta arquitectura usa un **CMD** (*Channel Mux/Demux*) fijo. La arquitectura *Fixed Filter* fuerza a la red a trabajar con espaciado reducido entre los canales, por ejemplo 50 GHz, 75 GHz o 100 GHz. Cada puerto de esta arquitectura es fijo a una longitud de onda y conectado directamente a una dirección específica.

Cuando las longitudes de onda son agregadas a la red, estas deben conectarse al CMD y ROADM que contienen la ruta que las longitudes de onda necesitan. En este tipo de red, si se requiere un espacio más amplio entre longitudes de onda, se tendrían que colocar nuevos CMD y cada uno conectado a un puerto WSS disponible, estos WSS se encuentran dentro del ROADM.

En la **Figura 1.5** se muestra la arquitectura *Fixed Filter ROADM*, también se observa cómo las longitudes de onda están espaciadas de forma fija y cómo los CMD están conectados a los ROADM.

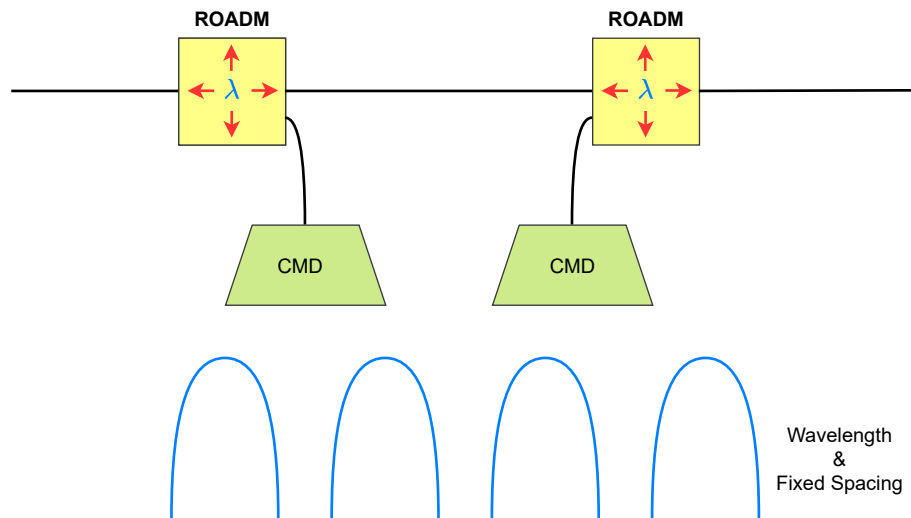


Figura 1.5: *Fixed Filter ROADM*, con espaciado fijo entre longitudes de onda y CMD fijo. [1]

Colorless ROADM. Es una arquitectura que permite agregar flexibilidad a la asignación de longitud de onda, ancho del canal y espaciado de canales mediante el uso de un *Colorless* CMD (CCMD). Una característica de la arquitectura colorless es que se puede adaptar a cualquier tecnología moderna óptica coherente, también permite una red más abierta y flexible que puede admitir longitudes de onda de diferentes proveedores.

Al igual que la arquitectura *fixed filter ROADM*, la arquitectura *Colorless Direct Attach* (CDA) es muy simple y fácil de escalar.

El nodo CDA ROADM se puede expandir para conectarse a nuevos grados de conectividad o proporcionar canales *Add/Drop* adicionales. Dado que el CCMD está conectado a una dirección específica al agregar o extraer nuevas longitudes de onda en un nodo, deben estar conectados al CCMD y al ROADM de la dirección correcta.

Algunas arquitecturas CDA ROADM también admiten la conexión directa del *transponder*, donde un *transponder* puede conectarse directamente a un puerto ROADM sin necesidad de un CCMD. La conexión directa del *transponder* es una buena opción para nodos

de bajo crecimiento y bajo volumen. Si los requisitos de tráfico cambian drásticamente en el futuro, se puede agregar un CCMD para proporcionar más canales *Add/Drop* (Agregar/Extraer).

Se puede observar en la **Figura 1.6** cómo el ancho del canal es flexible, al igual que el espaciado, también se observa cómo los *muxponders* están conectados al CCMD y que estos enrutan las longitudes de onda en una sola dirección.

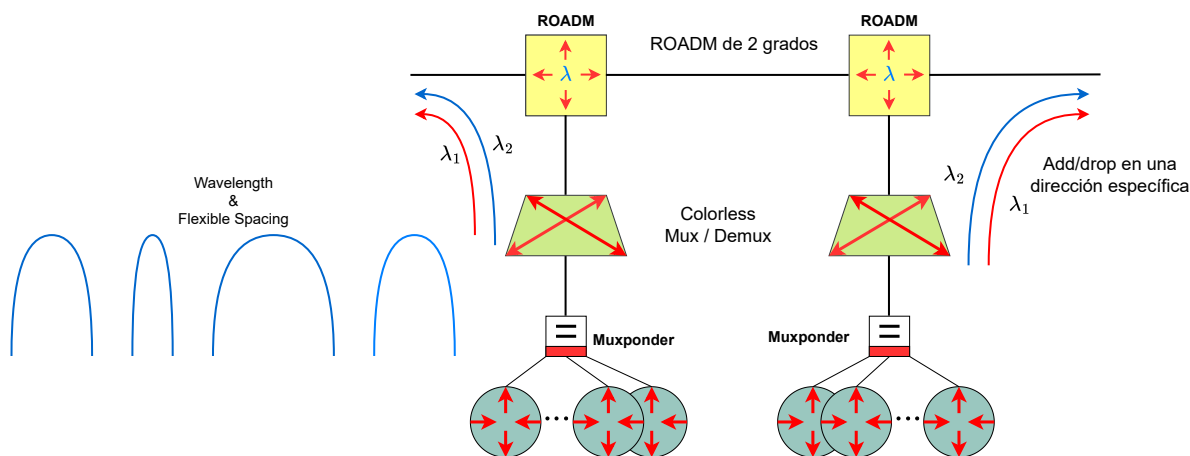


Figura 1.6: *Colorless ROADM*. [1]

Colorless Directionless ROADM. Es una arquitectura que permite todavía una mayor flexibilidad en los canales *Add/Drop*, para lograr esta flexibilidad y poder controlar vía remota las longitudes de ondas en ambas direcciones es necesario anexar un ROADM extra.

Esta arquitectura permite el uso de varias tecnologías coherentes y la funcionalidad *directionless* permite hacer el cambio de dirección vía remota de los canales *Add/Drop*.

Si ocurre una falla en esta arquitectura, se tiene la opción de buscar una ruta alterna para no perder la comunicación. Sin embargo, la arquitectura no permite flexibilidad para el ruteo de longitud de onda completa, es decir, que no puede eliminar las múltiples versiones del mismo color de longitudes de onda que entran a un mismo nodo y que van a ser enviadas en la misma dirección. Esta arquitectura sólo permite un color de longitud de onda a la vez por cada canal *Add/Drop*.

La **Figura 1.7** muestra los detalles de la arquitectura *Colorless Directionless ROADM*.

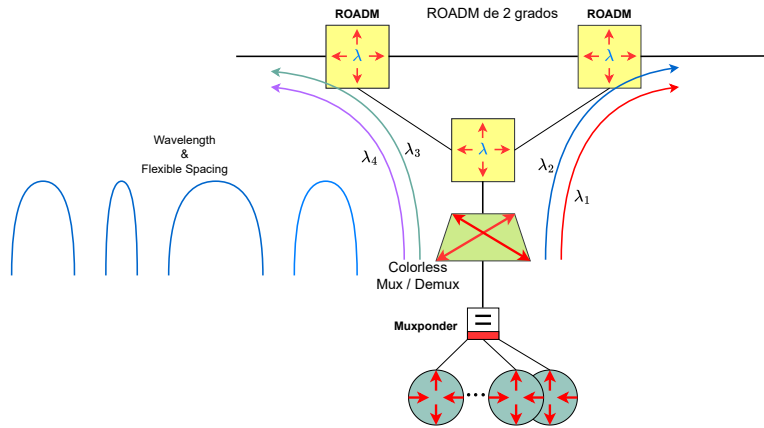


Figura 1.7: *Colorless Directionless ROADM.* [1]

CDC (Colorless Directionless Contentionless) ROADM. Esta arquitectura proporciona una flexibilidad completa en el enrutamiento de longitud de onda, la capacidad *contentionless* de un CDC ROADM permite que los canales *Add/Drop* puedan rutear la misma longitud de onda de un CCMD en diferentes direcciones. En otras palabras, el puerto 1 en el CCMD podría direccionar la longitud de onda 1 hacia el este y el puerto 2 del CCMD podría direccionar la misma longitud de onda 1 hacia el oeste. Esto significa que un nodo CDC ROADM no tiene restricciones ni limitaciones con respecto a la asignación o el enrutamiento de la longitud de onda.

La arquitectura CDC ROADM soporta diferentes tecnologías coherentes y es flexible en ancho y espaciado de los canales, además, puede rutear las longitudes de onda en diferentes direcciones. Los nodos CDC ROADM requieren equipos WSS más sofisticados, lo que aumenta el costo, pero también proporciona mayor flexibilidad. Esta flexibilidad permite a los proveedores reaccionar rápidamente a las demandas impredecibles de tráfico.

La **Figura 1.8** muestra los detalles de esta arquitectura.

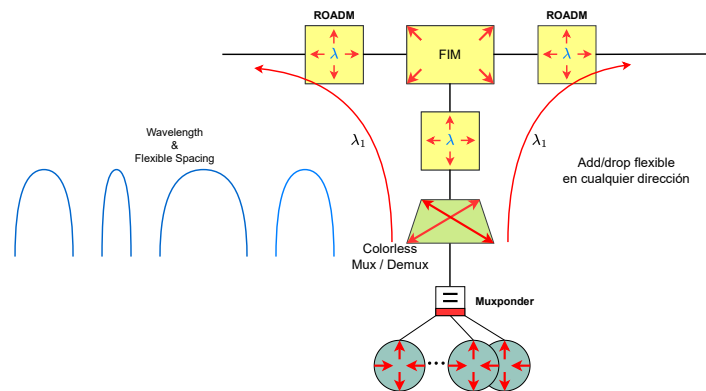


Figura 1.8: *Colorless Directionless Contentionless ROADM.* [1]

1.2.3. *PON Passive Optical Network*

PON (*Passive Optical Network*) es una red de fibra óptica que utiliza una topología *point to multipoint* (P2MP) y dispositivos ópticos que dividen la luz, llamados *splitters*. Al referirse como una red pasiva, significa que no está alimentada por ningún voltaje y sólo se hace uso de la fibra óptica y de los *splitters* que también están hechos de materiales de las fibras ópticas.

Cada vez que la luz se divide dentro del *splitter* se pierde potencia en la señal óptica. Es por eso que la división de la señal tiene un límite de hasta 256 divisiones, por cada canal del OLT (*Optical Line Terminal*).

Desde los inicios de esta red PON en 1990 la tecnología ha ido avanzando y los tipos de redes PON también, la siguiente lista muestra los diferentes tipos de redes PON.

- **G-PON** (*Gigabit PON*), cubre distancias entre 20 y 40 km con velocidades de 2.4 Gbps en *downstream* y 1.2 Gbps en *upstream*.
- **E-PON** (*Ethernet PON*), cubre distancias entre 20 y 40 km con velocidades de 1.25 Gbps en *downstream* y 1.25 Gbps en *upstream*.
- **10G-EPON**, 10 Gbps *upstream* y *downstream*
- **XG(S)-EPON**, 2.5 Gbps *upstream* y 10 Gbps *downstream*
- **NG-EPON2**, 40 Gbps *upstream* y *downstream*
- **50G-EPON**, 50 Gbps *upstream* y *downstream*

La **Figura 1.9** muestra cómo es la red PON, que inicia en un OLT, pasa por el *splitter* y llega a los ONUs (*Optical Network Unit*).

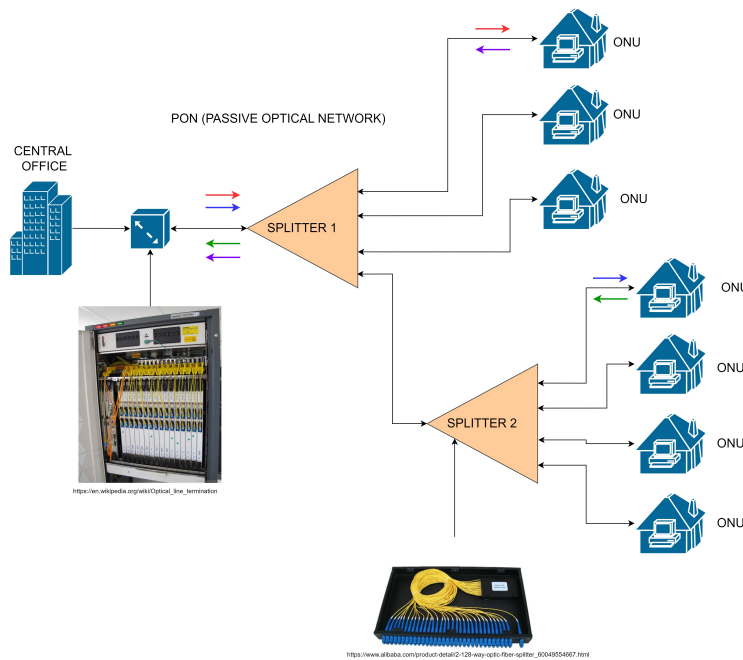


Figura 1.9: Distribución de la red pasiva con divisores ópticos y fibra óptica

1.2.4. Módem óptico, *Switch*, *Routers*

El **módem óptico** es un módulo que contiene dispositivos ópticos y eléctricos, que se encarga de modular y demodular la luz, podría decirse que es un traductor entre lo eléctrico y lo óptico, también es el encargado de hacer el procesamiento digital de las señales eléctricas y las convierte a diferentes protocolos de comunicación. El módem óptico puede combinarse con otros módulos para incrementar la capacidad del flujo de datos, normalmente todos estos módulos están montados en los *racks* que usan las redes ópticas.

Un ***switch*** es un dispositivo de red usado para reenviar señales ópticas/eléctricas. Puede proporcionar un canal de señal exclusivo para 2 nodos de red conectados al *switch*. Los *switches* se pueden dividir en *switches* de red de área amplia (capa de enlace de datos) y *switch* de red de área local

Un ***router*** es un dispositivo de interconexión de redes, generalmente trabaja en la capa de red. Seleccionará y establecerá rutas automáticamente de acuerdo con la condición de la señal.

Los módems ópticos se utilizan generalmente para acceder a fibras ópticas en el hogar. Los *switches* y *routers* funcionan en una red de área local, pero los *switches* funcionan en la capa de enlace de datos, mientras que los *routers* funcionan en la capa de red.

En las redes ópticas (*Access Network*, *Central Office*) hay *racks* que contienen todo el *hardware* necesario para implementar la red, la **Figura 1.10** muestra un ejemplo de un

rack de *ciena* donde se observa, los ruteos de fibras, los diferentes módulos que internamente traen módems ópticos y que en los puertos Rx, Tx tienen **CFP**(*C Form Factor Pluggable*).

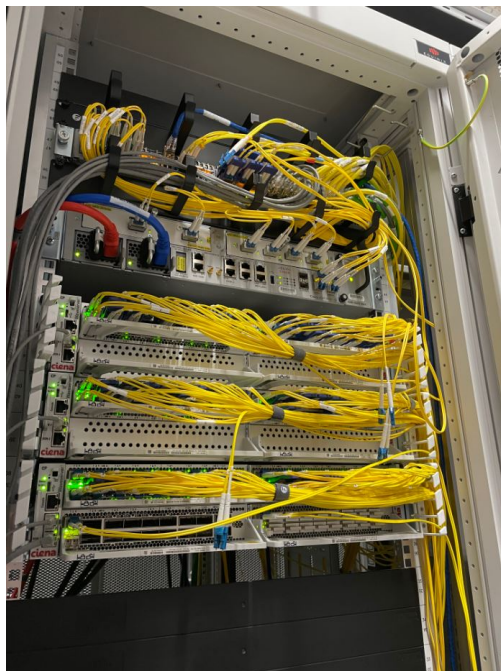


Figura 1.10: *Rack* de Ciena con diferentes módulos, *Switches*, ROADM y *Routers* dependiendo de la configuración que se desea en la red. [2]

1.3. Arquitectura de módems ópticos

El rápido crecimiento en la demanda de datos impulsa al desarrollo de dispositivos con las capacidades suficientes para soportar esta demanda, entre estos dispositivos se encuentran los módems ópticos.

Internamente, el módem óptico tiene la sección de Tx y Rx, la **Figura 1.11** muestra detalles de estas secciones, en la sección de Tx se encuentra el **QPMZ** (*Quad Parallel Mach Zehnder*) que es el modulador óptico y la potencia óptica que recibe es suministrada por un láser, el cual entra a un *splitter* que separa la luz, una parte la envía hacia el QPMZ y la otra parte hacia el **ICR** (*Intradyne Coherent Receiver*). El QPMZ también recibe datos eléctricos que vienen del **ASIC** (*Application Specific Integrated Circuit*), al juntar estos datos eléctricos y la potencia óptica produce la modulación óptica, a la salida del QPMZ se encuentra un TAP(Diodo **PIN** *Positive Intrinsic Negative*) el cual es un monitor de la potencia de salida del QPMZ. En la etapa siguiente se encuentra la **EDFA** (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) que amplifica la señal óptica, después se encuentra un filtro óptico y como regulador de potencia óptica al final se encuentra un **VOA** (*Variable Optics Attenuator*)

En la sección de Rx el VOA se encuentra a la entrada junto con sus TAP o monitores

de potencia y estos se conectan al ICR que es el receptor de la señal óptica y la convierte a eléctrica. Todas las señales Tx y Rx pasan por el ASIC que internamente procesa las señales eléctricas y genera diferentes protocolos de comunicación.

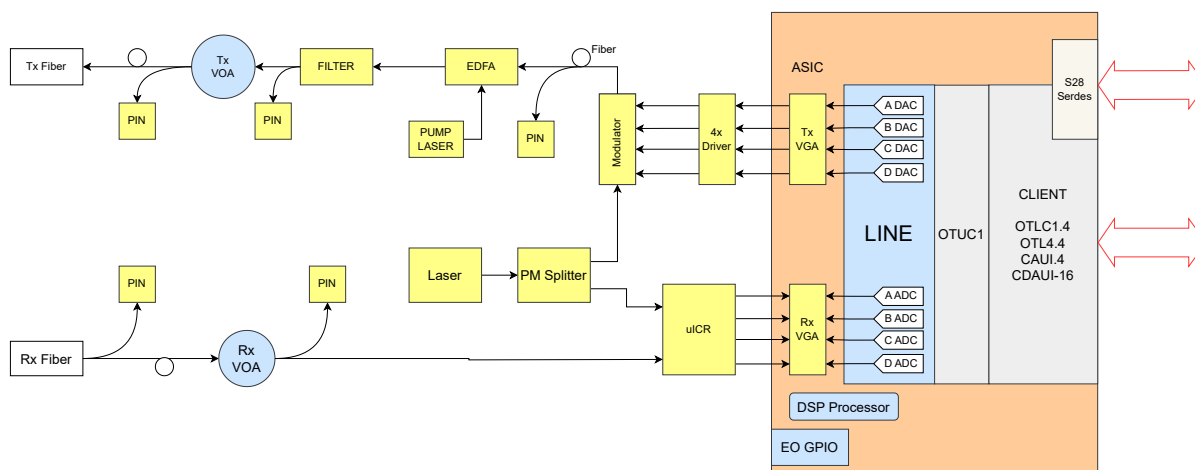


Figura 1.11: Diagrama a bloques de un módem óptico con sus módulos ópticos de Tx y Rx

La **Figura 1.12** muestra la arquitectura básica de un módem óptico: por un lado, se encuentra la interfaz óptica, las líneas que entran y las líneas que salen. Por el otro, la interfaz de las señales digitales. En recepción el primer bloque es el *Optical Automatic Gain Control* (OAGC) y la segunda es *Forward Error Correction* (FEC). El OAGC debe realizar varias funciones para estabilizar las fluctuaciones de la señal recibida para una detección confiable. Primero es proteger a los fotodiodos de la saturación o de daños eléctricos debido a alguna potencia óptica elevada, producto de algún amplificador óptico “*Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA)” los cuales son susceptibles al efecto *Q-Switch* del láser y pueden elevar su potencia de salida por encima del límite diseñado. La segunda función del OAGC es mantener un bajo ruido de la amplificación óptica para mejorar la sensibilidad del receptor, esto es crítico para maximizar el margen del enlace de comunicación. Por último, el OAGC debe reducir los transitorios de potencia en el receptor que degradan el desempeño del *bit error rate*.

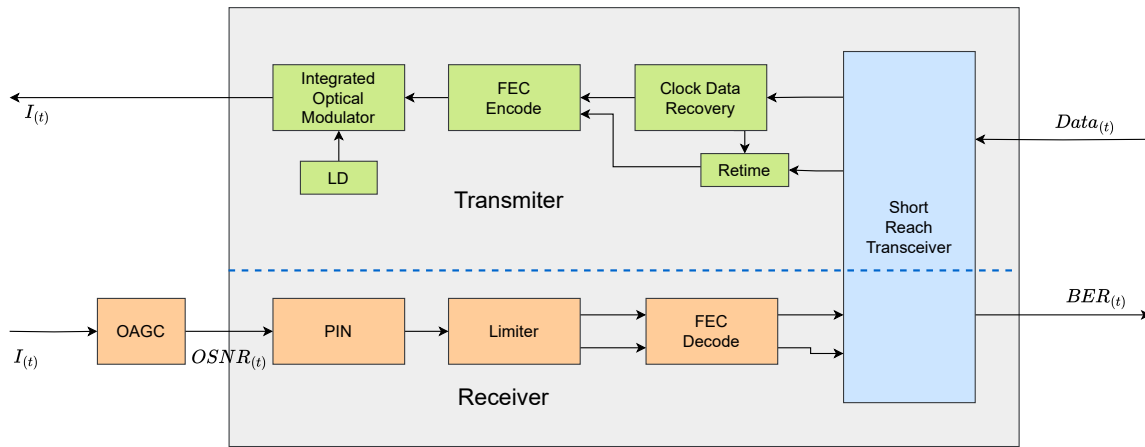


Figura 1.12: Diagrama a bloques de un módem óptico

La **Figura 1.13** muestra partes complementarias del módem óptico, como lo es el *Form Factor Pluggable* que internamente contiene un dispositivo óptico **TOSA** (*Transmitter Optical SubAssembly*) y un **ROSA** (*Receiver Optical SubAssembly*), en esencia este trabajo de tesis se concentra en el TOSA y ROSA, para transmitir y recibir datos.

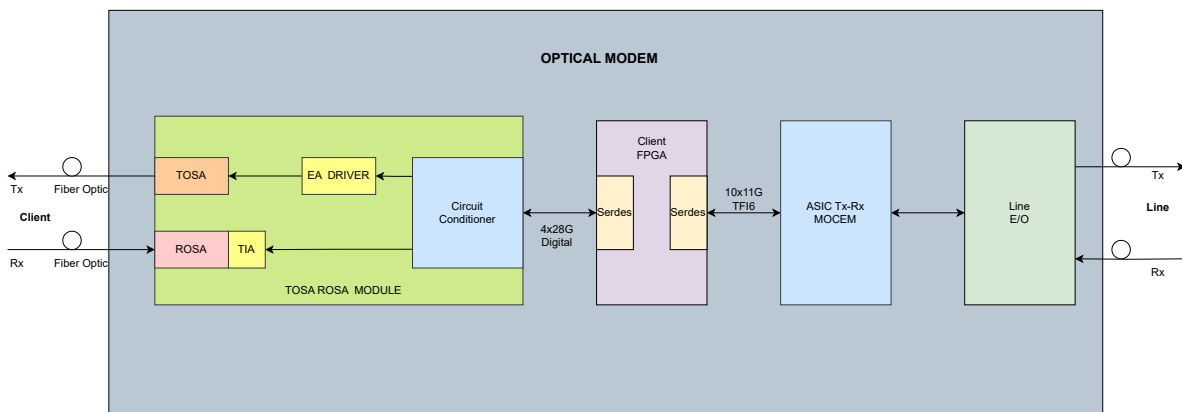


Figura 1.13: Diagrama a bloques de un módem óptico con módulo TOSA ROSA

La **Figura 1.14** muestra la evolución de las velocidades de comunicación en los módems ópticos de la compañía *Ciena*, en donde se puede observar que en el 2005 se inicia con velocidades de 10G, en 3 años se incrementa a 40G y dos años más se alcanzan los 100G en el 2010. Con la llegada de la generación 3 en 2012 se alcanzan los 200G, en el 2016 llega la generación 4 con 400G y pareciera que cada 4 años la velocidad se está incrementando, ya que 4 años después en el 2020 se llega a los 800G y esta tecnología es la más actual en este 2023. A futuro se anuncia la comercialización de la generación 6 con capacidad de 1.6 Tbps.

Cabe mencionar que el avance de los módems ópticos es en capacidad de flujo de datos, pero en tamaño se va reduciendo, cada vez estos módems son más rápidos y más pequeños.

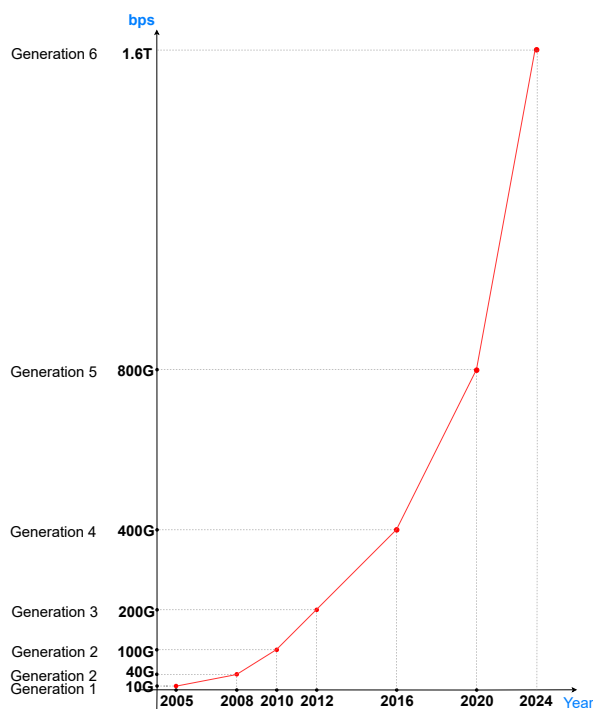


Figura 1.14: Evolución de las velocidades de comunicación en los módems ópticos de *Ciena*.

Otra tecnología que también conserva un crecimiento continuo son los **FP** (*form factor pluggable*) ó *transceiver* óptico, aunque siempre van un paso atrás de los módems, por ejemplo si los módems están en 1.6 Tbps los FP están en 800 Gbps.

La función de los *transceivers FP* es la misma que la de los módems ópticos, la diferencia radica en la distancia y la capacidad de datos que pueden manejar, siendo el módem óptico superior en capacidad de datos y distancia. Los módems ópticos están presentes principalmente en las redes *core* mientras que los *transceivers FP* están en las redes *metro*.

La evolución de los **transceiver ópticos** ha sido muy rápida, iniciando en 1995 con 1 Gbps y llegando a los 800 Gbps en el periodo del 2021 al 2023. La **Figura 1.15** muestra la evolución a través del tiempo y el incremento en su *rate* de comunicación.

El primer *transceiver* óptico fue el **GBIC** (*Gigabit Interface Converter*) que transmitía a 1 Gbps, 5 años después en el 2020 aparece el **SFP** (*Small Form Factor Pluggable*) que era más pequeño pero con la misma funcionalidad y más capacidad 4 Gbps. El siguiente paso que dio la tecnología fue hacia los 10 Gbps con el XFP y SFP+, posteriormente llegaron los *transceiver* de 40G con el **QSFP+** (*Enhanced Quad Small Form Factor Pluggable*) y 100G con el QSFP28. La doble densidad permitió alcanzar velocidades de 400G con el QSFP-DD. El *transceiver* óptico con mayor capacidad de transferencia de datos en el 2023 es el **SFP-DD** (*Small Form Factor Pluggable Double Density*) con 800G y con alcance en distancia desde 500 m hasta 10 km.

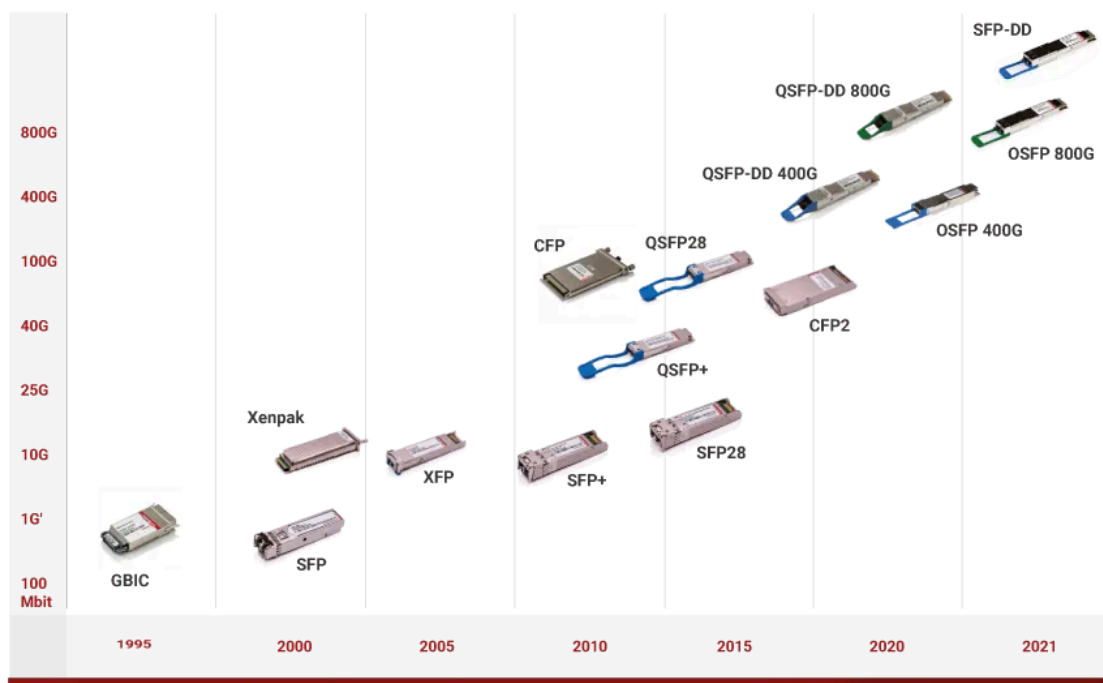


Figura 1.15: Evolución de los *Optical Transceiver Form Factors*. [3]

Capítulo 2

Fundamentos de Óptica

2.1. Introducción

Este capítulo presenta conceptos básicos de la luz, como la reflexión, la refracción y el índice de refracción, conceptos necesarios para entender las comunicaciones ópticas. También describe la reflexión interna total para poder entender cómo viaja la luz a través de la fibra óptica y por último se habla de la dispersión que sufren los rayos de luz al viajar por diferentes materiales.

2.2. Naturaleza de la Luz

La luz ha sido un objeto de investigación desde hace mucho tiempo. Platón en 427 a. C. pensaba que la luz eran chorros de partículas(efluvios), Euclides en 300 a. C. decía que los ojos emitían rayos luminosos, Herón de Alejandría en 100 a. C., creía que la velocidad de la luz era infinita, pero fue hasta 905 d. C. cuando la teoría de la luz inicia a tener más solidez con Alhazen que encuentra que los objetos no tienen luz propia sino que la reflejan, posteriormente Snell en 1637 fórmula que la luz cambia su ángulo al pasar de una superficie a otra. Todos estos filósofos y científicos dieron los primeros pasos de las principales teorías de la luz.

2.2.1. Teoría Corpuscular

La teoría corpuscular de la luz se basa principalmente en la idea de que la luz son partículas muy pequeñas sin masa que viajan en línea recta. Esta teoría fue propuesta por Isaac Newton en 1704.

Los corpúsculos son emitidos por fuentes luminosas y viajan a gran velocidad que pueden pasar a través de las superficies transparentes y que rebotan en las superficies opacas.

La teoría corpuscular afirma que las imágenes que vemos es debido a que los corpúsculos inciden en la retina y los colores es debido a los diferentes tamaños de los corpúsculos. Esta teoría explica por qué la luz viaja en línea recta, la reflexión y la refracción.

2.2.2. Teoría Ondulatoria

El *Traité de la Lumière* fue publicado en 1690, en esta obra se habla de la teoría ondulatoria de la luz y el autor es Christiaan Huygens. La teoría ondulatoria nace de la inquietud de resolver el dilema de la doble refracción.

A Christiaan Huygens le obsequiaron un cristal de Islandia, el cual tenía una particularidad muy especial, ya que al ponerlo sobre una imagen, la imagen se duplicaba, es decir, si la imagen era una línea dibujada en un papel, al colocar el cristal de Islandia sobre la línea, se verían dos líneas. Este fenómeno absorbió por completo a Christian hasta que logro explicarlo con su teoría ondulatoria de la Luz.

Huygens afirma que la luz viaja como ondas y que es capaz de viajar en el vacío por medio del éter, donde el éter es un medio insustancial e invisible que está en todos lados. También dice que la luz viaja más lento al entrar en algún material, como por ejemplo el agua.

La teoría ondulatoria cobro más fuerza con los experimentos que realizo Thomas Young sobre interferencia luminosa y Augustin Jean Fresnel sobre la difracción.

La teoría ondulatoria creó mucha controversia y discusión científica, ya que había un grupo muy grande que apoyaban la teoría corpuscular de Newton.

2.2.3. Teoría Electromagnética de la Luz

Antes de James Clerk Maxwell ya había algunas sospechas de que los fenómenos electromagnéticos y ópticos tenían alguna relación, estas ideas se despertaban al ver algún rayo como emitía luz y también como los ojos convertían la luz a señales eléctricas. Todo esto eran meras especulaciones hasta la llegada de *On Physical Lines Force* un artículo en el que Maxwell explica de forma matemática la relación entre los fenómenos electromagnéticos y ópticos. En el artículo Maxwell explica cómo la Luz y las ondas electromagnéticas son ondas transversales y por lo tanto no necesitan un medio de propagación, con esto desecha la idea del éter propuesta por Huygens. También demuestra que las velocidades de la luz y las ondas electromagnéticas son las mismas y consolida su teoría con 4 ecuaciones que describen al electromagnetismo.

- Ley 1: Ley de Gauss para el campo eléctrico.

- Ley 2: Ley de Gauss para el campo magnético.
- Ley 3: Ley de Faraday.
- Ley 4: Ley de Ampère-Maxwell.

Aunque la teoría de Maxwell es muy sólida, no es capaz de explicar el efecto fotoeléctrico.

2.2.4. Teoría de los Cuantos para la Luz

Max Planck establece que la relación entre la energía Materia-Luz es posible sólo por cantidades finitas o cuantos de luz, posteriormente a esto se le llamó fotones.

Albert Einstein se basa en la teoría de Plank para explicar el efecto fotoeléctrico por medio de los corpúsculos de luz a los que nombro fotones. También demuestra que la luz se puede comportar como onda en determinadas condiciones.

2.2.5. Teoría de la Mecánica Ondulatoria

Esta teoría Junta tanto la teoría electromagnética como la de los cuantos, herencia de la teoría corpuscular y ondulatoria, con esto evidencia la doble naturaleza de la luz. Esta característica fue comprobada por Luis de Broglie en 1924. Así, la luz, en referencia a su propagación, se comporta como onda, aunque su energía es transportada junto con la onda luminosa por unos pequeños corpúsculos llamados fotones.

Esta teoría define, la naturaleza corpuscular de la luz al interactuar con la materia (proceso de emisión y absorción) y la naturaleza electromagnética de su propagación [4].

2.3. Reflexión

La reflexión de la luz es el cambio en la dirección en un mismo medio que experimenta un rayo cuando incide sobre una superficie de un medio distinto. Existen 2 tipos de reflexiones, **reflexión difusa** y **reflexión especular**.

La **reflexión especular** se produce en superficies totalmente pulimentadas como los espejos, en estos casos las irregularidades de la superficie son menores a la longitud de onda del rayo de luz. El rayo incidente cambia su dirección con el mismo ángulo pero en sentido opuesto tomando como referencia a la recta normal, todos estos, rayo incidente, rayo reflejado y normal, se encuentran dentro del mismo plano. Durante la reflexión, el rayo de luz conserva la misma longitud de onda y la misma velocidad. La **Figura 2.1** muestra cómo se reflejan los rayos de forma paralela sobre la superficie 2.

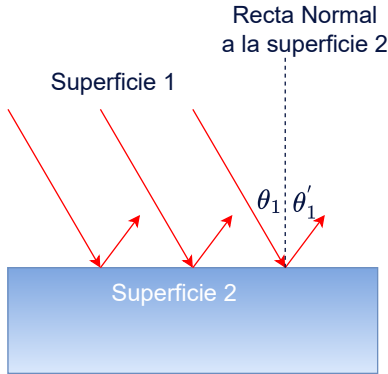


Figura 2.1: Reflexión especular, el rayo incide sobre una superficie diferente y cambia su dirección en sentido contrario pero con el mismo ángulo respecto a la normal, las irregularidades de la superficie son menores a la longitud de onda del rayo de luz.

La **reflexión difusa** ocurre cuando el rayo de luz incide sobre una superficie y los rayos son reflejados en diferentes direcciones, la superficie donde inciden los rayos de luz tiene irregularidades más grandes que la longitud de onda del rayo. La **Figura 2.2** muestra la superficie y la reflexión de los rayos de luz en diferentes direcciones.

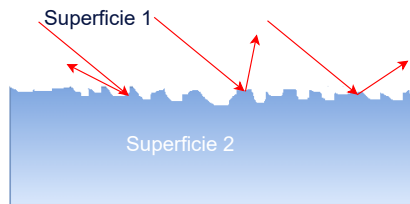


Figura 2.2: La reflexión difusa es producida por irregularidades en la superficie de mayor tamaño que la longitud de onda, esto provoca que los rayos de luz se reflejen en diferentes direcciones.

La **ley de la reflexión** nos dice que el ángulo del rayo incidente es igual al rayo reflejado.

$$\theta_1 = \theta'_1 \quad (2.1)$$

La **Figura 2.3** muestra los elementos conceptuales de la ley de reflexión, se muestra las 2 superficies, el rayo incidente y el rayo reflejado, los ángulos se toman respecto a la recta normal.

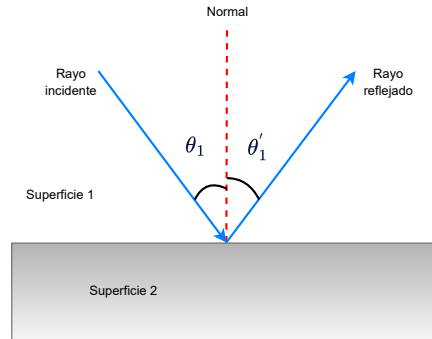


Figura 2.3: El ángulo de reflexión es igual al ángulo incidente respecto a la normal.

2.4. Refracción

La **refracción** de un rayo de luz es cuando el rayo se dobla al cruzar la frontera entre dos medios de transmisión que tienen diferente densidad, es decir cuando el rayo cambia su ángulo respecto a la normal. Un rayo de luz, al incidir sobre una superficie, se separa en un rayo reflejado y un rayo refractado, todos estos rayos se encuentran en el mismo plano.

La **Figura 2.4** muestra cómo el ángulo θ_2 del rayo refractado es diferente al ángulo del rayo incidente θ_1 .

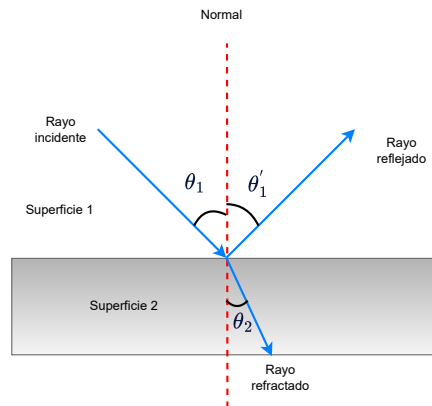


Figura 2.4: El rayo refractado es el que entra a la superficie 2, cambiando el ángulo respecto a la normal, el rayo de luz se dobla.

La correspondencia entre la velocidad del rayo y el ángulo está representada por la **ecuación 2.2**, donde v_1 es la velocidad de la luz en el primer medio, y v_2 es la velocidad en el segundo medio. En esta ecuación se puede ver que cuando la luz se mueve de una velocidad alta a una más pequeña, el ángulo de refracción θ_2 es menor que el ángulo de incidencia θ_1

y el rayo se dobla hacia la normal.

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{v_2}{v_1} \quad (2.2)$$

2.5. Índice de Refracción

Tomando como referencia que la velocidad máxima de la luz es en el vacío, se puede definir al **índice de refracción** como una relación de la velocidad de la luz en el vacío entre la velocidad de la luz en otro medio. La **ecuación 2.3** muestra la fórmula del índice de refracción.

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

c : Velocidad de la luz en el vacío.

v : Velocidad de la luz en un medio.

n : Índice de refracción.

Algunas características de n es que es adimensional y que siempre tendrá un valor ≥ 1 , debido a que $v \leq c$.

Ejemplos de los índices de refracción más comunes:

- Agua $n = 1.333$.
- Aire $n = 1.000293$.
- Hielo $n = 1.309$.
- Vidrio sin plomo $n = 1.52$
- Diamante $n = 2.419$

La luz, al pasar de un medio a otro, cambia su longitud de onda, pero conserva su frecuencia, este fenómeno fue expresado matemáticamente por Willebrord Snell, y por tal motivo se conoce como la **ley de Snell**. La **ecuación 2.4** muestra la relación matemática.

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (2.4)$$

2.6. Reflexión Interna Total

La **reflexión interna total** se presenta cuando la luz se dirige de un medio con índice de refracción conocido hacia otro medio con menor índice de refracción.

La **Figura 2.5** muestra el ángulo de incidencia y de refracción en 2 superficies con diferente índice de refracción, donde n_1 y n_2 son índices de refracción y $n_1 > n_2$, referente a los ángulos, θ_1 es el ángulo de incidencia y θ_2 es el ángulo de refracción.

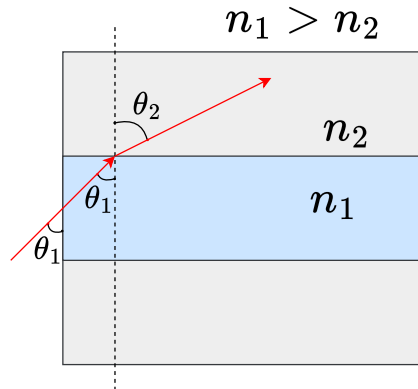


Figura 2.5: Ángulo de incidencia y su ángulo de refracción en 2 superficies con diferente índice de refracción.

La reflexión interna total inicia cuando el ángulo de refracción $\theta_2 = 90^\circ$ y cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo crítico $\theta_1 = \theta_c$.

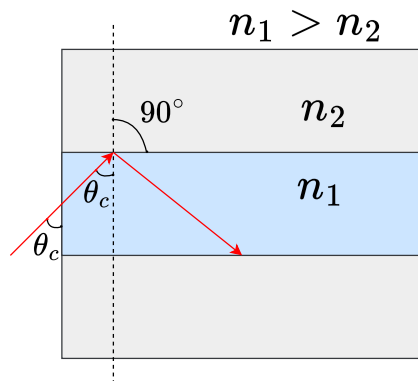


Figura 2.6: Ángulo crítico y ángulo de refracción de 90° .

Para hallar el ángulo crítico θ_c se utiliza la ley de refracción de Snell, la cual se muestra en la **ecuación 2.5**.

$$\begin{aligned}
 n_1 \sin \theta_1 &= n_2 \sin \theta_2 \\
 \theta_1 &= \theta_c \quad ; \quad \theta_2 = 90^\circ \\
 \sin \theta_c &= \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{para } n_1 > n_2)
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

2.7. Dispersión

Para ciertos materiales, el índice de refracción n varía respecto a la longitud de onda que pasa a través de él, a este comportamiento se le llama dispersión. La **Figura 2.7** muestra el comportamiento de 3 materiales diferentes (vidrio sin plomo, acrílico y cuarzo fundido) respecto a la longitud de onda. Se puede observar cómo el índice de refracción disminuye cuando la longitud de onda aumenta.

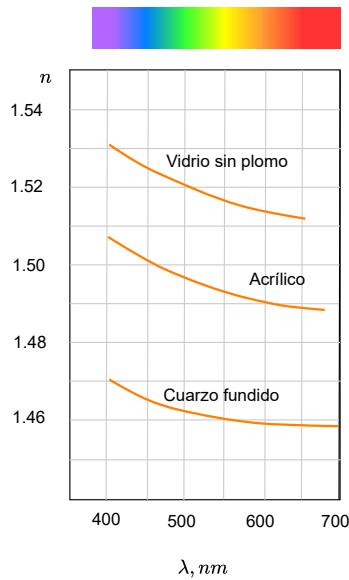


Figura 2.7: Variación del índice de refracción respecto a la longitud de onda en tres materiales, la luz violeta es la que más se desvía; la roja se desvía menos. [4]

El fenómeno natural “Arcoíris” es consecuencia de la dispersión de la luz, donde la luz al pasar por las gotas de agua se separa en diferentes longitudes de onda, las cuales experimentan refracciones y reflexiones que proyectan estas longitudes de onda en diferentes ángulos respecto al rayo incidente. Newton demostró que los colores tienen un ángulo de desviación propio a su longitud de onda y que al combinarlos forman la luz blanca.

Capítulo 3

Láser y Fotodetectores PIN-APD

3.1. Introducción

En este capítulo se describen 2 temas muy importantes como lo son el láser y sus fotodetectores.

El láser se encarga de proporcionar el medio para transportar los datos en formas de luz, y los fotodetectores se encargan de recibir esa luz y convertirla en señal eléctrica para su procesamiento dentro de algún ASIC o **FPGA** (*Field Programmable Gate Array*).

3.2. Láser

El **LASER** (*Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation*) es la fuente óptica más común en las comunicaciones por fibra óptica. Algunas características del láser son: Modulación a alta velocidad, alta eficiencia, longitud de onda infrarroja en la banda de comunicación, tamaño pequeño y alta confiabilidad.

La primera emisión coherente desde un semiconductor fue demostrada en 1958 por el equipo de investigación de Robert Hally. El primer láser moderno de doble heteroestructura fue propuesto por Herber Kroemer.

3.2.1. Ganancia y Oscilación Óptica

Básicamente, el láser consiste en un amplificador de luz combinado con una retroalimentación óptica. La retroalimentación hace que el amplificador oscile a frecuencias ópticas, generando luz como salida del dispositivo.

El concepto del láser se muestra en la **Figura 3.1**. Un amplificador óptico es colocado entre 2 espejos R_1 y R_2 los cuales generan la retroalimentación óptica. La luz rebota de un lado a otro entre los 2 espejos y cada vez que pasa por el amplificador adquiere una ganancia,

cabe mencionar que una cavidad *Fabry-Perot* está formada por 2 superficies reflectantes. Las líneas dirigidas $A^+(z)$ y $A^-(z)$ muestran el comportamiento de los campos eléctricos de la luz que se encuentra rebotando en los espejos, se puede observar que tienen un comportamiento exponencial.

Una característica más de los amplificadores ópticos es que no amplifican en todo el rango de frecuencias, dependiendo de su diseño sólo amplificaran en un cierto rango de frecuencias, generando una curva parecida al filtro pasa-banda.

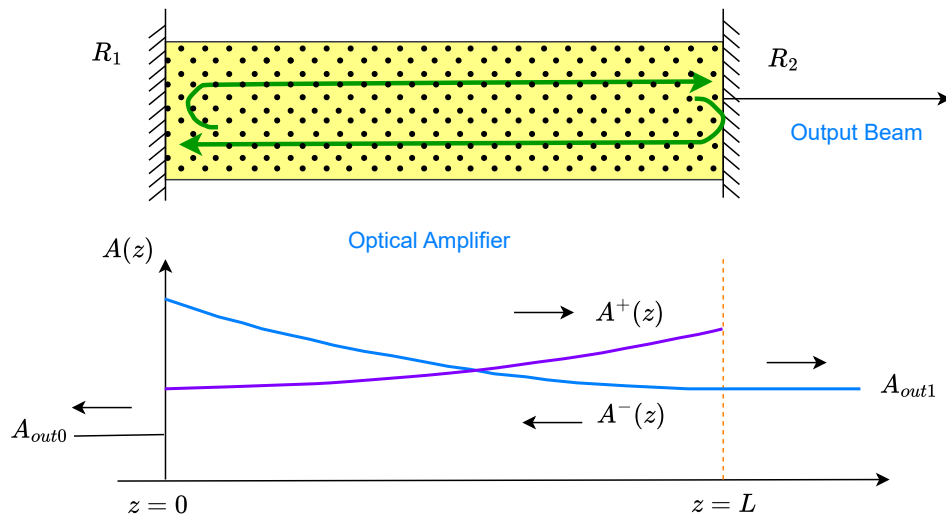


Figura 3.1: Cavidad Fabry-Perot y gráficas de campo eléctrico. [5, p. 96]

En la **Figura 3.2** se muestra la potencia óptica del láser respecto a la corriente eléctrica que se le aplica, se puede observar que para que la potencia óptica empiece a incrementar debe superar la corriente de umbral I_{th} , pasando esa barrera la potencia empezará a crecer linealmente con incrementos pequeños de corriente. Si la corriente es demasiado grande se pierde la linealidad y la curva se mantendrá plana.

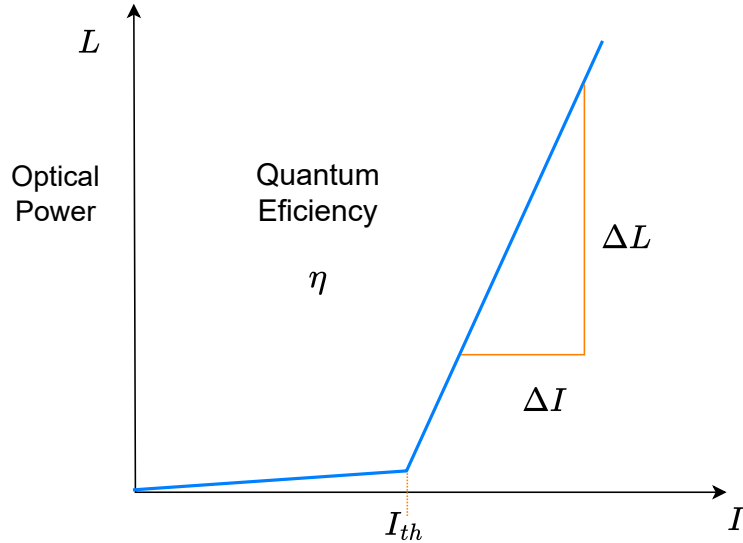


Figura 3.2: Curva LI (*Light-Current*) típica de un Láser. [5, p. 97]

Para poder explicar la amplificación es necesario comprender las 3 formas principales en las que interactúa la luz con los átomos. En la **Figura 3.3** se muestran estas 3 formas.

1. **Absorción:** Es cuando un fotón con una frecuencia cercana a la resonancia es absorbido por un átomo, la energía del fotón es transferida al electrón que se encuentra en el estado de baja energía E_1 y causa que brinque al nivel de alta energía E_2 .
2. **Emisión espontánea:** Es cuando un electrón que se encuentra en el estado de alta energía E_2 cae hacia el estado de baja energía E_1 de manera espontánea y libera energía en forma de fotón con una frecuencia definida por la ecuación de Planck $hf = E_2 - E_1$.
3. **Emisión estimulada:** Se produce cuando un fotón cercano a la frecuencia de resonancia ocasiona que un electrón en estado de alta energía E_2 caiga al estado de baja energía E_1 y libere un segundo fotón que se encuentra en fase con el primero que estimuló al electrón. Al haber un fotón a la entrada y dos fotones a la salida producen el efecto de amplificación óptica.

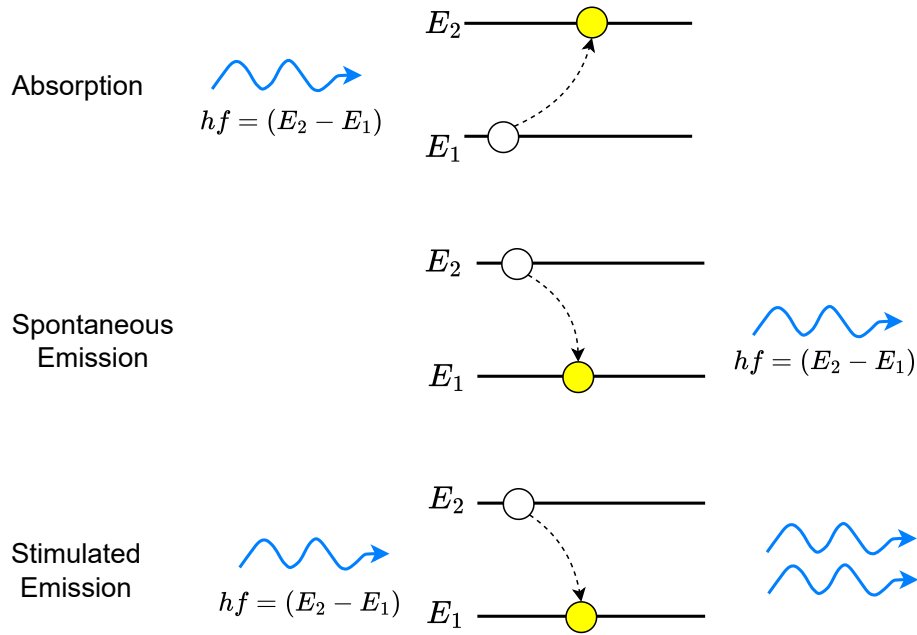


Figura 3.3: Tres formas de interactuar entre la luz y los átomos. [5, p. 99]

3.2.2. Amplificación en un semiconductor

Desde la perspectiva de niveles de energía, un semiconductor puede ser considerado como un sistema de 2 niveles, uno en la banda de valencia y otro en la banda de conducción, estas bandas se generan debido a la superposición de los campos potenciales de los átomos que se encuentran muy cercanos unos a otros. La banda de valencia E_v y la banda de conducción E_c están separadas por la banda prohibida E_g (*band gap*).

Para la amplificación de luz, es necesaria la inversión de población, que se refiere al cambio de todos los electrones a la banda de conducción y que puede ser alcanzada polarizando directamente la unión p-n del diodo. En la **Figura 3.4** se observan las 2 bandas de energía, la banda de valencia en la parte de abajo con los huecos y la banda de conducción con los electrones,

Se puede ver que dentro de la región de transición, se realiza una inversión de población: el exceso de electrones del lado n y el exceso de huecos del lado p existen en la misma región. Esta zona donde se realiza la inversión de población se denomina región activa. El tipo de unión que se muestra en la figura se llama homo-unión y con esta configuración es difícil crear una alta ganancia porque todas las cargas se difunden en las regiones opuestas obstruyendo la inversión de población dentro de la región activa. La alta ganancia se puede lograr intercalando un material de la banda prohibida baja entre dos materiales de la banda prohibida más alta, creando una barrera potencial para la difusión de los portadores. Tal

estructura se conoce como hetero-unión, y los láseres resultantes son mucho más eficientes.

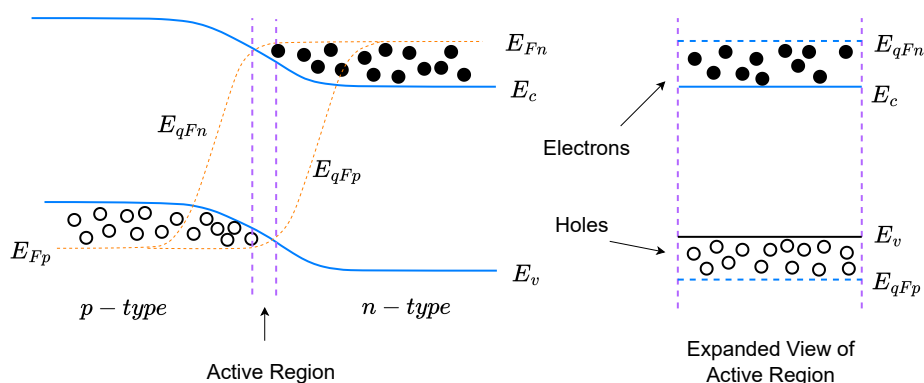


Figura 3.4: Inversión de población en un semiconductor polarizado directamente. [5, p. 103]

3.2.3. Frecuencia *chirp*

Cualquier cambio en la densidad de portadores, cambiará el índice de refracción, y cualquier cambio en el índice de refracción cambia la frecuencia óptica del láser. Por tal motivo, cada vez que modulamos la intensidad de la luz a través de la modulación directa, también estamos modulando la frecuencia óptica de la luz del láser. Esta modulación en frecuencia es parecida a la modulación en **FM** (*Frequency Modulation*) y es conocida como **frecuencia chirping**. La frecuencia *chirping* implica un incremento en el ancho de la línea espectral del diodo láser y esto provoca una mayor degradación debido a la dispersión.

La frecuencia *chirping* puede ser dividida en 2 componentes:

1. ***Chirp* dinámica o transitoria:** Es proporcional al rate de cambio en la potencia óptica y domina en la modulación de señales grandes o transitorios rápidos.
2. ***Chirp* estática o adiabática:** Está relacionada con la estructura del material y con la longitud de onda.

3.2.4. Estructura del láser semiconductor

El láser es un diodo polarizado directamente donde la inversión de población resulta del flujo de los portadores mayoritarios en la región activa. En la **Figura 3.5** se muestra la estructura de una unión p-n simple, de un diodo, también se muestra el flujo de la corriente y la dirección de la luz, cuando la unión es polarizada directamente.

La corriente fluye desde el contacto metálico en la zona p, hasta el contacto metálico en la zona n. La región entre las zonas p y n es donde se realiza la amplificación óptica y la luz se propaga perpendicularmente al flujo de la corriente.

Las superficies entre los 2 lados del dispositivo funcionan como espejos de una cavidad Fabry Perot con una reflectividad del 30 %, cuando la luz alcanza la potencia suficiente, sale de forma perpendicular al flujo de la corriente. Este tipo de estructura no es eficiente para un láser ya que reduce la ganancia óptica.

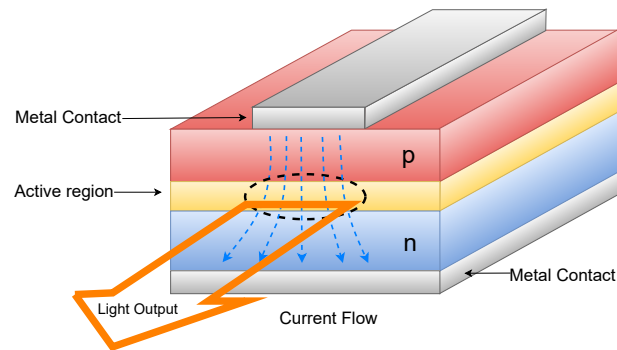


Figura 3.5: Estructura de un diodo láser Homo-Unión. [5, p. 117]

Los láseres modernos están hechos a través de un proceso llamado crecimiento epitaxial con varias capas de material semiconductor. A este tipo de estructura se le llama heteroestructura. El proceso inicia con un material base, usualmente GaAs (Arseniuro de Galio) o InP (Fosfuro de Indio), y las capas siguientes se construyen sobre esta base. La mayoría de los láseres están contruidos con heteroestructuras basadas en InGaAsP/InP.

En la **Figura 3.6** se puede ver una sección transversal de un láser basado en una heteroestructura enterrada. Se puede ver que la zona activa InGaAsP se encuentra entre 2 capas InP horizontales y 2 capas verticales. Debido a que el índice de refracción del InGaAsP es alto, el campo óptico queda confinado lateral y verticalmente en la zona activa, al mismo tiempo la geometría del aislante SiO_2 y la unión p-n hacen que la corriente pase principalmente por la región activa, la alta densidad de cargas y fotones mejoran la eficiencia de este tipo de láser.

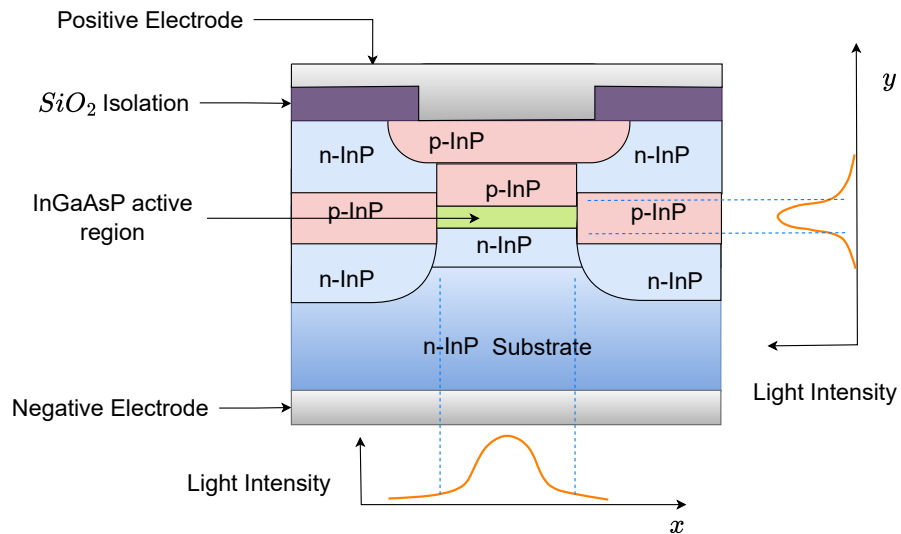


Figura 3.6: Heteroestructura típica InGaAsP/InP. [5, p. 118]

3.2.5. DFB (*Distributed feedback*) láser

El láser Fabry Perot genera varias longitudes de onda y es conocido como un láser multimodo. Este tipo de láser no es eficiente por el espectro tan amplio que tiene, por lo que, para poder tener un ancho espectral más reducido se debe hacer la retroalimentación óptica con una rejilla que se encuentra a lo largo de la región activa. A esta estructura se le conoce como **reflector Bragg** y este tipo de láser es conocido como DFB láser. En la **Figura 3.7** se puede ver la rejilla de Bragg (*Grating*), esta rejilla solo reflejará la luz en una sola longitud de onda acorde al diseño de la rejilla y la luz láser saldrá de forma perpendicular al flujo de la corriente.

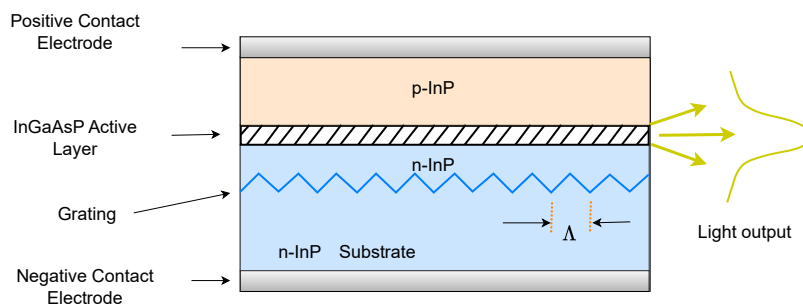


Figura 3.7: Cross section DFB laser. [5, p. 120]

3.2.6. Láser VCSEL (*Vertical Surface Emmiting Laser*)

Una diferencia que tiene el láser VCSEL con respecto a otros es que la luz sale perpendicular pero al plano de la región activa y no al flujo de la corriente. En la **Figura 3.8** se observa cómo la región activa de un láser VCSEL está formada por múltiples pozos cuánticos (*Quantum Well*), estos pozos cuánticos son pequeñas regiones activas con longitudes que están por debajo de las decenas de nanómetros, todas estas capas de pozos cuánticos están rodeadas por varias capas de reflectores Bragg.

La corriente en estos dispositivos fluye entre los contactos positivo y negativo, pasando por la zona activa y concentrando una alta cantidad de portadores y el volumen pequeño de la capa activa hace que la corriente de umbral sea muy pequeña.

Algunas ventajas del láser VCSEL es que al salir la luz de forma vertical es muy fácil conectar la fibra óptica y también facilita las pruebas o *testing*, ya que se pueden probar de forma matricial y esto reduce los costos. El VCSEL es usado en sistemas de transmisión de bajo costo y multimodo, pero sólo para cortas distancias.

Algunas desventajas es que la construcción de este tipo de láser en las longitudes de onda entre 1300 y 1600 nm son difíciles y es más fácil construirlos para la longitud de 850 nm, esta desventaja radica en la pérdida de potencia óptica en la fibra, en las longitudes entre 1300 y 1600 nm la pérdida es de 0.3 a 0.2 dB/km, mientras que la pérdida en la longitud de onda de 850 nm es de 3.2 a 2.5 dB/km. Con este tipo de desventaja, este láser no se puede usar en sistemas ópticos de largo alcance.

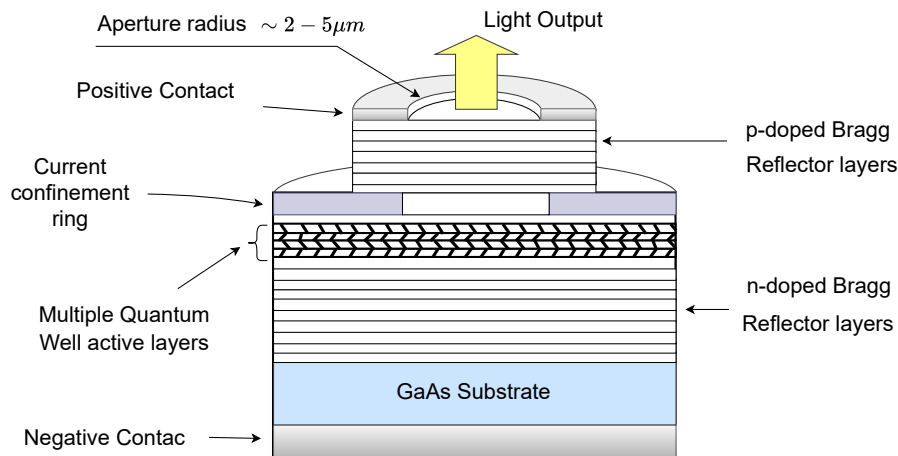


Figura 3.8: *Cross section VCSEL.* [5, p. 122]

3.3. Fotodetectores

Las señales que viajan a través de la fibra óptica se encuentran en el dominio óptico, pero una vez llegadas a su destino, se tienen que convertir al dominio eléctrico, esta conversión se realiza con fotodetectores que convierten los fotones en electrones.

En las comunicaciones ópticas existen 2 tipos de fotodetectores más utilizados; **Diodo PIN** (*Positive Intrinsic Negative*) y el **Diodo APD** (*Avalanche Photo Diode*).

3.4. Diodo PIN

El diodo PIN contiene semiconductor tipo **N** (*Negative*) y **P** (*Positive*), separados por un material intrínseco. El Diodo PIN hace uso del efecto fotoeléctrico para hacer la conversión de la potencia óptica en corriente eléctrica.

3.4.1. Características Estáticas del Diodo PIN

La **Figura 3.9** muestra al diodo PIN con su banda de energía y con sus 3 zonas, Positiva, Intrínseca y Negativa, también se muestra la polarización inversa para su correcto funcionamiento.

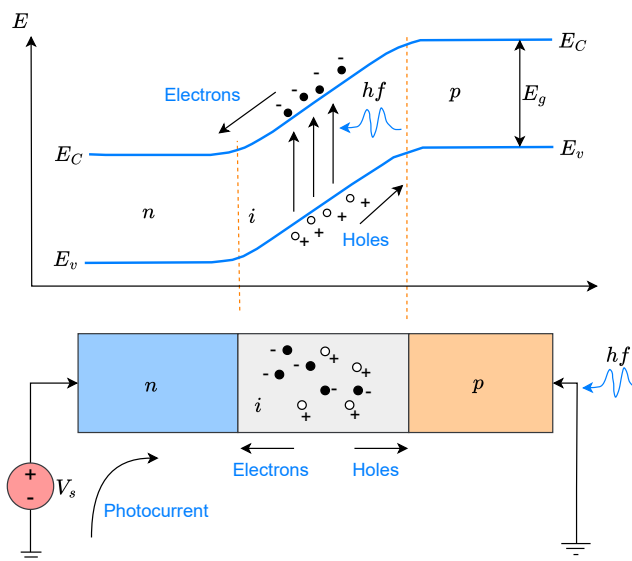


Figura 3.9: Diagrama de banda de energía y polarización inversa del diodo PIN. [5, p. 158]

La polarización inversa con una fuente de voltaje externa provoca un campo eléctrico en la zona intrínseca, esta zona debido a que se encuentra vacía de cargas y tiene alta resistencia, ayuda a que dicho campo eléctrico sea intenso. Cuando el fotón impacta esta zona intrínseca

desprende electrones haciendo de la banda de valencia pasen a la banda de conducción, los electrones son recolectados por el campo eléctrico provocando un flujo de corriente eléctrica.

Para que el fotón pueda desprender un electrón, la energía del fotón debe de ser mayor que la energía de la banda prohibida (*bandgap*) del semiconductor.

$$hf \geq E_g \quad (3.1)$$

$$E_g = E_c - E_v$$

E_g : Banda Prohibida.

E_c : Banda de Conducción.

E_v : Banda de Valencia.

h : Constante de Planck

f : Frecuencia óptica del fotón.

La eficiencia del fotodetector está definida por su responsividad, que está en términos de la corriente generada por la potencia óptica incidente de una determinada longitud de onda.

$$\rho = \frac{h}{P} \quad (3.2)$$

ρ : Responsividad $\frac{A}{W}$.

h : Constante de Plank.

P : Potencia Óptica.

También la responsividad se puede expresar en términos de mecánica cuántica.

$$\rho = \frac{e\eta}{hf} \quad (3.3)$$

ρ : Responsividad $\frac{A}{W}$.

e : Carga del electrón.

η : Fracción de fotones que generaron un electrón-hueco.

h : Constante de Plank.

f : Frecuencia óptica del fotón.

El diodo PIN se puede ver como una fuente de corriente controlada por fotones. La **Figura 3.10** muestra cómo la corriente es proporcional a la potencia óptica. Cuando no hay potencia óptica existe una corriente pequeña llamada **Dark Current**, esta corriente se

genera por la energía térmica que libera electrones en la parte intrínseca y genera un flujo de electrones.

El diodo PIN también puede generar corriente cuando está polarizado directamente, este modo de operación es conocido como modo **fotovoltaico**, cuando el diodo PIN es polarizado inversamente se conoce como modo **fotoconductor**.

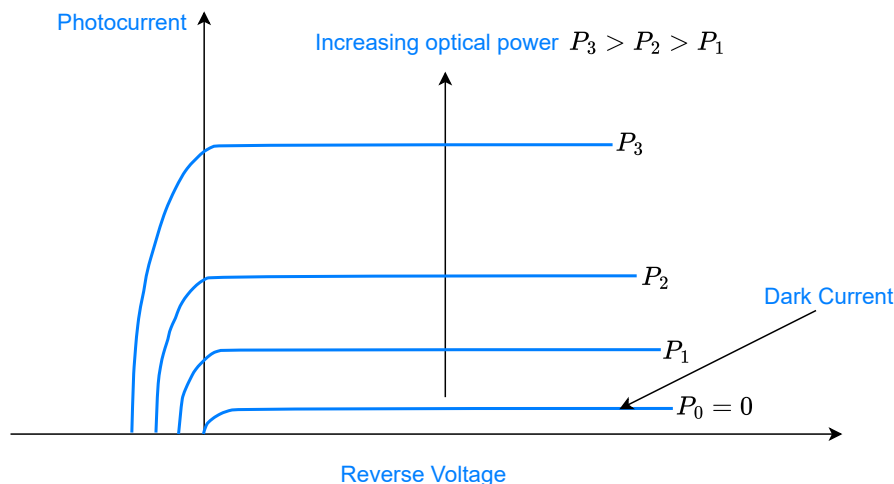


Figura 3.10: Voltaje Vs Corriente con polarización inversa. [5, p. 160]

3.4.2. Características Dinámicas del Diodo PIN

Cuando el diodo está trabajando con altas frecuencias, las características dinámicas toman importancia. La respuesta dinámica del diodo depende de factores internos (Estructura del diodo) y externos (Circuitos eléctricos). Entre los factores más importantes que afectan la respuesta dinámica se encuentran: el tiempo de transición, el tiempo de difusión y la capacitancia.

Tiempo de transición: Hace referencia al tiempo que les toma a las cargas recorrer la zona de deplexión, el tiempo de transición está en función de la velocidad de las cargas y el ancho de la región de deplexión, para lograr reducir el tiempo en que las cargas atraviesan la zona de deplexión se tendría que incrementar la velocidad de las cargas o reducir el ancho de la zona. Al incrementar el voltaje de polarización inversa se logra incrementar la velocidad de las cargas, pero se debe tener cuidado de no saturar dichas cargas, la otra opción es reducir la zona de deplexión en este caso también se debe cuidar de no hacerla tan pequeña porque ya no sería capaz de absorber la mayoría de los fotones.

Tiempo de difusión: Es un proceso lento de cargas generadas en las zonas P y N, para reducir este tiempo es necesario hacer más pequeñas las zonas P y N.

Capacitancia: Otro factor limitante es la capacitancia de la unión, así como las capacitancias parásitas del empaquetado, la polarización inversa hace que el diodo presente una capacitancia actuando las zonas P y N como las placas del capacitor y la zona intrínseca como el dieléctrico. Las capacitancias del empaquetado y de los pads, junto con la resistencia de carga forman un filtro pasa bajas.

La **Figura 3.11** muestra un modelo lineal ac simple de un diodo PIN con su resistencia de carga. El modelo es una fuente de corriente controlada por luz y un filtro pasa bajas.

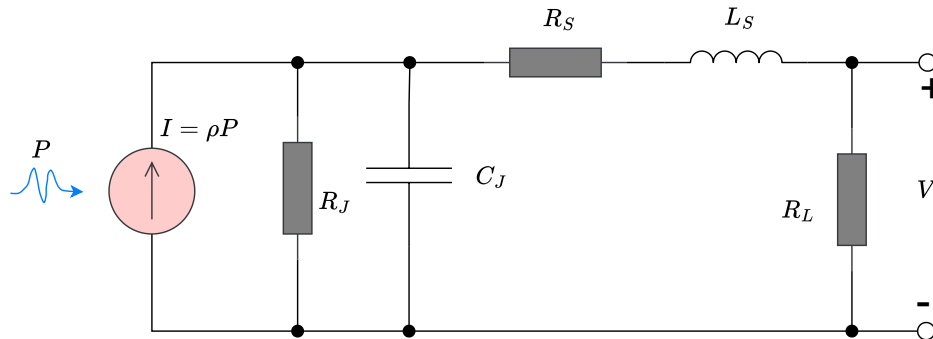


Figura 3.11: Modelo AC del diodo PIN. [5, p. 162]

P : Potencia Óptica.

I : Corriente eléctrica generada por la luz.

ρ : Responsivity.

R_J : Resistencia interna de la zona de deplexión.

C_J : Capacitancia de la unión.

R_S : Resistencias internas de las zonas P, N.

L_S : Inductancia del conductor que conecta al diodo con la carga.

R_L : Resistencia de Carga.

Para ciertos análisis R_S , L_S y R_J se pueden ignorar, R_S y L_S generalmente son valores muy bajos y R_J tiene un valor muy alto. La simplificación del circuito equivalente nos permite describir su comportamiento con la siguiente fórmula.

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi R_L C_J} \quad (3.4)$$

3.4.3. Estructura del Diodo PIN

La **Figura 3.12** muestra un ejemplo práctico de un diodo PIN InGaAs. La luz entra en la parte superior entre el espacio de los contactos metálicos. La apertura tiene un

antirreflejante para minimizar la reflexión de la luz.

El diodo tiene una zona intrínseca InGaAs ligeramente dopada. En la parte superior tiene una zona n dopada con InP y tiene una zona P. La zona InP P tiene una banda prohibida amplia, por tal motivo deja pasar los fotones para que lleguen a la zona intrínseca donde la mayoría de los fotones son absorbidos. Los contactos metálicos proporcionan la conexión eléctrica del diodo.

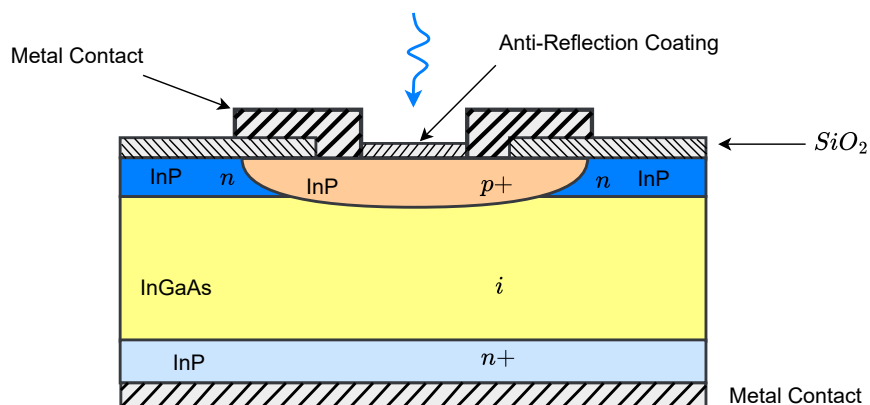


Figura 3.12: Estructura de un diodo PIN InGaAs. [5, p. 172]

La **Figura 3.13** muestra una comparación entre una fotorresistencia, un fotodiodo PN y un fotodiodo PIN, se puede observar como cambia la zona intrínseca, siendo mayor en el diodo PIN.

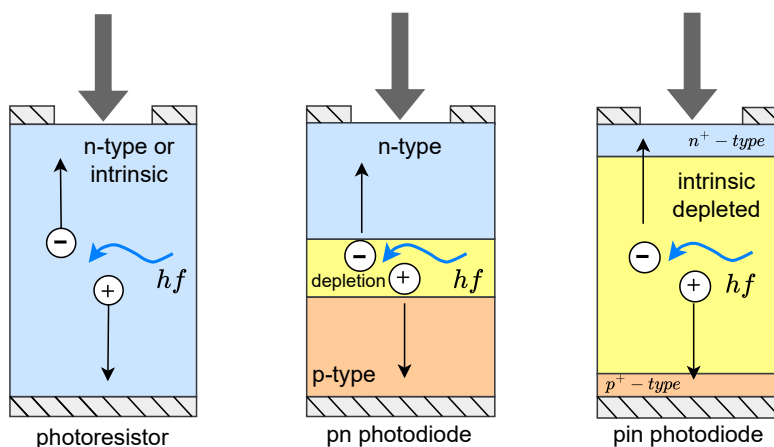


Figura 3.13: Comparación entre una fotorresistencia, un fotodiodo pn y un fotodiodo PIN Semiconductor. [6]

3.5. Diodo APD

El APD es un fotodetector que es utilizado cuando se requiere más ganancia en la corriente, ya que hace uso del efecto avalancha para producir una ganancia interna, debido a esta ganancia el **SNR** (*Signal to Noise Ratio*) del APD es mejor que la del diodo PIN.

En un APD el voltaje de polarización inversa es muy alto, esto hace que los electrones generados por los fotones sean acelerados por el intenso campo eléctrico presente en la zona P. Estos portadores con alta energía también colisionan con otros átomos, que da como resultado átomos ionizados que liberan electrones adicionales, a este efecto se le conoce como multiplicación avalancha.

La **Figura 3.14** muestra un diodo APD con estructura *Reach-Through*, se puede observar la intensidad del campo eléctrico y las bandas de energía.

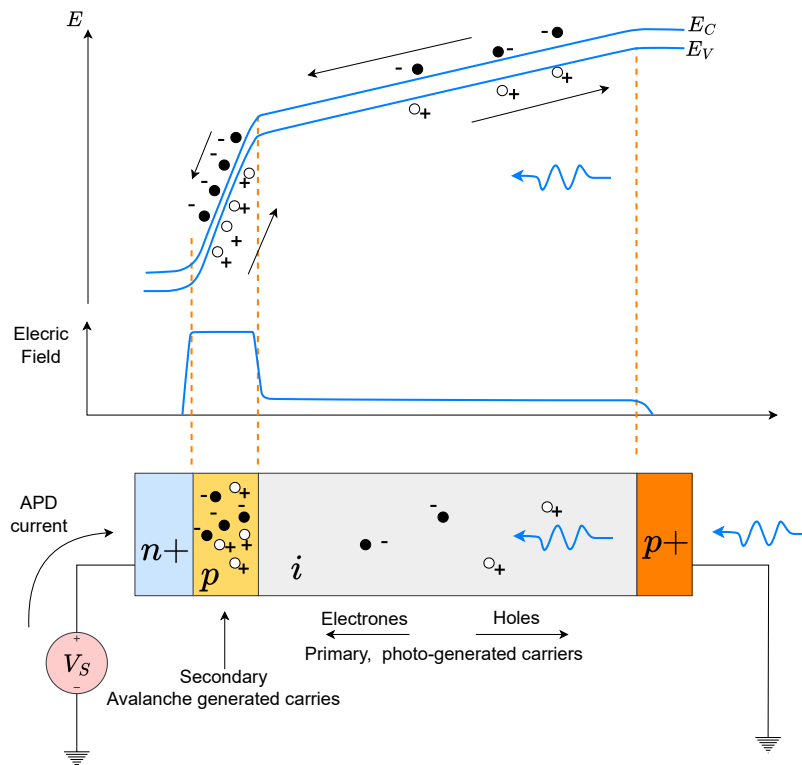


Figura 3.14: Estructura APD *Reach-Through*, Bandas de Energía y Campo Eléctrico. [5, p. 162]

La estructura consiste en 2 regiones altamente dopadas $n+$ $p+$, tiene una zona intrínseca en medio y una zona p, cuando el diodo es polarizado inversamente. La caída de voltaje se presenta principalmente en la unión $n+$ p generando un campo eléctrico mayor en la zona p.

Los fotones entran por la zona $p+$, pero la mayoría la atraviesan sin ser absorbidos, la absorción se produce cuando el fotón llega a la zona intrínseca y produce los pares electrón-

hueco libres primarios, los electrones son atraídos a la zona p por el intenso campo eléctrico, al llegar a esta zona p, los electrones son acelerados provocando colisiones con otros electrones de valencia y liberando más electrones (secundarios), todas estas cargas generadas por el efecto avalancha forman la corriente del APD.

La ganancia de corriente de un APD está definida por M y depende del voltaje de polarización inverso. En la **ecuación 3.5** se muestra la relación de los voltajes y la ganancia.

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_{BR}}\right)^n} \quad (3.5)$$

M : Ganancia en corriente del APD.

V : Voltaje de polarización inversa.

V_{BR} : Voltaje de ruptura.

n : Parámetro empírico que varía entre 2 y 7.

Algunos voltajes típicos de ruptura en diodos construidos con InGaAs son de 30 V a 100 V con ganancia entre 10 y 30. Es posible alcanzar ganancias de 100 o mayores con APDs de silicio, pero el voltaje de ruptura es muy alto, y no tiene aplicación para las comunicaciones ópticas.

El APD tiene una zona óptima de funcionamiento, después de esa zona la ganancia se atenúa rápidamente por el exceso de ruido.

La **Figura 3.15** muestra la ganancia de M y el SNR respecto al voltaje. El voltaje óptimo se encuentra poco antes del voltaje de ruptura, si se polariza con un voltaje mayor, la sensibilidad del receptor se deteriora.

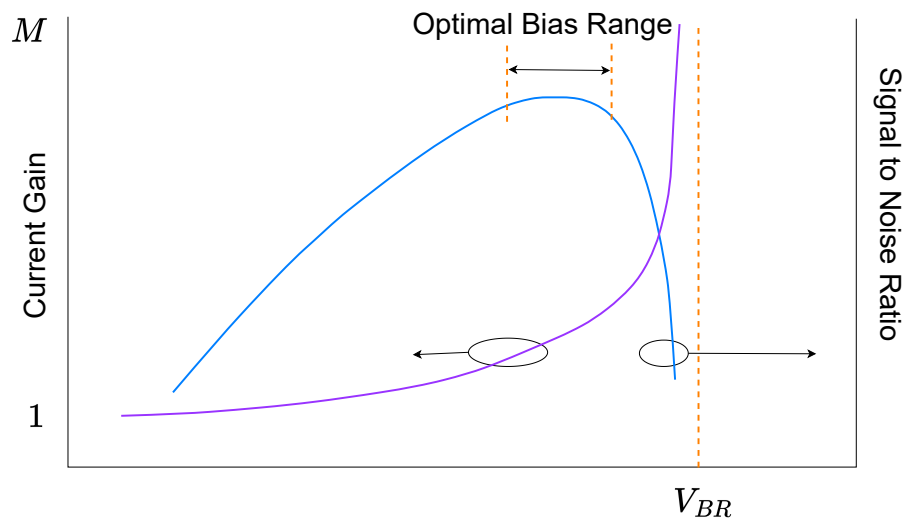


Figura 3.15: SNR y Ganancia en corriente Vs Voltaje inverso. [5, p. 165]

También se debe notar que la ganancia del APD disminuye con la temperatura. Debido a la vibración térmica los portadores son separados más frecuentemente y no alcanza la suficiente velocidad para iniciar la ionización secundaria. Como resultado, el voltaje de ruptura generalmente incrementa con la temperatura.

$$V_{BR}(T) = V_{BR}(T_0) + K_{BR}(T - T_0) \quad (3.6)$$

T, T_0 : Temperatura.

$V_{BR}(T), V_{BR}(T_0)$: Voltaje de ruptura en función de la temperatura.

K_{BR} : Coeficiente de temperatura del voltaje de ruptura $V/^\circ C$.

Un factor importante es la saturación de ganancia en el APD, cuando la potencia óptica incrementa, la ganancia en corriente diferencial disminuye, este comportamiento se debe al efecto pantalla en los portadores libres de alta concentración.

3.5.1. Estructura del APD

La estructura de un APD es parecida a la del diodo PIN. La **Figura 3.16** muestra la estructura de un APD InGaAs, se observa que tiene una zona P extra entre la zona intrínseca y la zona $n+$. Cuando el APD es polarizado inversamente, la principal caída de voltaje es en la unión P $n+$, debido al alto dopado de la zona $n+$.

Los fotones atraviesan la zona P de entrada hasta la zona intrínseca donde son absorbidos y se generan las cargas primarias, las cuales se mueven hacia la unión P $n+$ y por el alto campo eléctrico, estas cargas son aceleradas y al chocar con otros átomos generan más cargas libres (multiplicación avalancha).

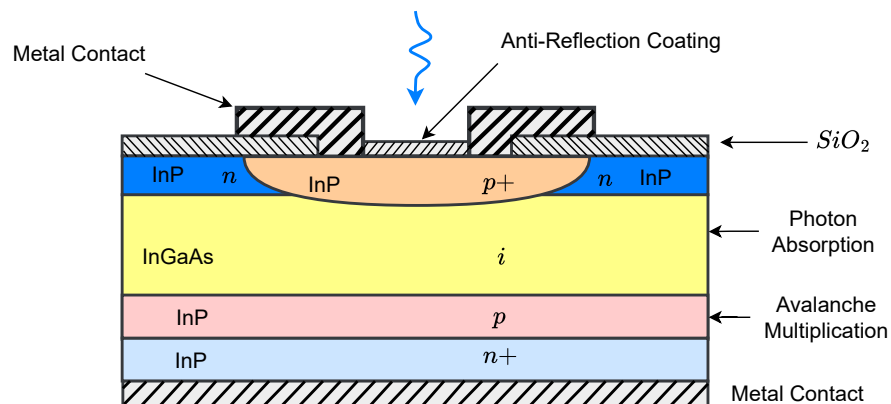


Figura 3.16: Estructura de un APD InGaAs. [5, p. 173]

3.6. Materiales de los Fotodetectores

La responsividad de un detector de luz está en función del material y de la longitud de onda. Esta dependencia puede estar caracterizada por la eficiencia cuántica η .

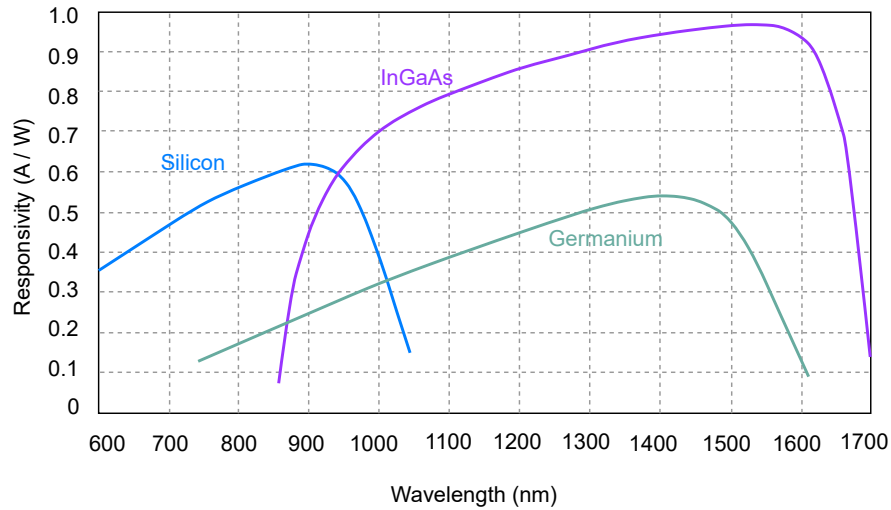


Figura 3.17: Curva de responsividad para silicio, InGaAs y Germanio.

La **Figura 3.17** muestra la responsividad de los semiconductores comúnmente usados en fotodetectores como una función de la longitud de onda. Se puede observar que la responsividad varía respecto a la longitud de onda y por cada material. Cuando la longitud de onda aumenta, la responsividad decrece rápidamente, debido a que los fotones ya no tienen la suficiente energía para liberar electrones, también si la longitud de onda decrece demasiado, la responsividad también disminuye debido a que incrementa la absorción.

	Wavelength range (nm)	Responsivity (A / W)	Dark current (nA)	Avalanche gain
Silicon	400-1100	0.4-0.6	0.1-10	20-400
Germanium	800-1600	0.4-0.5	50-500	50-200
InGaAs	1100-1700	0.7-1	0.5-50	10-50

Figura 3.18: Parámetros típicos para detectores de Silicio, Germanio y InGaAs.

3.7. Ruido en Fotodetectores

El ruido siempre acompaña a las señales y cuando la señal es amplificada también el ruido es amplificado. Existe ruido adicional que se suma a la señal y es debido a los dispositivos electrónicos. El SNR es un factor que nos proporciona la relación entre la señal-ruido y nos ayuda a caracterizar a un receptor. Para que una señal pueda ser detectada debe ser mayor que el ruido. Los ruidos adicionales son el Ruido *Shot* y el Ruido Térmico.

3.7.1. Ruido *Shot*

El ruido *shot* es debido a que la conversión fotón-electrón no es constante, sino que presenta ciertas fluctuaciones. Debido a la naturaleza aleatoria de las fluctuaciones de la corriente, el ruido shot debe ser caracterizado de manera estadística.

Para el diodo PIN el valor cuadrático medio del ruido *shot* está expresado por la siguiente ecuación.

$$\langle i_n^2 \rangle = 2eI_pB \quad (3.7)$$

i_n^2 : Ruido *shot*.

I_p : Foto Corriente.

e : Carga del electrón.

B : Ancho de Banda.

En la ecuación se puede observar que si se reduce el ancho de banda también se reduce el ruido.

La corriente que circula por el diodo PIN no sólo es la generada por los fotones. Para los fotodetectores la corriente de fuga es llamada *dark current*, porque existe una corriente pequeña cuando no hay potencia óptica presente. Agregando esta *dark current* al ruido *shot* tenemos:

$$\langle i_n^2 \rangle = 2e(I_p + I_D)B \quad (3.8)$$

I_D : *Dark Current*.

Para el APD el ruido *shot* queda descrito como:

$$\langle i_n^2 \rangle = 2e(I_p + I_D)BM^2F(M) \quad (3.9)$$

M : Ganancia del diodo avalancha.

$F(M)$: Factor de exceso de ruido

El factor $F(M)$ describe una naturaleza estadística de multiplicación en avalancha. La expresión $F(M)$ es dada como:

$$F(M) = M - (1 - k)M^3(M - 1)^2 \quad (3.10)$$

k : Razón del coeficiente de Ionización.

La **Figura 3.19** muestra un circuito equivalente para el análisis de ruido en un fotodetector.

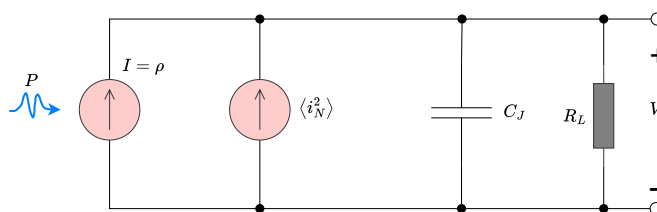


Figura 3.19: Modelo para el ruido *shot*. [5, p. 167]

En el circuito, el capacitor y la resistencia de carga forman un filtro pasa bajas.

3.7.2. Ruido Térmico

El ruido térmico, también es conocido como ruido Johnson y está asociado a los circuitos conectados al detector.

La fuente de este ruido es el movimiento térmico de los electrones en la resistencia de carga R_L . El valor cuadrático medio del ruido térmico en la resistencia de carga está dada por:

$$\langle i_T^2 \rangle = \frac{4kTB}{R_L} \quad (3.11)$$

i_T^2 : Valor Cuadrático medio del ruido térmico.

k : Constante de Boltzmann.

T : Temperatura absoluta.

B : Ancho de Banda.

R_L : Resistencia de Carga.

Se puede representar al ruido térmico como una fuente de corriente, el circuito equivalente se muestra en la **Figura 3.20**. Los circuitos receptores con un amplio ancho de banda son poco sensibles.

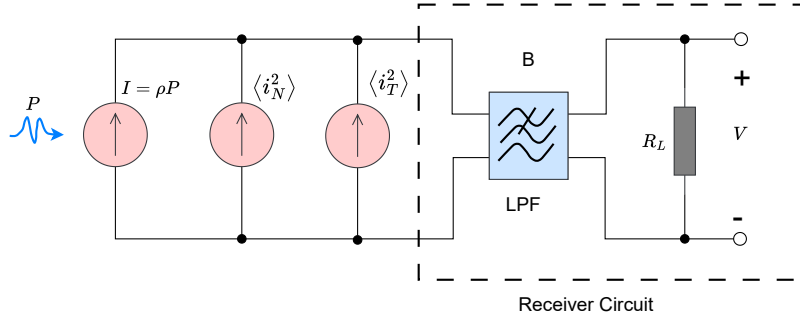


Figura 3.20: Circuito equivalente del ruido térmico y *shot*. [5, p. 168]

3.7.3. SNR

Una vez que se ha caracterizado el nivel de ruido a la entrada del receptor es posible analizar el SNR. El SNR es un parámetro importante porque determina el desempeño del receptor. En los receptores digitales, el SNR puede estar relacionado con el **BER** (*bit error rate*).

La corriente de un detector está dada por:

$$I(t) = M \frac{e\eta}{hf} P(t) \quad (3.12)$$

$P(t)$: Potencia Óptica.

La potencia eléctrica está dada por:

$$P_E(t) = R_L I(t)^2 = R_L M^2 \left(\frac{e\eta}{hf} \right)^2 P(t)^2 \quad (3.13)$$

$P_E(t)$: Potencia Eléctrica.

La potencia del ruido total en la carga, considerando al ruido térmico y *shot*, está expresada por:

$$P_N = [\langle i_N^2 \rangle + \langle i_T^2 \rangle] R_L = 2e \left(\frac{e\eta}{hf} P(t) + I_D \right) B M^2 F(M) R_L + 4kTB \quad (3.14)$$

De las ecuaciones **3.13** y **3.14** se define la **ecuación 3.15** del SNR.

$$SNR = \frac{P_E(t)}{P_N} \quad (3.15)$$

Capítulo 4

Fibras Ópticas

4.1. Introducción

La fibra óptica con baja pérdida (0.25 dB/km) ha hecho posible los grandes avances en las comunicaciones ópticas, logrando transmitir datos a grandes distancias sin necesidad de repetidores o amplificadores. En este capítulo se describen los detalles de dichas fibras ópticas.

Un factor muy importante en la fibra óptica es la degradación de la señal, la **Figura 4.1** muestra los diferentes tipos de degradaciones (Lineales y No lineales).

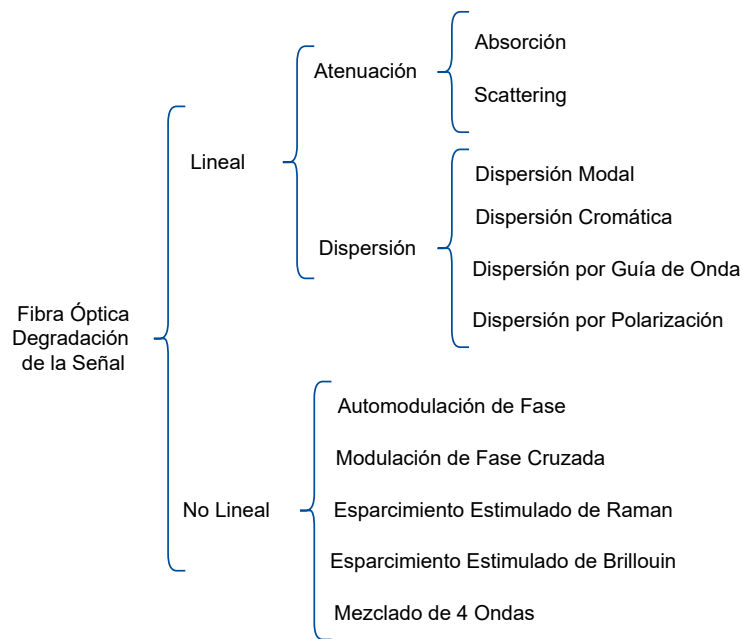


Figura 4.1: Tipos de pérdidas en la fibra óptica.

4.2. Características de la Fibra Óptica

Las ondas electromagnéticas se pueden transferir por medio de una guía de onda, la luz siendo una onda electromagnética se puede transferir por una guía de onda llamada fibra óptica. Existen 2 materiales principales con los que se fabrica la fibra óptica, estos son el plástico y el vidrio. La atenuación de la potencia óptica es mayor en la fibra de plástico que en la fibra de vidrio. Las fibras de plástico están hechas de polimetacrilato o poliestireno con una pérdida entre 100 y 1000 dB/km, pero es más robusta y fácil de fabricar, en cambio, la fibra de vidrio tiene una pérdida muy baja de 0.25 dB/km, pero no es tan robusta como el plástico, el material con el que se fabrica la fibra de vidrio es la sílice. El límite teórico en la fibra de vidrio es de 0.15 dB/km.

La fibra estándar es cilíndrica con diámetro muy pequeño del orden de unas decenas de micrómetros. La **Figura 4.2** muestra esta construcción básica.

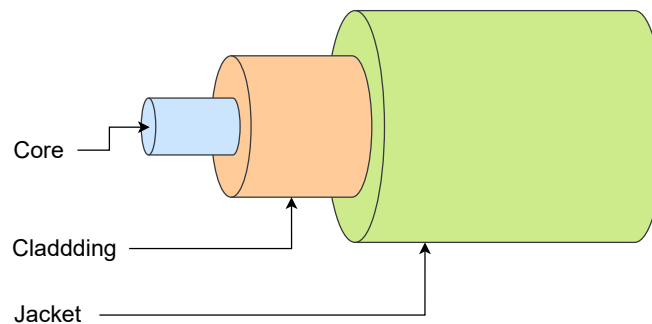


Figura 4.2: Construcción básica de la fibra óptica. [5, p. 128]

La estructura de la fibra consiste en 3 secciones principales, el centro de la estructura se llama *core* y es el área que lleva más energía. El *core* está rodeado por el *cladding*, ambos de material de vidrio, pero con diferente índice de refracción, el *core* tiene mayor índice de refracción que el *cladding*, con esta diferencia en los índices se logra el efecto de reflexión interna total y por tal motivo el rayo de luz puede viajar a través de la fibra óptica. El *cladding* está recubierto por el *jacket* el cual provee protección mecánica para el manejo de la fibra.

La **Figura 4.3** muestra algunos perfiles más comunes del índice de refracción entre el *core* y el *cladding*. Las dimensiones del *core* para la fibra *single mode* es usualmente de 9 μm , para la fibra multimode es de 50 μm y el *cladding* es de alrededor de 125 μm .

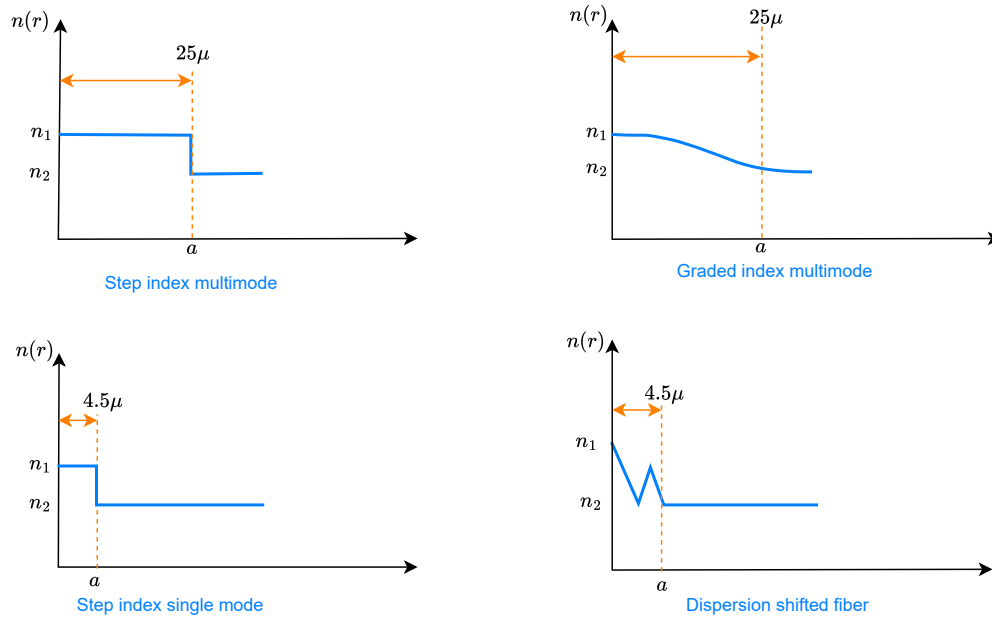


Figura 4.3: Perfiles para el índice de refracción. [5, p. 129]

La baja pérdida de señal en la fibra óptica fue la razón por la cual se desarrollaron las comunicaciones ópticas, pero esta pérdida está relacionada con la longitud de onda, las longitudes de onda utilizadas para las comunicaciones ópticas pueden ser separadas en longitud de onda corta entre 800 y 900 nm, y longitud de onda larga entre 1200 y 1600 nm. El rango de 1200 a 1600 nm puede ser dividido en bandas espectrales, la **Figura 4.4** muestra los diferentes rangos de bandas.

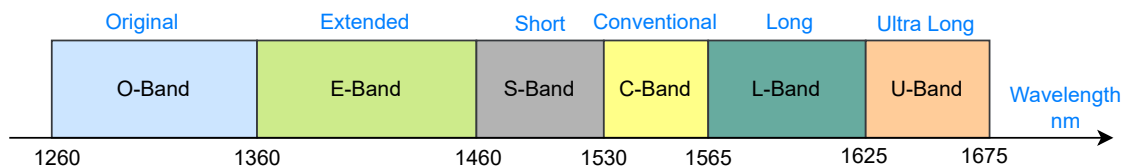


Figura 4.4: Designación de banda espectral de la longitud de onda larga. [5, p. 130]

4.3. Modos Guiados

Existen 2 modos para analizar el desplazamiento de la luz a través de la guía de onda, el modo en forma de rayo o en forma de onda. En este trabajo sólo se describe el modo en forma de rayo y el modo en forma de onda por el grado de complejidad sólo es mencionado. Los rayos se pueden considerar como un subgrupo de las ondas, donde la longitud de onda es

ceros y que estos rayos muestran el sentido de desplazamiento de la onda siendo perpendicular a la variación de la onda.

Los rayos de luz viajan dentro de la fibra óptica por varios kilómetros, y la reflexión interna total es el fenómeno que permite mantener la mayor cantidad de luz dentro del *core*. La **Figura 4.5** muestra una sección transversal de la fibra óptica, también se puede observar la trayectoria de los rayos de luz. Algo importante es mencionar que no es posible que el 100 % de la luz incida dentro de la fibra óptica, debido a que siempre existe una reflexión que se da en el mismo ángulo del rayo incidente.

El ángulo de incidencia y de reflexión está representado por ϕ . La **Ley de Snell** es la que relaciona el ángulo de incidencia con el ángulo de refracción, la **Ecuación 4.1** muestra esta relación.

$$n_0 \sin \phi = n_1 \sin \theta \quad (4.1)$$

n_0 : Índice de refracción del medio exterior.

n_1 : Índice de refracción del *core*.

ϕ : Ángulo de incidencia del rayo de luz.

θ : Ángulo de refracción.

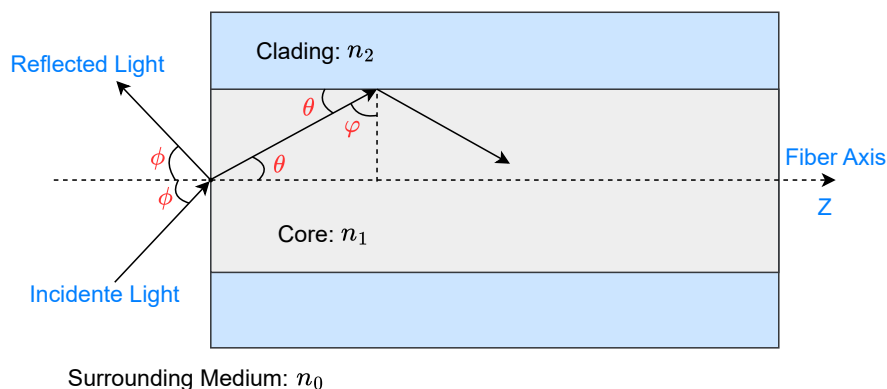


Figura 4.5: Rayos de luz dentro de la fibra óptica. [5, p. 132]

Existe un ángulo de incidencia mínimo y máximo, así como la apertura numérica, las siguientes fórmulas muestran estas relaciones.

$$\sin(\varphi_M) = \frac{n_2}{n_1} \quad (4.2)$$

$$\sin(\phi_M) = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \quad (4.3)$$

$$NA = n_0 \sin(\phi_M) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4.4)$$

φ_M : Ángulo mínimo de incidencia.

ϕ_M : Ángulo máximo de incidencia.

n_2 : Índice de refracción del *cladding*

n_1 : Índice de refracción del *core*.

n_0 : Índice de refracción del medio exterior.

NA : Apertura numérica (*Numerical aperture*).

Para fibra de vidrio, algunos valores típicos para los índices de refracción son: $n_1 = 1.48$ y $n_2 = 1.46$, se puede apreciar que los índices están muy cercanos ocasionando que el ángulo de aceptación sea muy pequeño.

4.4. Degradación de la Señal en Fibras Ópticas

Como se indicó en la sección anterior, las señales ópticas que viajan a través de la fibra experimentan una atenuación, estas pérdidas están separadas en lineales y no lineales.

4.4.1. Atenuación Lineal

La atenuación es la forma más común de degradación de la señal, normalmente está expresada en decibeles por kilómetro y la señal decreciente de manera exponencial respecto a la distancia recorrida en la fibra óptica. La siguiente fórmula describe la atenuación:

$$I(Z) = I_0 e^{-\alpha_F z} \quad (4.5)$$

I : Potencia de la señal.

I_0 : Potencia de la señal cuando la distancia es cero $z=0$.

α_F : Coeficiente de atenuación

z : longitud de la fibra óptica.

La ecuación de la atenuación se puede expresar en términos logarítmicos, teniendo en cuenta que $\ln(x) = 2.302 \log(x)$ la ecuación queda de la siguiente manera:

$$10 \log I(Z) = 10 \log(I_0) - 4.343 \alpha_F z \quad (4.6)$$

Definiendo $\alpha = 4.343 \alpha_F$, podemos expresar la ecuación en decibeles-miliwatt.

$$P_{dBm}(z) = P_{dBm}(0) - \alpha z \quad (4.7)$$

La **Figura 4.6** muestra la atenuación en decibeles por kilómetro con respecto a la longitud de onda, se observan 3 ventanas de las más usadas, la de 850 nm, 1310 nm y 1550 nm, cada una de las ventanas tiene diferentes aplicaciones, la ventana de 850 nm se utiliza para distancias cortas debido a la alta pérdida, y las ventanas de 1310 nm y 1550 nm se utilizan para largas distancias, ya que tienen pérdidas de 0.5 dB/km y 0.3 dB/km respectivamente, también se observa que se está evitando la ventana donde aparece un pico debido a las moléculas de agua que contiene la fibra, este pico es conocido como *water peak*.

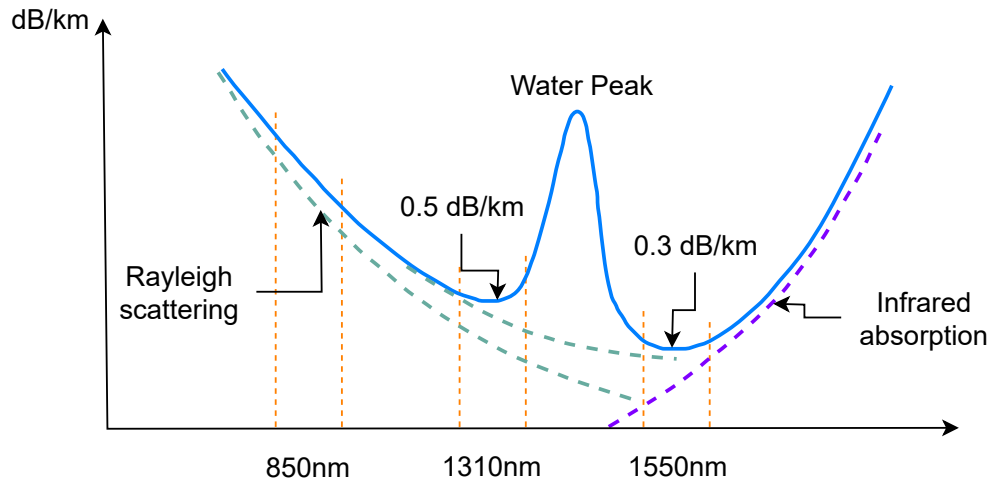


Figura 4.6: Atenuación vs. Longitud de Onda. [5, p. 136]

4.4.2. Atenuación Lineal por Absorción

La absorción se refiere a la disipación de energía óptica conforme la onda se propaga en la fibra óptica. Parte de la absorción es debido a los materiales con los que se construyen las fibras ópticas. Esta absorción puede ser atribuida a la interacción de los fotones con los átomos y moléculas del vidrio de la fibra, los fotones son absorbidos por los átomos y moléculas. Estas pérdidas son pequeñas comparadas con las pérdidas por *scattering*. Otra componente de la absorción es debido a las impurezas que se adquieren durante el proceso de fabricación de la fibra, estos materiales incluyen metales y moléculas de agua. El agua tiene un pico de absorción alrededor de los 1400 nm como se muestra en la **Figura 4.6**.

4.4.3. Atenuación Lineal por *Scattering*

En la longitud de onda más corta, quien domina la atenuación es el *scattering*, este fenómeno también es conocido como *Rayleigh scattering* y es el responsable del color azul del cielo. El *scattering* es cuando los rayos de luz pegan en una molécula y se divide en varios rayos que sale en diferentes direcciones. Cuando el rayo de luz viaja en una fibra óptica, encuentra variaciones en el índice de refracción del material y otras imperfecciones que hacen que el rayo de luz se atenúe, este tipo de atenuación se da principalmente en la ventana óptica por debajo de los 1000 nm. En la **Figura 4.7** se observa como el rayo de luz se divide y cambia su dirección al chocar con una partícula contaminante de la fibra.

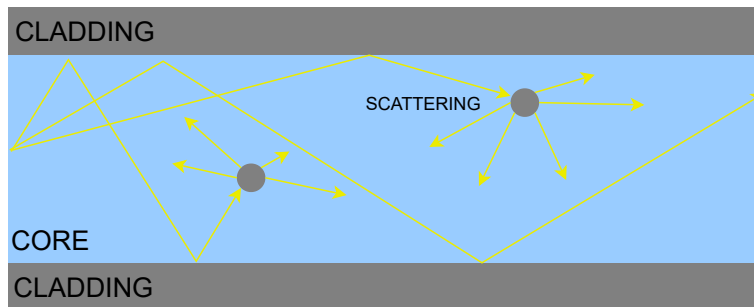


Figura 4.7: Separación de los rayos (*scattering*) por imperfecciones en la fibra óptica

4.4.4. Degradación Lineal de la señal por Dispersión

Un factor importante que limita los enlaces ópticos, principalmente a una tasa alta de datos; es la dispersión. La dispersión se refiere al ensanchamiento de los pulsos a medida que viajan a lo largo de la fibra óptica. En la **Figura 4.8** se observa cómo inicia un dato digital y cómo cada vez que recorre cierta distancia sobre la fibra se va ensanchando hasta que después de un largo recorrido los datos digitales quedan completamente irreconocibles.

A velocidades bajas en la transmisión de datos, la dispersión no presenta problemas ya que el espacio entre bits es muy grande, pero para velocidades de datos muy altas donde la separación de los datos es muy corta, la dispersión toma mucha importancia.

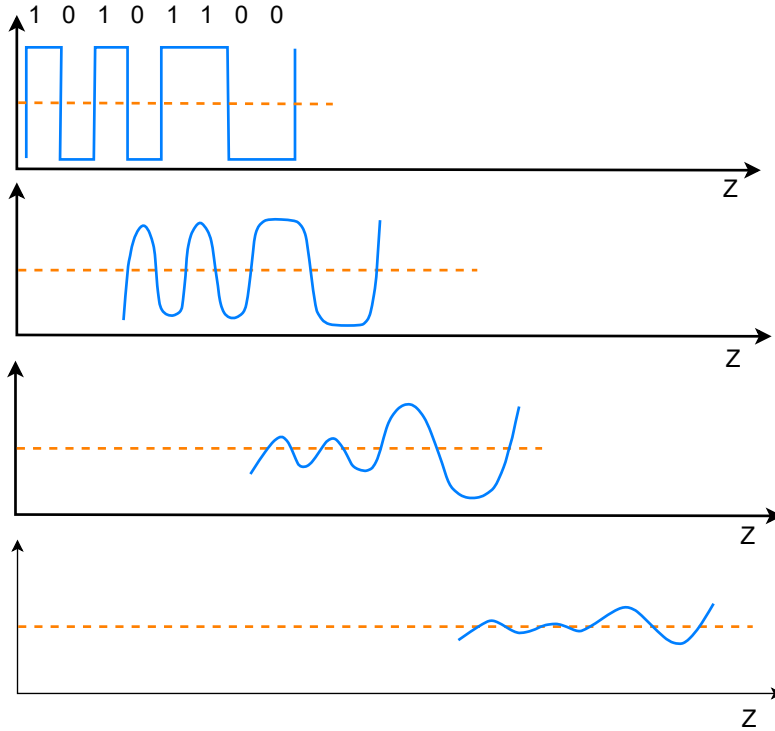


Figura 4.8: Dispersión de unos pulsos a través de la distancia. [5, p. 138]

4.4.5. Degradación Lineal de la señal por Dispersión Modal

La dispersión modal afecta principalmente a la fibra multimodo, para describir este fenómeno se utilizará la teoría de rayos de luz, la cual da una buena aproximación sobre el comportamiento de la dispersión modal. Un pulso de luz cuando entra a la fibra óptica entra en diferentes ángulos, lo cual hace que cada rayo de luz haga un recorrido de distancia diferente durante su trayectoria dentro de la fibra. El rayo de luz que hace un recorrido menor, llegara primero y el que hace un recorrido mayor llegara un tiempo después, al sumarse los efectos se producirá el ensanchamiento del pulso.

La **Figura 4.9** muestra como ejemplo sólo a tres rayos de luz S_1 , S_2 , S_3 , se puede observar cómo el rayo de luz S_1 hace un recorrido menor, ya que rebota muy pocas veces dentro de la fibra óptica, en caso contrario, el rayo S_3 recorre mayor distancia porque va rebotando más veces dentro de la fibra. Al ir sumando los efectos en diferentes puntos se puede observar cómo entre más distancia mayor es la dispersión modal. En este tipo de fibra multimodo *step index* la velocidad de los rayos de luz es la misma en todo el núcleo, es por este motivo que sólo la distancia influye en el tiempo que tarda el rayo en llegar al punto de evaluación.

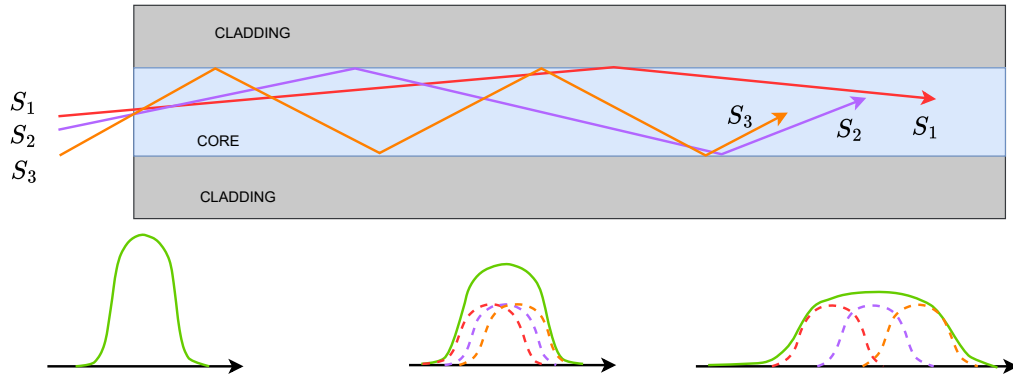


Figura 4.9: Dispersión modal en una fibra multimodo *step index*. [5, p. 139]

En la fibra de índice gradual (*graded index*) la dispersión modal afecta muy poco ya que los rayos de luz que recorren mayor distancia viajan a mayor velocidad, y los rayos que recorren menor distancia tienen menor velocidad, todo esto debido a las variaciones del índice de refracción en el núcleo de la fibra. Al tener distancias y velocidades diferentes, los rayos de luz llegan casi al mismo tiempo, sólo con ligeras variaciones que no representan ningún problema en el ensanchamiento del pulso.

La **Figura 4.10** muestra cómo el rayo S_1 a pesar de que tiene un recorrido mayor, también tiene mayor velocidad, ya que el índice de refracción en las fronteras del *core-cladding* es menor y los rayos de luz adquieren mayor velocidad cuando pasan por dichas fronteras. En otro caso, el rayo S_3 viaja menor distancia, pero tiene menor velocidad porque en el centro del núcleo de la fibra el índice de refracción es mayor y esto hace que el rayo viaje más lento. Al sumar los efectos de velocidades y distancias, hacen que los tiempos o retardos de los rayos sean iguales y esto hace que la señal no se disperse.

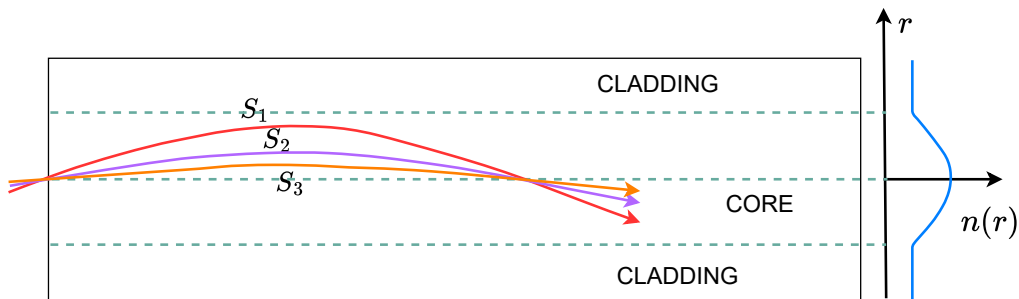


Figura 4.10: Dispersión modal en una fibra *graded index*. [5, p. 140]

4.4.6. Degradación Lineal de la señal por Dispersión Cromática

Un concepto que hay que tener en mente es que el índice de refracción está en función de la frecuencia y otro concepto es que una señal óptica no tiene un espectro infinitamente angosto y que su energía consiste en un rango de frecuencias ópticas.

Cuando el grupo de frecuencias viaja a través de la fibra óptica, cada frecuencia experimenta un índice de refracción diferente y por tal motivo viajan a diferentes velocidades, estas variaciones de velocidad provocan que el pulso se vaya ensanchando a medida que viaja dentro de la fibra óptica.

La dispersión cromática afecta a la fibra *multi-mode* y a la fibra *single-mode*, en la fibra *multi-mode* la dispersión modal y cromática están presentes, pero predomina la dispersión modal. En la fibra *single-mode* no existe la dispersión modal, pero sí está presente la dispersión cromática.

La **Figura 4.11** muestra como ejemplo sólo 2 frecuencias que entran a la fibra óptica y se ve cómo después de cierta distancia las señales ya tienen un retardo de tiempo, ya que cada una de las frecuencias viaja a diferente velocidad. Al sumar las señales junto con sus retardos nos da como resultado un pulso de luz ensanchado.

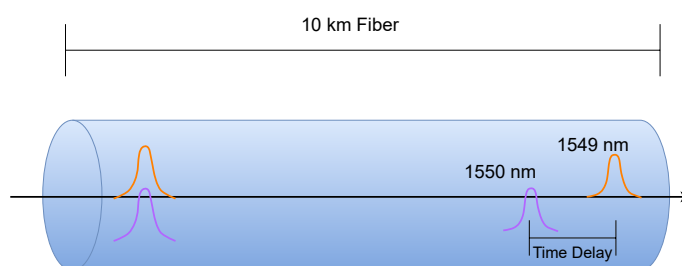


Figura 4.11: Dispersión Cromática en una fibra óptica *single-mode*. [7, p. 140]

4.4.7. Degradación lineal de la señal por Dispersión de Guía de Onda

La dispersión por guía de onda es parecida a la dispersión cromática, en ambos casos se debe a que el ancho espectral de la luz no es cero, esto quiere decir que cuando un pulso de luz entra en la fibra óptica, lo hace con varias componentes en diferentes frecuencias. La característica principal de la dispersión por guía de onda es que el retardo de la señal es debido a que algunas señales ópticas viajan por el *cladding*. Dado que este tiene un índice de refracción diferente al *core* produce que las señales viajen más rápido por el *cladding* y más lentas por el *core* y al sumarse las señales con sus retardos se produce el ensanchamiento del pulso óptico.

Este tipo de dispersión por guía de onda ocurre en las fibras *single-mode*, aunque los efectos de la dispersión por guía de onda son muy pequeños en algunos casos especiales, llegan a ser importantes.

4.4.8. Degradación lineal de la señal por dispersión por modo de polarización

Primeramente, se debe entender el concepto de birrefringencia: la **birrefringencia** es debida al cambio en el índice de refracción en el núcleo de la fibra óptica, estos cambios son de forma aleatoria y son definidos por la distancia y el tiempo, al perder simetría el índice de refracción en el núcleo debido a cambios moleculares se produce un retardo en las ondas ortogonales. La birrefringencia y los cambios del índice de refracción son generados también por temperatura, algunos dobleces y estrés en la fibra.

El efecto de dispersión por modo de polarización ocasiona ensanchamiento de los pulsos de luz, cuando la luz entra a la fibra lo hace en forma de 2 vectores ortogonales (dos componentes de polarización), cada componente experimenta diferente velocidad dentro de la fibra debido a la birrefringencia, después de cierta distancia las componentes de polarización sufren un retardo.

La **Figura 4.12** muestra cómo entran las dos componentes polarizadas de luz a la fibra, se puede observar que entran iguales sin ningún retardo y al pasar por el núcleo de la fibra, después de cierta distancia, se produce un retardo y las dos componentes ópticas al ser sumadas darán como resultado un pulso de luz ensanchado.

Normalmente, este fenómeno de dispersión por modo de polarización ocurre para transmisiones por arriba de los 10 Gbps.

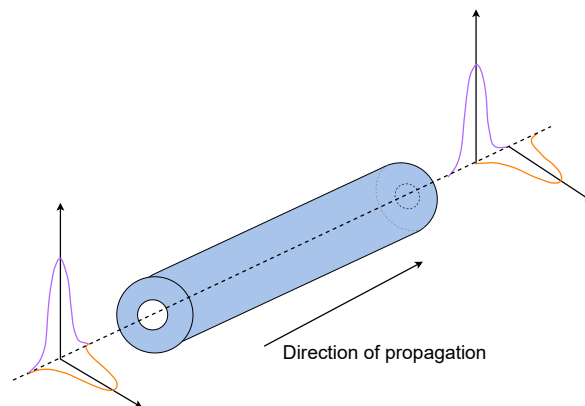


Figura 4.12: Dispersión por modo de polarización. [5, p. 143]

4.4.9. Degradación No Lineal de la señal

La degradación de la señal por no linealidades de la fibra queda categorizada en 5 fenómenos.

1. Automodulación de fase.
2. Modulación de fase cruzada.
3. Esparcimiento estimulado de Raman.
4. Esparcimiento estimulado de Brillouin.
5. Mezclado de 4 ondas.

Estos fenómenos sólo se presentan a potencias ópticas muy altas y su impacto en la degradación de la señal es mínimo, por tal motivo en este documento sólo se mencionarán, pero no se estudian los detalles.

Capítulo 5

Transmisores Ópticos

5.1. Introducción

Un transmisor óptico es como una interfaz entre el dominio eléctrico y el dominio óptico, ya que convierte las señales eléctricas en señales ópticas. Existen varios transmisores ópticos o moduladores ópticos en el mercado, de los más utilizados se encuentran los SFP, los QPMZ y los **HB-CDM** (*High Bandwidth Coherent Driver Modulator*) y el más antiguo, el **TOSA** (*Transmitter Optical Sub-Assembly*).

Cada uno de los dispositivos mostrados en la **Figura 5.1** tiene diferente velocidad y alcance en la transmisión de datos. El TOSA inicialmente se soldaba en una **PCB** (*Print Circuit Board*) y era visible en el ensamble, y sólo podía alcanzar velocidades de 10 Gbps, posteriormente surgieron los SFP que ya tenían al TOSA integrado dentro de su empaque metálico y con velocidades de hasta 400 Gbps, se puede decir que el TOSA es la base de los SFP. El QPMZ es un modulador externo con mayor capacidad y alcance que los CFP, este puede transmitir datos de hasta 800 Gbps y son usados para largas distancias en las redes *core long haul*. El dispositivo más actual es el HB-CDM que contiene internamente a un QPMZ y los drivers eléctricos de **RF** (*Radio Frequency*), este CDM puede alcanzar velocidades de hasta 1.2 Tbps y es uno de los más usados en el 2023 en los ensambles de módems ópticos.

En este trabajo se explicará con detalle el TOSA, por ser un elemento muy común en el contexto de manufactura en el que laboro.

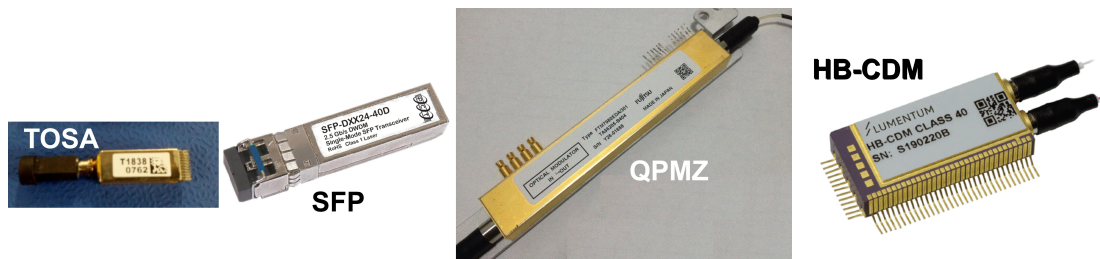


Figura 5.1: Diferentes tipos de transmisores, TOSA, SFP, QPMZ, HB-CDM.

5.2. TOSA

Una de las funciones de un sub-ensamble óptico es proporcionar una plataforma mecánica estable para el láser, ya que el láser semiconductor es muy pequeño de algunos cientos de micrómetros y muy sensible.

Para acoplar la luz generada por el láser con la fibra óptica se utilizan unas lentes como lo muestra la **Figura 5.2**. El TOSA tiene internamente diodos monitores, enfriadores **TEC** (*ThermoElectric Cooler*) y moduladores externos, también es necesario colocar un aislador óptico como requisito para los láseres DFB, porque este tipo de láser es muy sensible a la pérdida por retorno óptico.

El TOSA, tiene un sellado hermético, esto es necesario para proteger al láser de los factores ambientales tales como la humedad.

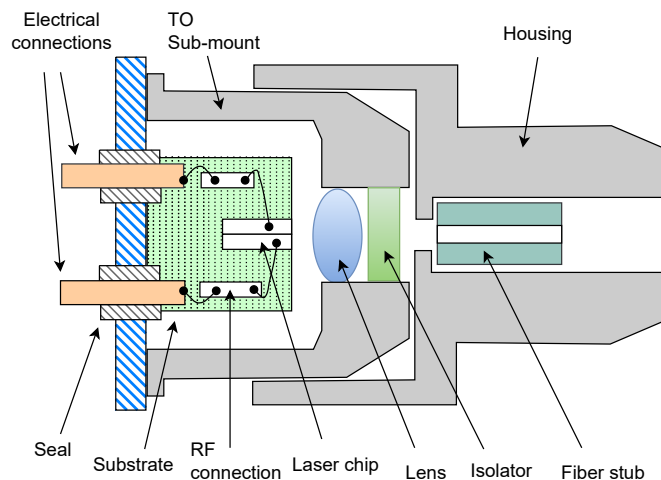


Figura 5.2: Estructura básica del TOSA. [5, p. 200]

5.2.1. Polarización del Láser: La Curva Básica Luz-Corriente LI

Desde una perspectiva eléctrica, un láser semiconductor es un diodo y para generar luz debe de ser polarizado directamente. Para encender el láser sólo es necesario conectarlo a una fuente de corriente. La **Figura 5.3** muestra una curva LI estándar de un láser común que contiene la región por debajo del umbral, la región lineal y la región de saturación. El láser normalmente es polarizado en la región lineal.

El circuito mostrado es una fuente de corriente controlada por voltaje. En la entrada del circuito se tiene 2 secciones, una es una polarización fija y la otra es una señal moduladora. Estas señales vienen de un **DAC** (*Digital Analog Converter*) debido a que las señales deben ser precisas para la polarización y con su control digital se logra dicha precisión. El rango útil de polarización para el láser es la zona lineal que se observa en la curva, la cual se encuentra arriba de la corriente de umbral y por debajo de la saturación.

Si el láser es polarizado cerca de la corriente de umbral, emisiones espontáneas comenzarán a dominar y las características espectrales del láser empezarán a deteriorarse. Si el láser es polarizado cerca de la región de saturación, cualquier cambio en la temperatura podrá causar una degradación en la potencia.

La corriente de polarización se puede pensar como una corriente de **DC** (*Direct Current*) que fija el punto de operación. La corriente de modulación corresponde a la variación alrededor del punto de operación que proviene de la señal de información.

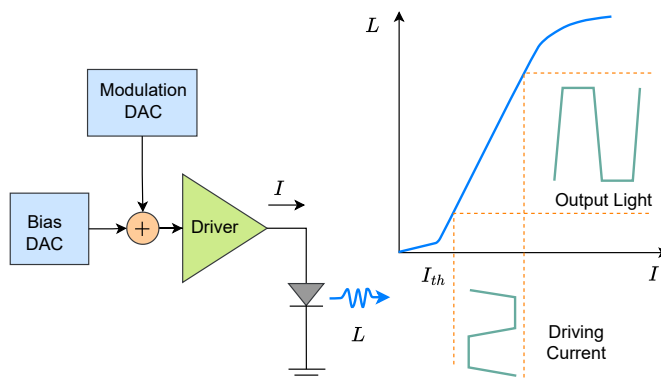


Figura 5.3: *Driver* del láser y Curva LI. [5, p. 202]

Los voltajes de polarización son controlados igualmente por un DAC, el cual proporciona una mayor precisión. Dicho DAC tiene una resolución finita, por tal motivo es necesario saber la relación existente entre el DAC y la corriente de salida.

5.2.2. Esquemas de Modulación

Mantener una potencia constante promedio es sólo un requisito que el transmisor debe cumplir. Otro parámetro crítico en un transmisor óptico es la profundidad de la modulación (*Depth Modulation*) o la relación de extinción (*extinction ratio*).

Toda información para ser transmitida requiere de una modulación de alguna forma de energía y en los transmisores ópticos la luz es la que debe modularse.

La forma más simple de modulación es la modulación directa. El diodo láser puede ser fácilmente modulado cambiando el flujo de la corriente que circula por él, la modulación directa puede ser adecuada para muchas aplicaciones con *data rates* por debajo de 10 Gbps. El método usado para modular la corriente depende de la aplicación y del *data rate*. La integridad de la señal no es crítica con *data rates* bajos.

5.2.3. Circuito, Driver Básico

El circuito básico es un driver diferencial. En un esquema de modulación directa, el driver diferencial es directamente conectado al diodo láser. En un modulador externo, el driver diferencial controla a un modulador por separado.

El diseño está basado en una fuente de corriente, dicha fuente de corriente puede ser alternada por el par diferencial entre las 2 ramas que se muestran en los colectores de los transistores.

El par diferencial es controlado por la señal diferencial de datos. Un 1 lógico conduce de un lado y un 0 lógico conduce del otro lado. El láser es conectado al colector de uno de los transistores, el otro transistor está conectado a una carga *dummy* con características parecidas al láser, la carga *dummy* está en el rango de 10 a 20 Ohms.

Adicionalmente, el modulador diferencial muestra una rama de DC para polarizar el diodo láser. La fuente de corriente es necesaria para asegurar que el diodo láser se encuentre por arriba de la corriente de umbral incluso durante el estado de 0 lógico. La razón es que toma más tiempo encender el láser desde un estado completamente apagado y es más fácil si el láser se encuentra por arriba de la corriente de umbral. Además, las características espectrales del láser por debajo de la zona de umbral no es adecuada para la transmisión de datos a alta velocidad.

La rama de DC debe estar aislada de la rama de modulación **AC** (*Alternating Current*) por un elemento que muestre baja impedancia a la señal de DC y alta impedancia a la señal de AC, esto es para asegurar que la señal de modulación pase a través del diodo láser y no a través de la rama de polarización, esto se hace por medio de un inductor. La **Figura 5.4** muestra los detalles de este circuito.

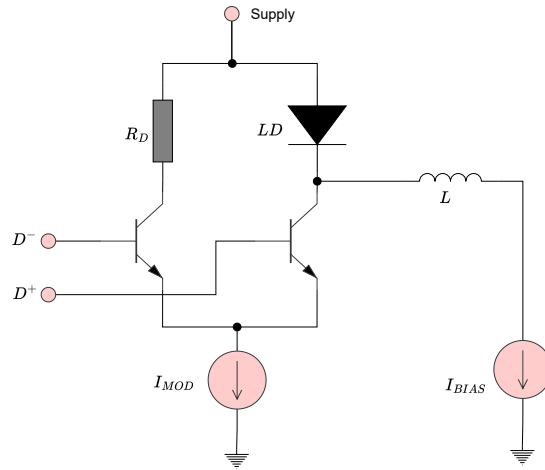


Figura 5.4: Fuente de corriente para polarizar a un diodo Láser. [5, p. 210]

R_D : Resistencia *Dummy* 10 a 20 ohms.

LD : Diodo Láser.

L : Inductor separador de DC-AC.

5.2.4. Modulador Externo y Estabilización Espectral

La modulación directa puede funcionar para velocidades por debajo de los 10 Gbps, pero para velocidades más altas la modulación directa no es efectiva, la razón es que la corriente de modulación del láser causa una modulación en la frecuencia o *chirping* que a su vez provoca un ensanchamiento espectral de luz y también incrementa la dispersión. La modulación externa, en cambio, remueve la frecuencia *chirping*, debido a que la fuente de luz es continua **CW** (*Continuous Wave*) y el láser está polarizado con DC por arriba de la corriente de umbral.

La **Figura 5.5** muestra un esquema típico de un modulador externo. La luz es generada por un láser que es alimentado por DC proporcionando una longitud de onda continua CW. El circuito que controla al modulador externo debe estar diseñado especialmente para altas frecuencias, teniendo en cuenta los parásitos generados y las impedancias.

El módulo **EAM** (*Electro-Absorption Modulator*) se encarga de hacer la modulación, variando la potencia óptica de salida respecto a la entrada eléctrica que viene del driver. Este módulo EAM convierte los datos del dominio eléctrico al dominio óptico, en este caso la luz del láser actúa como la portadora. Este es un tipo de modulación externa, ya que no se varía la potencia óptica del láser, esta se mantiene fija y la variación de potencia se realiza en el EAM.

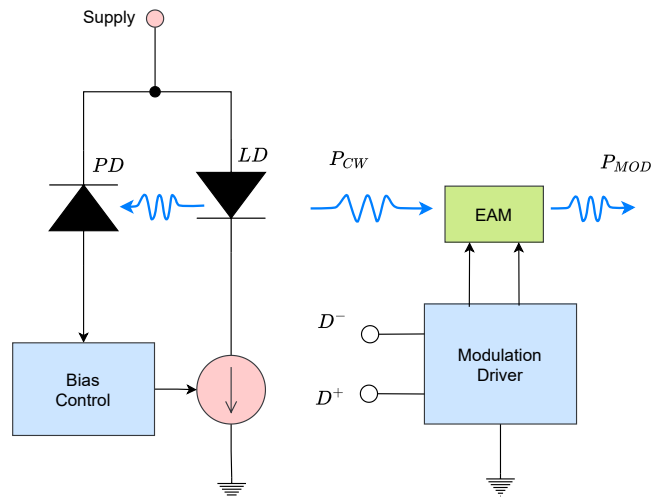


Figura 5.5: Modulador Externo. [5, p. 220]

Otro aspecto a cuidar es la temperatura, la cual puede cambiar la longitud de onda y mover el centro o referencia del canal, produciendo *crosstalk* y superposición. El control de la temperatura normalmente es controlado por el TEC. En un TEC la dirección de la corriente determina el flujo del calor. En un circuito de control de temperatura se puede hacer un sensor y un *loop* de retroalimentación para monitorear el error entre el valor deseado, el valor medido por el sensor y hacer el ajuste correspondiente cambiando la corriente en el TEC y ponerlos en función de enfriar (*cooler*) o calentar (*Heater*).

Normalmente, el láser viene ajustado para estar en una zona fría, con esto el TEC estará funcionando como calentador y rara vez como enfriador.

El sensor de temperatura normalmente ya lo traen dentro los subensambles ópticos. La longitud de onda es muy sensible a la temperatura, por tal motivo el control de temperatura debe ser muy preciso.

5.2.5. TOSA, aplicación en la industria de las comunicaciones ópticas

Como se mencionó al inicio de este capítulo, el TOSA es un transmisor óptico que contiene el modulador óptico. En la práctica, un dispositivo TOSA puede tener 4 moduladores, esto significa que dentro del dispositivo hay 4 láseres, 4 TEC, 4 monitores de potencia y 4 EAM, cada láser sintonizado a diferente longitud de onda y multiplexados para viajar dentro de la misma fibra óptica.

Por ejemplo, en el TOSA del proveedor JDSU las longitudes de onda para los 4 canales son de: 1295.56 nm, 1300.05 nm, 1304.55 nm y 1309.14 nm de acuerdo a la hoja de datos.

En la **Figura 5.6** se observa cómo es físicamente el modulador TOSA, cómo es su estructura metálica y cómo están sus pines de conexión. Igualmente se observa cómo están conectados los elementos internos a los pines del dispositivo: se pueden ver los láseres, monitores y EAM conectados a cada pin y se especifica a qué canal corresponde cada uno. La temperatura ideal para los láseres que se encuentran dentro de la estructura metálica es de 35°C y máximo 48°C.

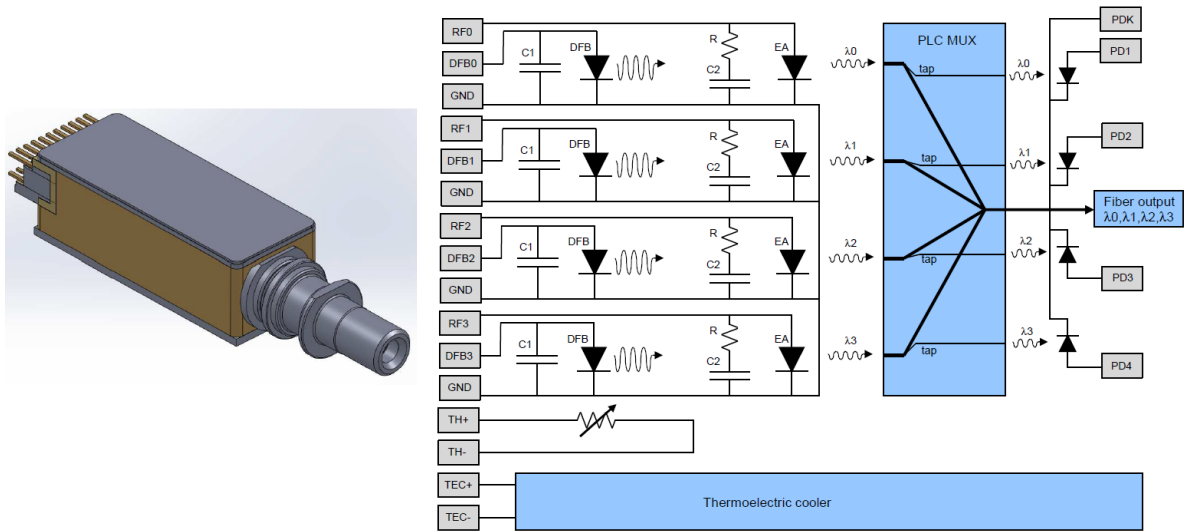


Figura 5.6: TOSA, transmisor modulador con 4 longitudes de onda. [8]

Capítulo 6

Receptores Ópticos

6.1. Introducción

En este capítulo se describe el receptor **ROSA** (*Receiver Optical SubAssembly*) y las etapas internas que lo componen como lo son: el amplificador de transimpedancia **TIA** (*TransImpedance Amplifier*), el amplificador limitador **LIA** (*Limiting Amplifier*) y el *Clock Recovery*. Cada una de las etapas es representada mediante diagrama a bloques.

6.2. ROSA

La función de un receptor óptico es la de detectar una señal óptica y convertirla a una señal eléctrica con una aceptable amplitud para uso de otros dispositivos de tratamiento de señales. Las señales, al viajar por la fibra óptica, se atenúan y se distorsionan, parte de la tarea del receptor óptico es corregir estos cambios en la señal.

En un receptor óptico, la etapa de entrada del receptor suele ser un subensamble que se le conoce como ROSA.

Los dispositivos que comúnmente se utilizan para la recepción óptica son los diodos PIN o APD, en este trabajo se usa un dispositivo ROSA, el cual tiene diodos PIN que funcionan con un voltaje menor y son más económicos que los diodos APD.

El primer bloque de un receptor son los detectores ópticos que pueden ser los diodos PIN o APD que son polarizados de manera inversa y tienen una corriente de fuga muy pequeña, este tipo de diodos funcionan como una fuente de corriente controlada por luz, la corriente de salida de los diodos es muy pequeña del orden de los μA (*Microampere*).

El receptor de forma general consta de 3 etapas después del diodo PIN:

1. Amplificador de Transimpedancia TIA.

2. Amplificador limitador LIA.
3. *Data Clock Recovery*.

6.2.1. Amplificador de Transimpedancia TIA

El diodo PIN, para que funcione, debe ser polarizado inversamente, ya que la conversión de luz a corriente la hace en la unión PN (Zona Intrínseca) y entre más grande sea la zona intrínseca mejor es la conversión de luz a corriente.

Posterior al diodo PIN se encuentra el amplificador de transimpedancia el cual convierte la corriente a voltaje con una alta ganancia, seguido de un amplificador con salida diferencial. Para poder mantener una señal de salida con una amplitud que pueda ser usada por otros dispositivos como ASIC o FPGA es necesario cuidar el rango dinámico de la señal, que es la diferencia entre la potencia máxima y la potencia mínima que puede registrar el receptor.

Un ejemplo de rango dinámico de 30 dB para una salida con voltaje máximo de 2 V significa que esa misma salida puede dar 2 mV. El rango dinámico y la ganancia son diferentes, ya que en la ganancia si se presenta una señal grande a la entrada, esta va a ser amplificada y podría llegar a la saturación, y cuando amplifique una señal pequeña la salida será dentro del rango aceptable, cosa que no sucede con la entrada de gran señal, la ganancia por sí sola no puede cambiar el rango dinámico.

Para poder cambiar el rango dinámico es necesario usar un *loop* de control llamado **AGC** (*Automatic Gain Control*), este control mejora el desempeño del rango dinámico. Este tipo de circuitos son implementados con un *loop* de retroalimentación. La **Figura 6.1** muestra el control de rango dinámico, así como los bloques que lo conforman, donde A es el amplificador de transimpedancia y G es el amplificador diferencial.

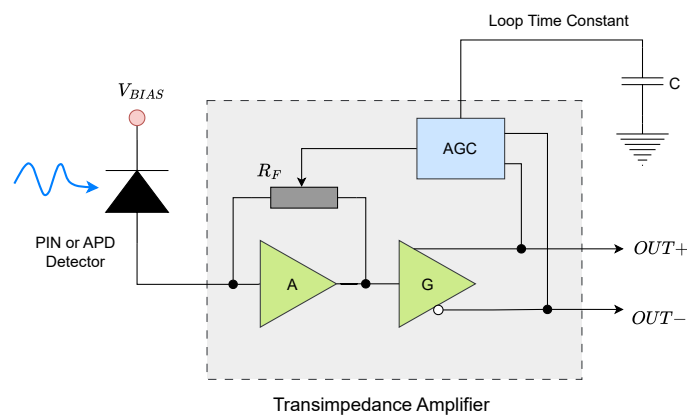


Figura 6.1: Amplificador de TransImpedancia. [5, p. 236]

La **Figura 6.2** muestra los resultados de un AGC *loop*, donde se puede observar cómo la ganancia es controlada para tener una señal de salida aceptable, es decir que no se sature para una señal grande de entrada, pero que tampoco caiga a niveles bajos para una señal de entrada pequeña.

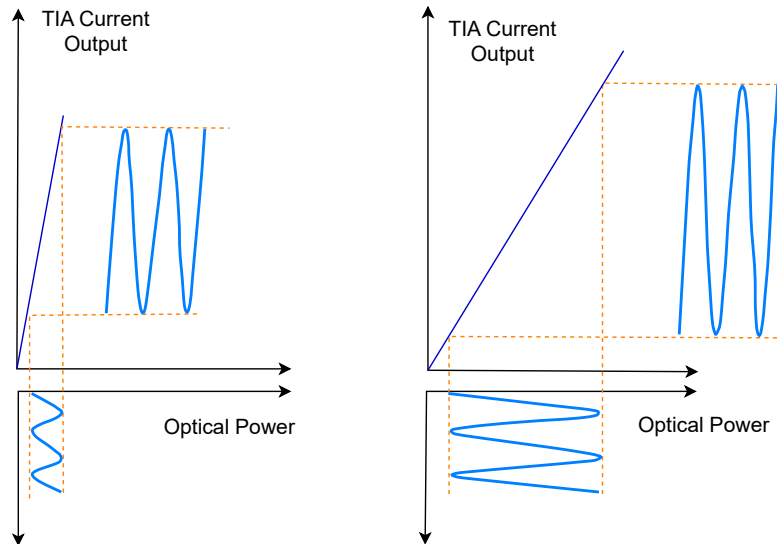


Figura 6.2: *Loop* de control de ganancia AGC. [5, p. 237]

Algo importante que es necesario mencionar es que el loop AGC tiene una constante de tiempo, la cual puede afectar el desempeño del receptor, dependiendo del *rate* de datos que se esté recibiendo, lo recomendable es mantener esta constante de tiempo lo más pequeña posible.

6.2.2. TIA Conexiones en un Subensamble Óptico

Es crucial mejorar el SNR en las primeras etapas de la señal cuando la señal es muy pequeña, esto es para evitar que el ruido generado en esta primera etapa se siga amplificando en las etapas siguientes.

Las conexiones entre el detector PIN y el amplificador TIA no deben ser de larga distancia para evitar ruido generado en las líneas de transmisión. Esta primera etapa es muy crítica y se debe cuidar al máximo los detalles del ruido, especialmente cuando el *rate* de datos es muy alto.

Para un *rate* de datos arriba de varios cientos de Mbps el amplificador TIA y el detector PIN deben estar montados en el mismo subensamble óptico y todos los amplificadores TIA deben estar en el mismo circuito integrado dentro de la misma oblea de silicio.

La **Figura 6.3** muestra un esquemático de conexiones entre el diodo PIN y su amplificador TIA, se observa que las dimensiones son de 1 mm. En más detalle el detector PIN es colocado en el centro del punto focal de la lente, con esto la luz incide directamente en el centro del detector PIN, el cátodo y el ánodo están conectados al TIA. También el TIA polariza al diodo PIN y recibe la corriente por el ánodo del diodo.

Las salidas del TIA están conectadas a unas líneas de transmisión que llevan la señal a la salida del subensamble.

Otro punto importante es colocar capacitores *bypass* cerca del TIA y del fotodetector, este capacitor es necesario para aislar el ruido por el acoplamiento dentro del TIA, también cabe mencionar que las fuentes y tierras deben estar lo más cerca posible.

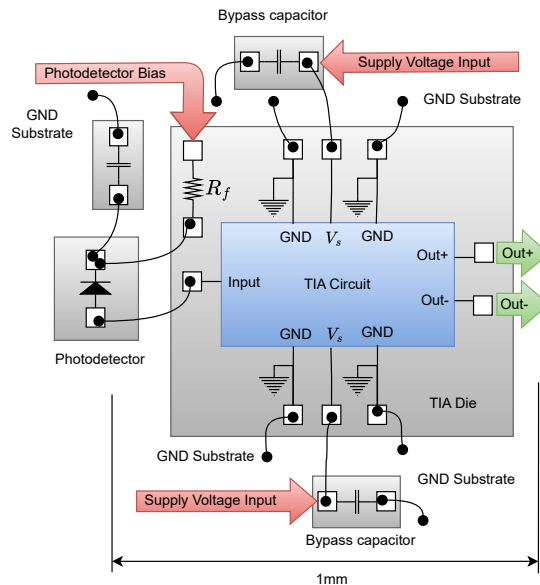


Figura 6.3: Diagrama de Conexiones de un Detector PIN y su Amplificador TIA en un subensamble ROSA. [5, p. 239]

6.2.3. Amplificador de Límite LIA

En los receptores digitales, la etapa posterior al amplificador de transimpedancia TIA es el amplificador de límite LIA. En la **Figura 6.4** se muestran los bloques. La función del amplificador de límite es proporcionar una ganancia extra y un acondicionamiento de señal. La salida del amplificador TIA es en esencia una señal analógica, al comparar esta señal con una referencia se puede obtener la señal digital, entonces el amplificador LIA actúa como un comparador. El valor del voltaje de referencia es muy importante, por eso se debe escoger en el punto medio de la señal de salida del amplificador TIA, pero como estos niveles son

cambiantes debido a diferentes factores como la temperatura, entonces el voltaje de referencia también debe ser dinámico para poder llevar el mismo ritmo de la señal de salida del TIA y siempre mantenerse en el punto medio.

Un método para poder tener el voltaje de referencia dinámico es colocar un integrador de señales, así cada variación en la señal será integrada y se proporcionará un voltaje de referencia dinámico que estará siempre en el punto medio, sin importar las variaciones de la señal.

En los circuitos prácticos para alta velocidad, la interfaz simple es cambiada por una interfaz diferencial para minimizar el efecto del ruido en modo común.

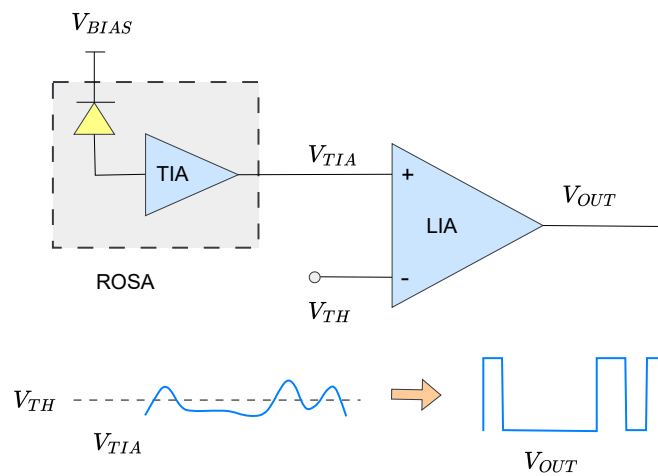


Figura 6.4: Amplificador de límite, función básica. [5, p. 242]

En la **Figura 6.5** se observa el acoplamiento diferencial, también se observa un acoplamiento de AC por medio de 2 capacitores, con esto se elimina el *offset* de DC. Estos capacitores se deben escoger cuidadosamente, ya que el *rate* de datos depende del valor de la capacitancia. Para flujo de datos por arriba de 1 Gbps se pueden usar capacitores del orden de $0.1 \mu F$. También se observa en la figura un filtro como retroalimentación para generar el *offset* dinámico.

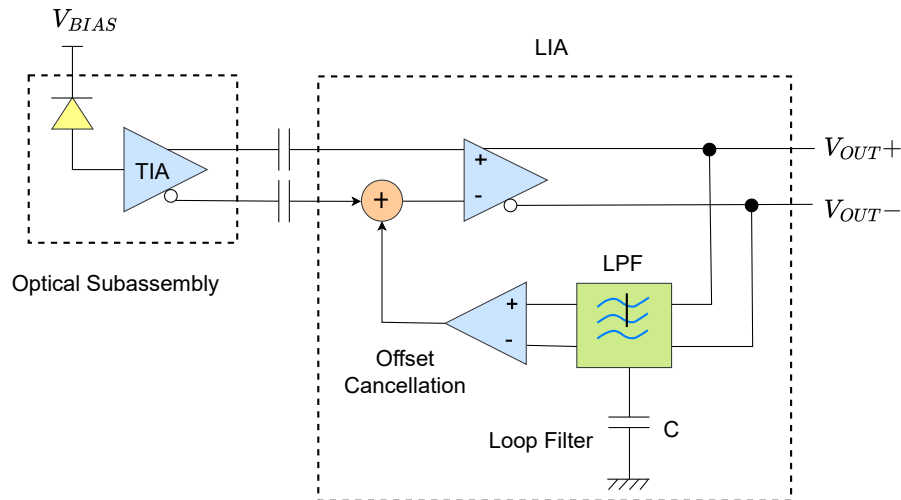


Figura 6.5: Amplificador de límite diferencial con ajuste automático de *offset*. [5, p. 243]

6.2.4. Recuperación de reloj y datos CDR

La salida del amplificador LIA proporciona una señal digital muy clara pero no está libre de los desfases o *jitter*, es decir que los amplificadores TIA y LIA trabajan sólo sobre la amplitud de la señal pero no sobre los retardos o desfases de la señal. Para poder reconstruir correctamente la señal se necesita recuperar la señal de reloj y con un muestreo tomar los valores lógicos correctos. Esto se puede hacer a través de un circuito recuperador de reloj y datos **CDR** (*Clock and Data Recovery*).

En la **Figura 6.6** se observan los bloques que conforman un CDR. Se trata de un **PLL** (*Phase Lock Loop*) compuesto de un detector de fase, un filtro y un oscilador controlado por voltaje **VCO** (*Voltage Controlled Oscillator*) conectado a un *flip-flop* que sincroniza los datos de entrada con el reloj generado por el PLL.

El comparador de fase compara la fase de la señal de entrada con el reloj y genera un voltaje analógico proporcional a la diferencia de fase, el voltaje analógico entra al filtro PLL que es un controlador proporcional-integral **PI** (*Proportional Integral*), la salida del PLL controla la frecuencia de salida del VCO. La salida del VCO también es usada para reconstruir el reloj.

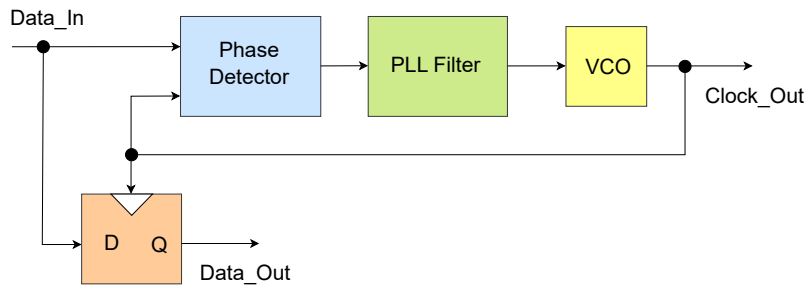


Figura 6.6: Recuperación de datos y reloj CDR. [5, p. 245]

En la **Figura 6.7** se observa como el CDR elimina el *jitter*, dejando una señal totalmente reconstruida.

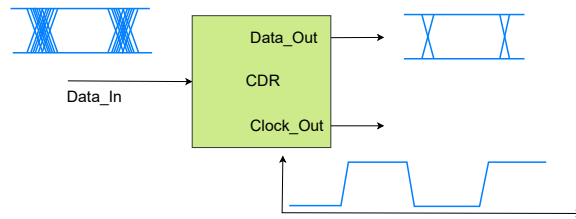


Figura 6.7: Recuperación de datos y reloj de una cadena simple. [5, p. 246]

Capítulo 7

Plataforma de Experimentación

7.1. Introducción

Desde el inicio de este trabajo consideré que para que la formación en conceptos de comunicaciones ópticas estuviera completa era necesario tener alguna experiencia práctica. Para ello realicé una plataforma de transmisión y recepción basada en un TOSA y un ROSA. En este capítulo se describe la realización de la plataforma, así como el diseño y prueba de 3 experimentos para ser realizados en ella.

7.2. Descripción de la plataforma

El diagrama de bloques de la plataforma se muestra en la **Figura 7.1** Se compone del transmisor y del receptor ópticos TOSA y ROSA, conectados entre sí por una fibra óptica. La señal digital que se desea transmitir debe de ser previamente acondicionada para cumplir con las especificaciones del TOSA, de esto se encarga el **EAM** (*Electro Absorption Modulator*), el acondicionador del modulador del TOSA. De manera similar, la señal recibida por el ROSA es acondicionada para ser entregada al receptor digital.

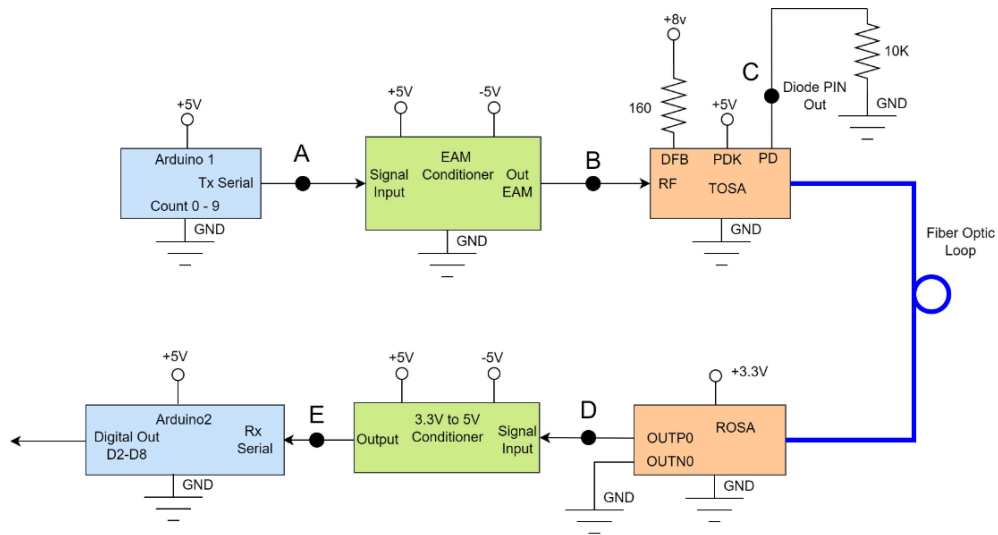


Figura 7.1: Diagrama a bloques de la plataforma experimental.

La **Figura 7.2** muestra los componentes TOSA y ROSA, se puede observar que el número de serie ayuda a identificar cuál es el transmisor y el receptor, si inicia con la letra T es el transmisor y si inicia con la letra R es el receptor, en este caso T1838 es el TOSA y R1828 es el ROSA, es importante notar que son componentes muy pequeños 2.9 cm por 0.6 cm, esto dificulta un poco el manejo directamente con sus pines, es por ello que es necesario montarlos en un PCB con *headers* para su manejo durante la experimentación.



Figura 7.2: R1828 ROSA, T1838 TOSA

La **Figura 7.3** muestra la placa donde fueron ensamblados el TOSA y ROSA, debido a que los componentes son muy pequeños, con los *headers* facilita inyectar las señales de polarización y control. Los componentes tienen 2 hileras de pines, por tal motivo son soldados por *TOP* y *BOTTOM*.

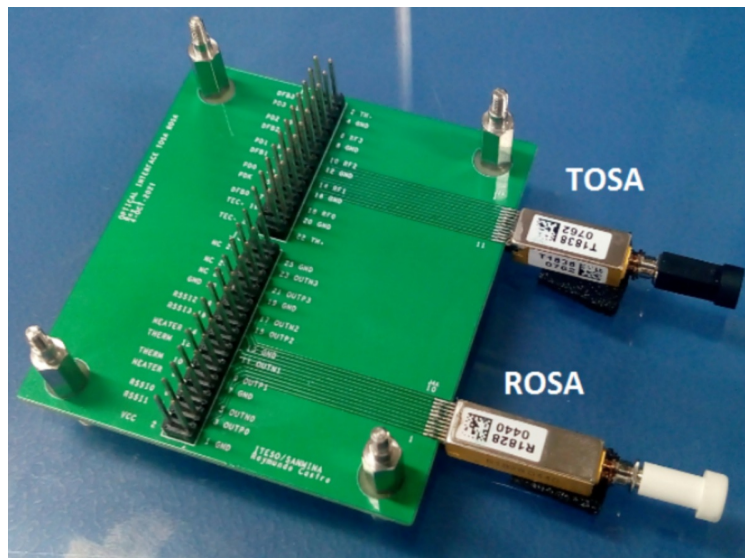


Figura 7.3: Placa de ensamble para TOSA y ROSA.

La **Figura 7.4** muestra la plataforma experimental, con todas sus etapas: alimentación de voltaje, acondicionadores de señal, generadores de datos digitales, receptor de datos digitales, etapa óptica con el TOSA-ROSA y la fibra óptica. Se usaron Arduinos Nano para la generación de pulsos digitales y la recepción de estos. La fibra óptica conecta al Tx con Rx haciendo un lazo óptico cerrado.

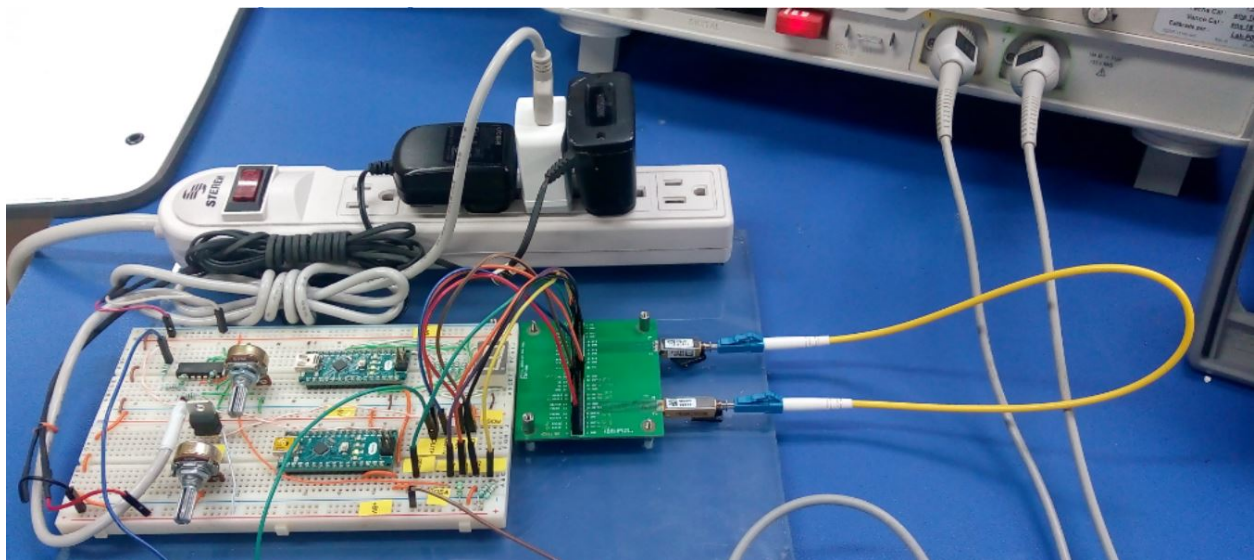


Figura 7.4: Plataforma experimental.

7.2.1. El TOSA

La **Figura 7.5**, tomada de la hoja de especificaciones del TOSA utilizado, muestra el diagrama de bloques funcional del transmisor. Se trata de un JDSU T1838 que contiene 4

líneas de datos seriales que son convertidos a pulsos ópticos por medio del **EML** (*Electric-absorption Modulated Laser*) con longitudes de onda centradas en 1296 nm, 1300 nm, 1305 nm y 1309 nm. La señal óptica es multiplexada para que viaje a través de una fibra *Single-Mode*. En el caso de la plataforma, solamente se utiliza un canal óptico de los cuatro disponibles.

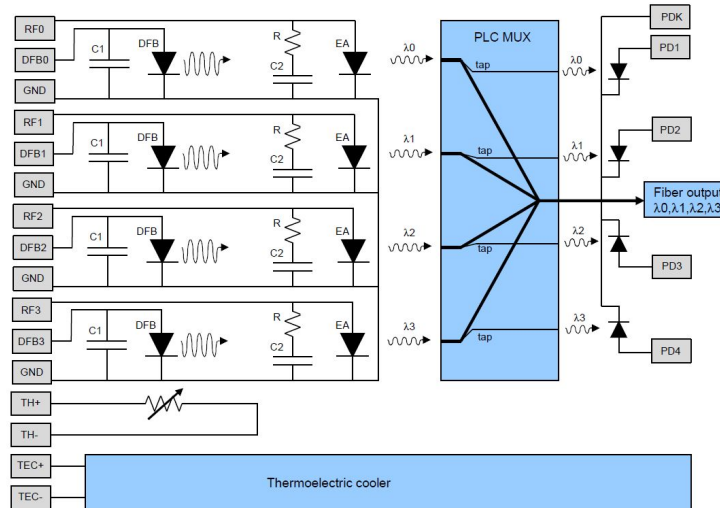


Figura 7.5: Diagrama a bloques del TOSA.

De las características eléctricas del TOSA, las más relevantes para la realización de la plataforma son la corriente con la que debe alimentarse el láser y el rango de voltaje que puede aplicarse al modulador. En el primer caso, la corriente máxima es de 180 mA y en el segundo caso el voltaje modulador se debe de encontrar entre -2 V y -1 V. En el apéndice de este documento se proporciona la hoja de datos del TOSA.

7.2.2. El ROSA

La **Figura 7.6**, tomada de la hoja de especificaciones del ROSA utilizado, muestra el diagrama de bloques funcional del receptor óptico. Se trata de un JDSU R1828 que contiene 4 líneas para datos ópticos, que provienen del demultiplexor, estos datos óptico son convertidos a eléctricos mediante los fotodetectores PIN y acondicionados mediante amplificadores TIA. De manera similar al TOSA, en la plataforma solamente se emplea uno de los 4 canales ópticos.

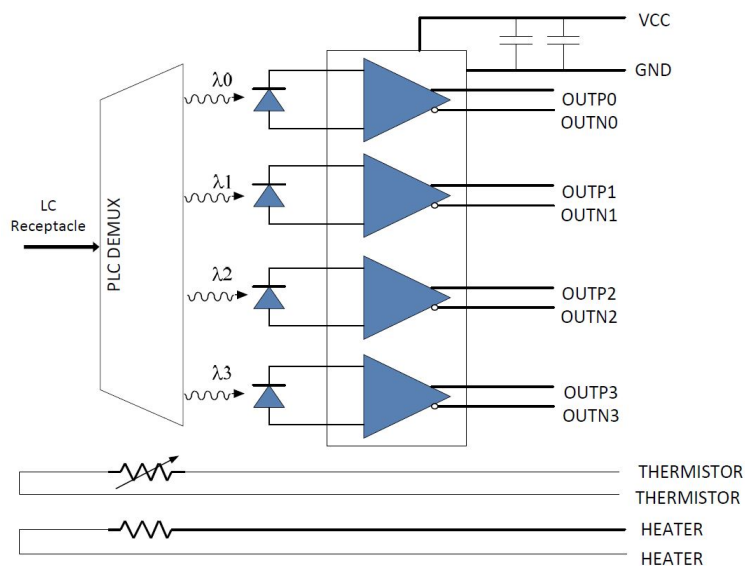


Figura 7.6: Diagrama a bloques del ROSA.

El ROSA se alimenta con 3.3 V y su característica óptica principal es la amplitud de la señal de voltaje que proporciona en sus salidas, diferencial, de un máximo de 700 mV y un valor típico de 350 mV.

En el apéndice de este documento se proporciona la hoja de datos del ROSA.

7.2.3. Acondicionador de señal para el modulador

Esta etapa consiste en modificar la señal proveniente de la fuente de datos, el transmisor digital, para que sea eléctricamente compatible con los requerimientos del modulador es necesaria una señal moduladora entre -2 V y -1 V. El circuito que se describe tiene como supuesto que la señal digital se encuentra en un rango de 0 a 5 V.

La **Figura 7.7** muestra el acondicionador de voltaje, el primer amplificador inversor U1 tiene una ganancia de -0.22, como la entrada es de +5 V a la salida se tiene -1.13 V, el opamp inversor U2 tiene ganancia de -1 y un *offset* variable con esto se puede tener la señal aproximada entre -2 V y -1 V, el opamp U3 es un *buffer* para proporcionar la suficiente corriente al EAM.

El opamp utilizado es un TL084 el cual se puede alimentar de +5 V y -5 V.

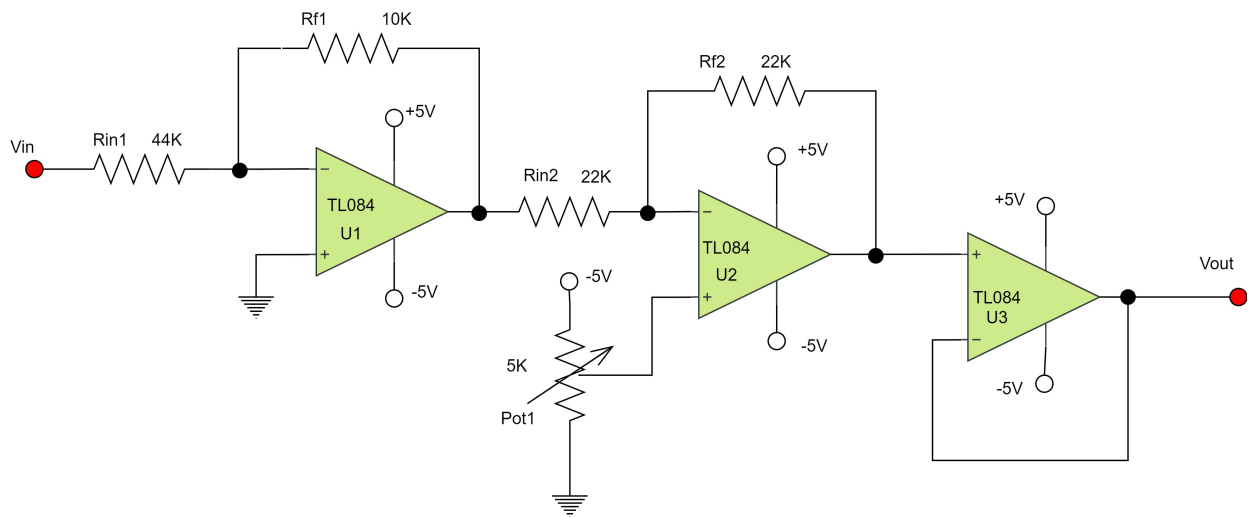


Figura 7.7: Acondicionador de señal para el EAM.

7.2.4. Acondicionador de señal recibida

El acondicionamiento de la señal recibida del ROSA depende de las características de la señal que se requiere proporcionar al receptor digital. En uno de los experimentos, por ejemplo, fue necesario convertir la señal del ROSA a una señal digital de 5 V.

7.3. Experimentación

El desarrollo de la plataforma se realizó tomando en cuenta su experimentación en 3 casos de ejemplo: una transmisión simple de un tren de pulsos, una comunicación serial cuya señal fuera proporcionada y recibida por un microcontrolador y una comunicación serial con datos recibidos en una computadora.

A continuación, se describe el desarrollo de cada uno de estos experimentos, así como los resultados obtenidos.

7.3.1. Experimento 1: Tren de Pulsos

El experimento 1 comprueba el funcionamiento del TOSA enviando sólo pulsos, la **Figura 7.8** muestra las etapas usadas en esta validación, la primera etapa es un generador de pulsos cuadrados, la segunda etapa es un acondicionador de señal para el EAM, y la tercera etapa es el TOSA, que tiene una resistencia de $160\ \Omega$ con la que proporciona 36 mA al láser interno, también tiene una resistencia de $10\ k\Omega$ para acoplar la salida del diodo PIN.

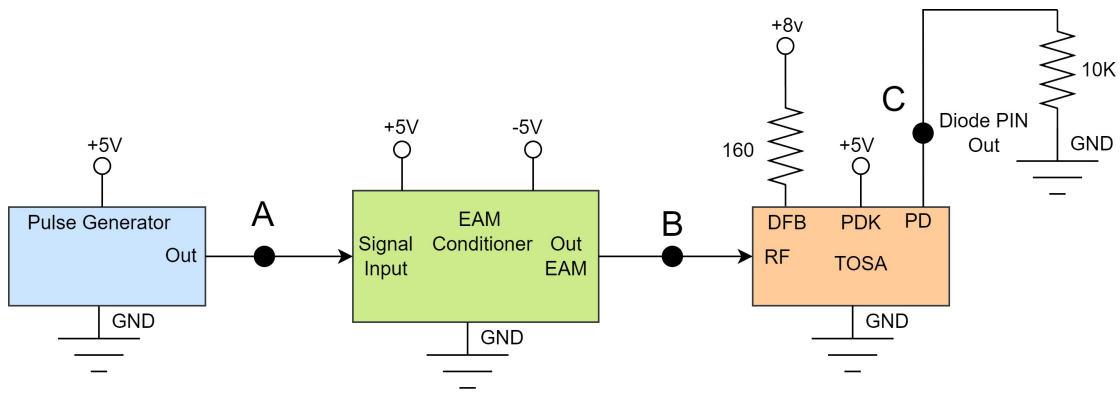


Figura 7.8: Diagrama a bloques del transmisor de pulsos.

Las señales que van hacia al EAM se generan en la placa de control que se muestra en la **Figura 7.9**, la señal cuadrada es generada por un 555 el cual tiene un potenciómetro para variar la frecuencia de 40 kHz a 500 kHz, la amplitud de la señal y el *offset* están reguladas por Opamps *TL084*, los cuales también cuentan con un potenciómetro para variar la amplitud y el *offset*. Los circuitos son alimentados con ± 5 V.

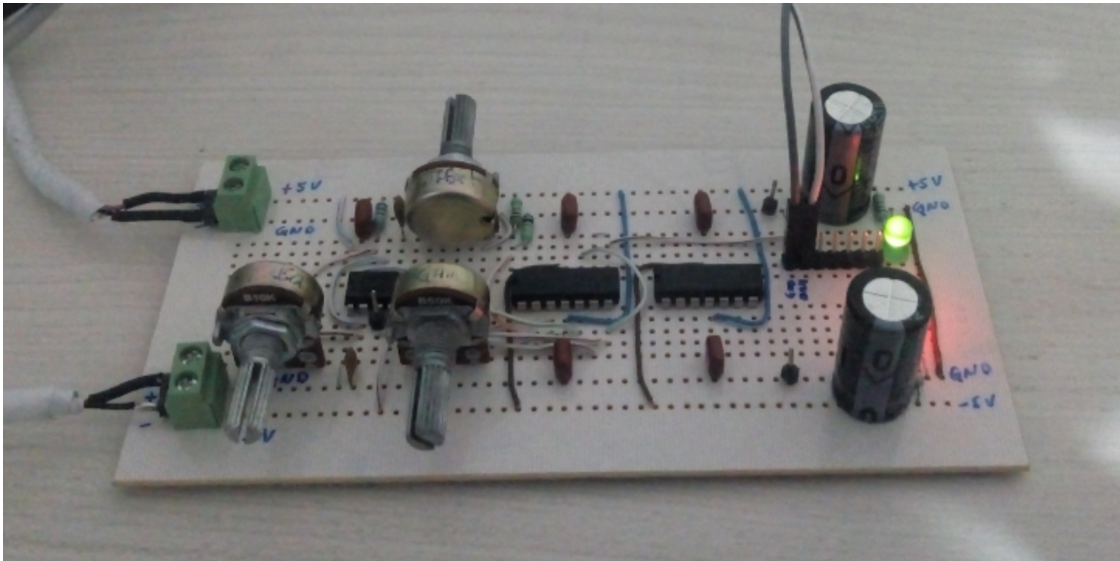


Figura 7.9: Generador de señal de control para el EAM y alimentación del Láser.

La señal cuadrada es generada por un *LM555*, el circuito tiene un potenciómetro de 10 k Ω para variar la frecuencia de 40 kHz a 500 kHz, la **Figura 7.10** muestra el esquemático del oscilador, el cual es alimentado con 5 V.

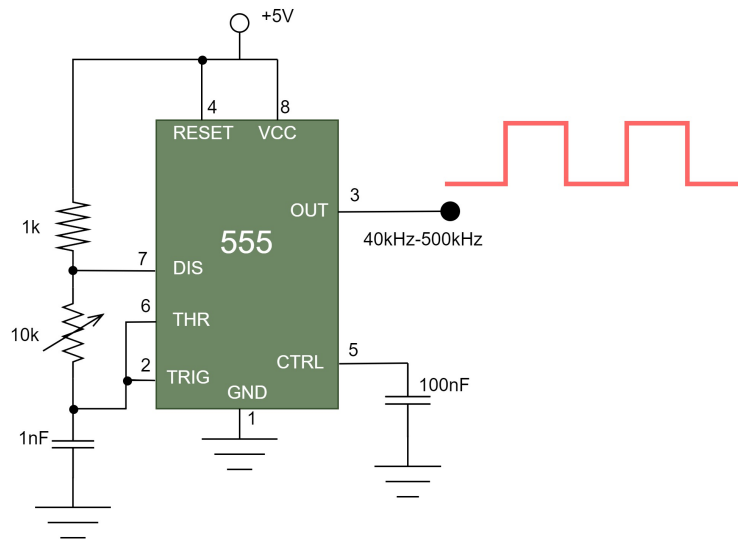


Figura 7.10: Oscilador de pulsos cuadrados de 40 kHz a 500 kHz.

El esquemático del bloque acondicionador EAM se muestra en la **Figura 7.11**, el potenciómetro $Rf1$ se encarga de variar la amplitud de la señal, y el potenciómetro $Pot1$ es el que varía el *offset* de la señal.

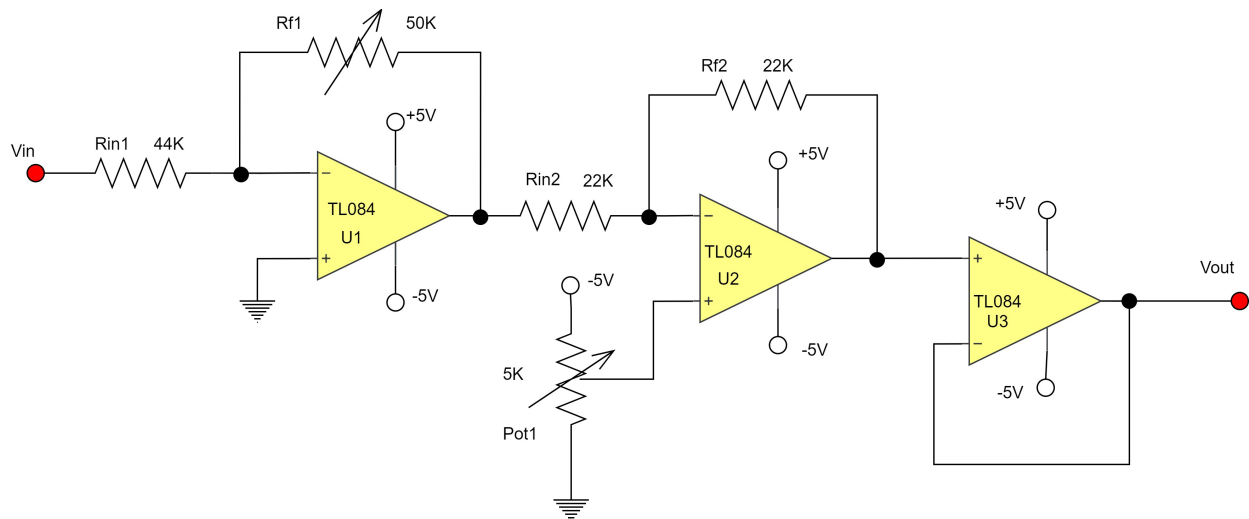


Figura 7.11: Esquemático del acondicionador de señal para controlar el EAM.

Se realizaron validaciones cambiando la corriente del láser, la frecuencia, la amplitud y el *offset*, para encontrar la mejor polarización del láser y del EAM, la **Figura 7.12** muestra cada una de las variaciones, cuando se cambió la corriente del láser, se pudo ver que el valor de 36.3 mA era la corriente ideal para polarizar el láser interno del TOSA, al cambiar la amplitud de la señal de control del EAM se observa que cuando la señal es de 1 Vpp la salida del diodo PIN tiene buena amplitud de 500 mV, al modificar el *offset* también se observa que en -2 V es el punto óptimo para la señal de control del EAM, por último se valida cambiando

diferentes frecuencias, el TOSA respondió bien a todas las frecuencias desde 50 kHz hasta 500 kHz, esto debido a que el ancho de banda del TOSA llega hasta 10 GHz.

1V EAM, Offset = -2V, Freq = 200KHz CORRIENTE LASER VARIABLE		ILaser= 36.3 mA, offset=-2V, Freq = 200KHz AMPLITUD EAM VARIABLE	
Corriente del laser	Voltaje Diodo PIN	Amplitud EAM	Voltaje Diodo PIN
19.4mA	Ruido	0.5V	200mV, offset de 1.5v de salida
36.3mA	500mV (offset 1v pos)	1V	500mV (offset 1v pos), la señal de entrada se atenúa a 0.7V
51.5mA	500mV (offset 2v pos)	1.5V	500mV (offset 1v pos), la señal de entrada se atenúa a 1V

EAM 1V, ILaser = 36.3, Freq = 200KHz OFFSET VARIABLE		1V EAM, Offset = -2V, ILaser= 36.3 mA FRECUENCIA VARIABLE	
Offset	Voltaje Diodo PIN	Frecuencia	Voltaje Diodo PIN
-1.5v	500mV (offset 1v pos) la señal de entrada se atenúa a 1V	50KHz	500mV (offset 1v pos)
-2V	500mV (offset 1v pos), la señal de entrada se atenúa a 1V	100KHz	500mV (offset 1v pos)
-3V	La señal de entrada se atenúa y a la salida ruido	500KHz	500mV (offset 1v pos)

Figura 7.12: Validaciones cambiando la corriente del láser, la amplitud EAM, *offset* del EAM y la frecuencia del pulso.

La **Figura 7.13** muestra la señal de modulación que controla al EAM, esta señal es de 1 Vpp de amplitud, con un *offset* de -2 V y una frecuencia de 200 kHz, esta señal es tomada sin carga, es decir sin conectar al EAM, ya que al ser conectada sufre unos cambios por la carga que representa el EAM.

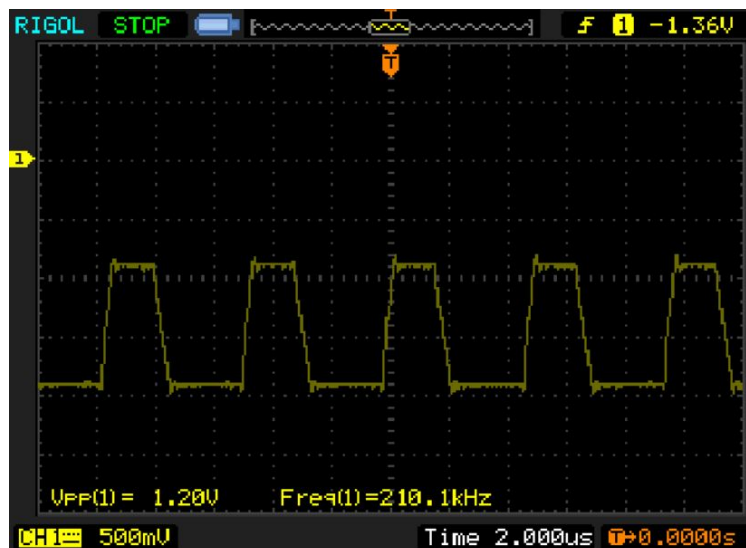


Figura 7.13: Señal de modulación para el EAM sin carga.

En esta parte la **Figura 7.14** muestra la señal de modulación del EAM pero ya conectada al EAM del TOSA, se puede observar que se atenúa un poco de 1 Vpp a 700 mVpp, y el *offset* se mueve un poco a -1.6 V, aun así, esta señal sigue siendo funcional para la transmisión óptica.

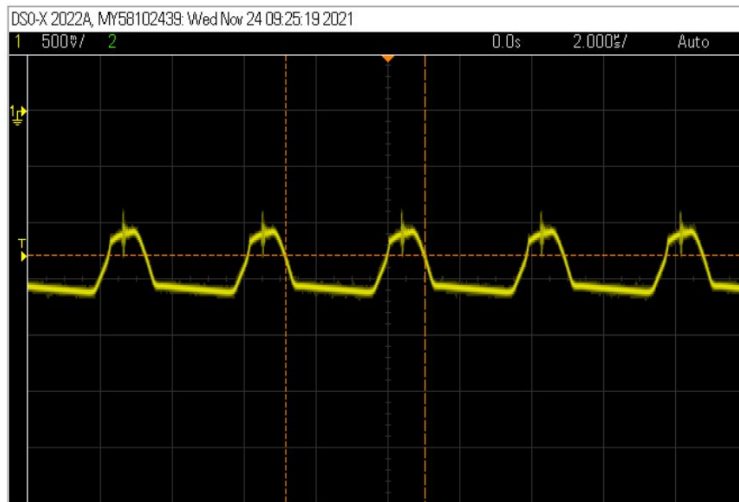


Figura 7.14: Señal de modulación para el EAM con carga, ya conectado al EAM del TOSA.

La **Figura 7.15** muestra la Señal de salida del diodo PIN, cuando el TOSA tiene una señal cuadrada de entrada con 1 Vpp y un *offset* de -2 V, se puede observar que hay un *offset* de casi 1 V a la salida del diodo PIN con una señal de 500 mV de amplitud aproximadamente. La frecuencia es igual a la de la entrada, en este caso es de 200 kHz.

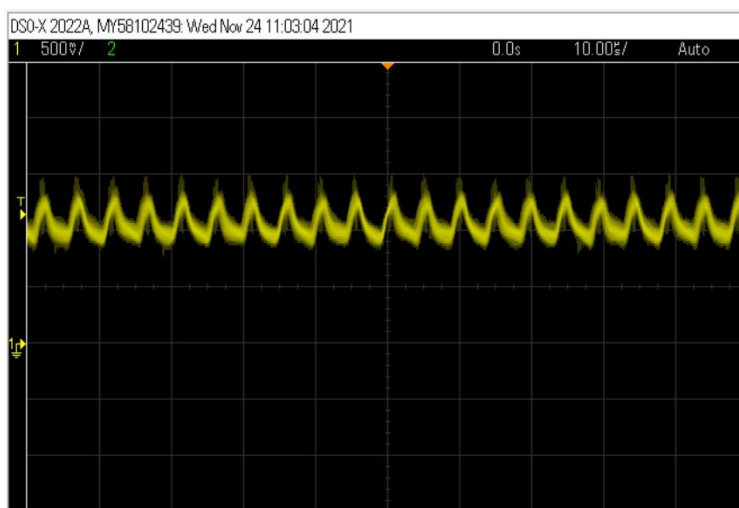


Figura 7.15: Señal de salida del diodo PIN.

7.3.2. Experimento 2: Comunicación Serial

El experimento 2 consiste en enviar y recibir cadenas de datos de un contador de 0 a 9, pasar la señal por diferentes etapas de acondicionamiento eléctrico óptico y mostrar los datos en un display de 7 segmentos.

La **Figura 7.16** muestra las diferentes etapas de la plataforma experimental, continuación se describe cada uno de estos módulos.

Módulo Arduino 1: Es un microcontrolador (Arduino Nano) que genera las señales de conteo entre 0 y 9 y las envía por el puerto serial Tx.

Módulo Acondicionador EAM: Recibe la señal que sale del Arduino, la cual se encuentra entre 0 y 5 V y la transforma a una señal apropiada para poder controlar el EAM, la señal de salida de este módulo se debe estar entre -2 V y -1 V.

Módulo TOSA: Es el transmisor óptico donde RF es la entrada para la señal de control del EAM, DFB es la entrada para alimentar el Semiconductor Láser con una corriente de 36 mA por medio de una resistencia de 160 Ω , PDK es la alimentación de los diodos PIN y PD es la salida de los diodos PIN.

Loop de Fibra Óptica: Es la fibra que se utiliza para conectar la salida óptica del TOSA con la entrada del ROSA, en este experimento la fibra es menor a 1 metro.

Módulo ROSA: Es el receptor óptico, se alimenta con 3.3 V y tiene salidas diferenciales, la salida diferencial negativa se conecta a tierra y la positiva se toma como la salida.

Módulo Acondicionador de 3.3 V a 5 V: Se encarga de elevar el voltaje a 5 V para que sea compatible con el Arduino2.

Arduino 2: Es el microcontrolador que recibe la señal por su puerto serial Rx, y la muestra por sus puertos digitales de salida en forma paralela con código a 7 segmentos.

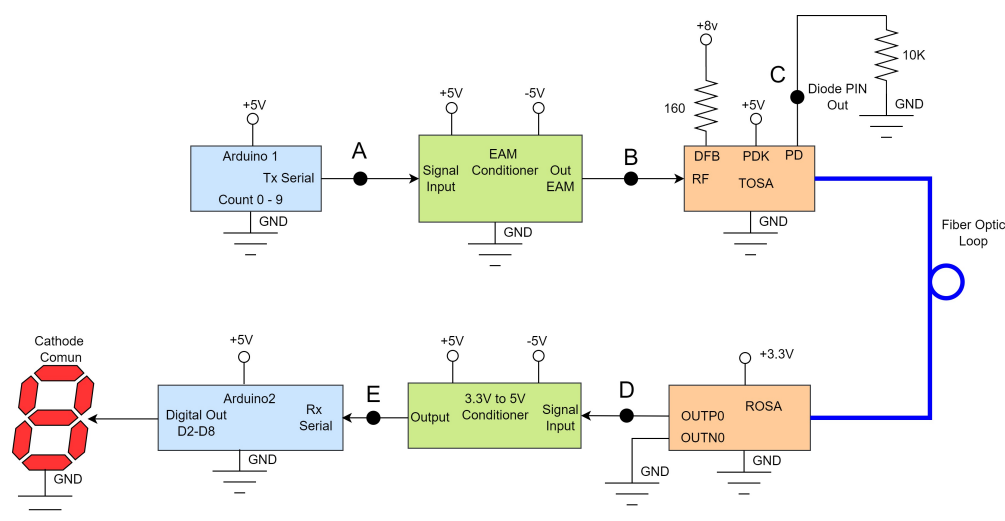


Figura 7.16: Diagrama a bloques de la plataforma experimental.

Referente al módulo acondicionador de señal del EAM, este fue descrito en la **Figura 7.7**

El Arduino UNO es el encargado de generar las señales del contador de 0 a 9 y las envía por su puerto serial, la **Figura 7.17** muestra la señal de salida del Arduino en el canal 1 y en el canal 2 se muestra la señal de salida del acondicionador sin carga, es decir sin conectar al EAM, se puede observar que la señal no presenta deformaciones, respecto a la original.

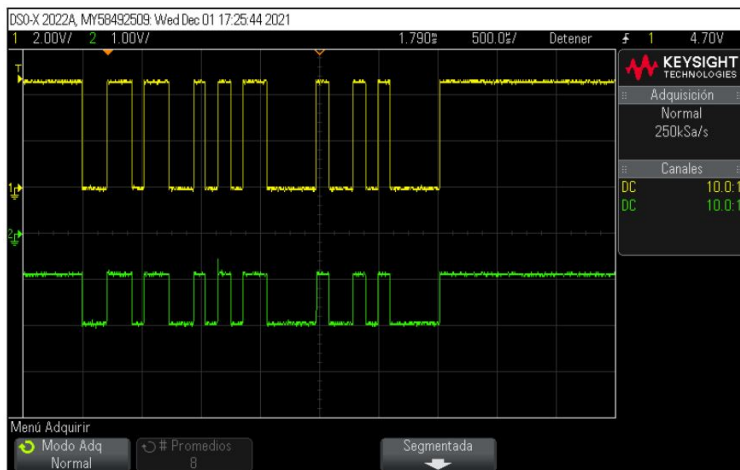


Figura 7.17: Señal serial de Salida del Arduino Tx Canal 1 (contador 0-9) y señal del EAM canal 2 sin carga.

La **Figura 7.18** muestra la señal de salida del acondicionador EAM pero ya con carga (Conectado al EAM), se puede observar una ligera deformación en el flanco de bajada, pero es muy pequeña, y los datos se conservan sin perder información.

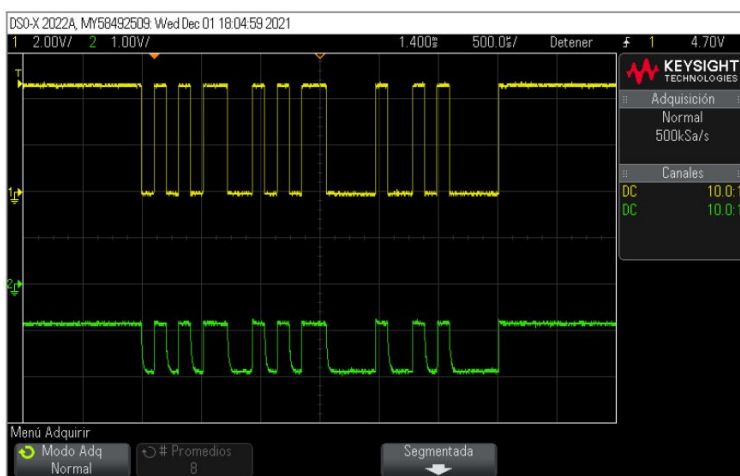


Figura 7.18: Señal serial de Salida del Arduino Tx Canal 1 (contador 0-9) y señal del EAM canal 2 con carga.

La **Figura 7.19** muestra la salida del diodo PIN, se puede observar que la señal es

de 700 mV aproximadamente y con un *offset* de 0.5 V, la señal muestra claramente que el modulador está funcionando, y que el TOSA está transmitiendo correctamente los datos.

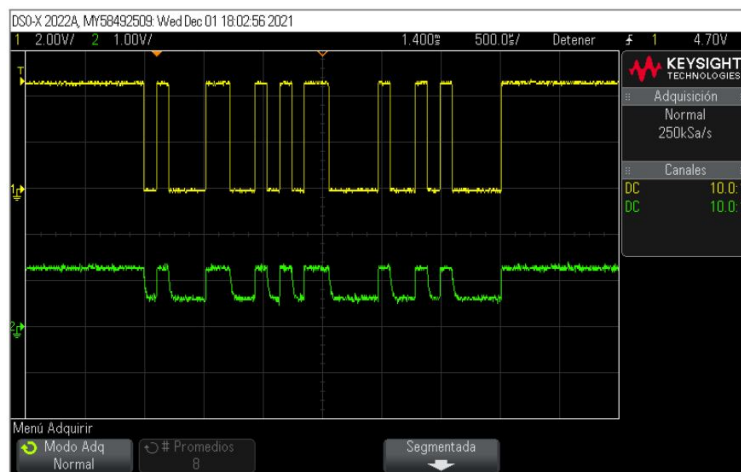


Figura 7.19: Señal serial, salida del Arduino canal 1 y señal de salida del diodo PIN canal 2.

El acondicionador de señal para convertir la señal de 3.3 V a 5 V se muestra en la **Figura 7.20**, se trata de un amplificador no inversor con 1.5 de ganancia.

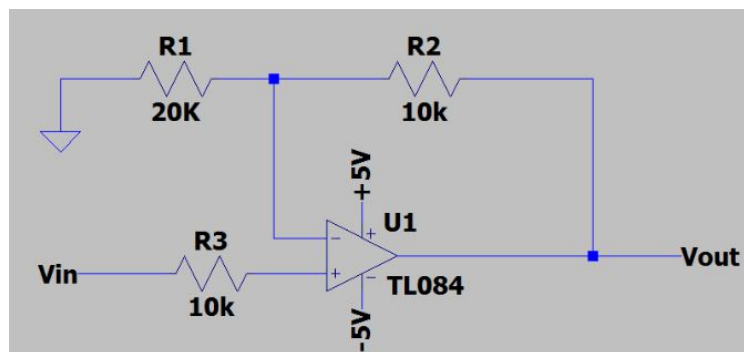


Figura 7.20: Acondicionador para transformar el voltaje de 3.3 V a 5 V.

7.3.3. Experimento 3: Comunicación Serial con Monitor

Transmisor

En la **Figura 7.21** se muestra el diagrama a bloques que transmite un mensaje generado en el Arduino Tx y mostrado en un monitor, el primer bloque es un microcontrolador que genera un mensaje de forma serial, este mensaje pasa por un acondicionador de señal que le anexa un *offset* hacia un voltaje negativo, esta señal negativa entra al TOSA que convierte la señal eléctrica en señal óptica. La señal viaja por una fibra óptica que hace un *loop* con el receptor ROSA, dicho receptor convierte la señal óptica a eléctrica, la señal de salida del receptor es muy pequeña y con un *offset* positivo, por tal motivo se acondiciona

la señal para que pueda entrar al Arduino Rx, que a su vez está conectado con el monitor para mostrar el mensaje.

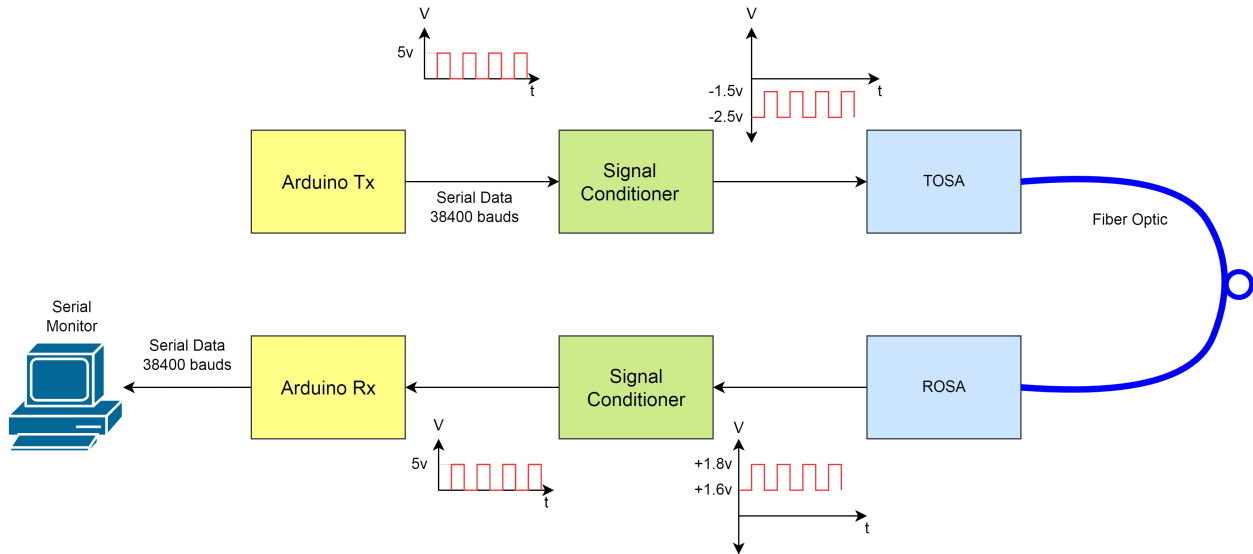


Figura 7.21: Diagrama a bloques para la comunicación serial.

El circuito transmisor es mostrado en la **Figura 7.22**, este circuito es un acondicionador de señal que tiene la función de transformar la señal que proporciona el Arduino a una señal adecuada para el modulador óptico TOSA.

El Arduino Tx genera el mensaje “Hola” que es enviado de forma serial por la salida D4 con una amplitud de 3.8 V, para que el TOSA funcione correctamente su señal de entrada debe ser negativa entre -2.8 V y -1 V de acuerdo con el *datasheet*. El acondicionador Tx transforma la señal de salida del Arduino a la señal negativa dentro de los parámetros establecidos en la hoja de características.

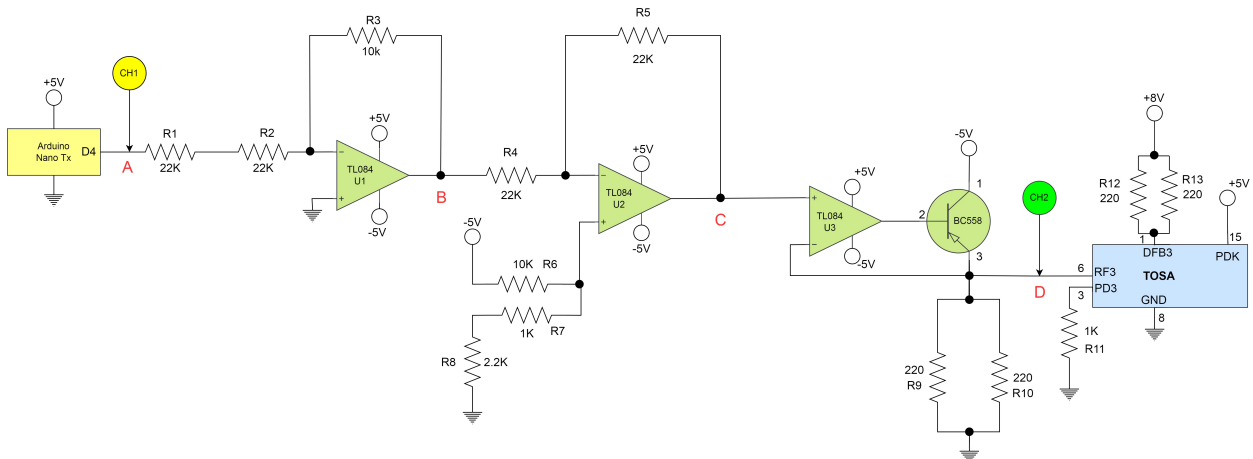


Figura 7.22: Circuito Transmisor.

El esquemático para la simulación se muestra en la **Figura 7.23**, la simulación fue realizada en LTspice, en el esquemático se muestran los nodos A, B, C, D, que son los puntos donde se tomaran las señales.

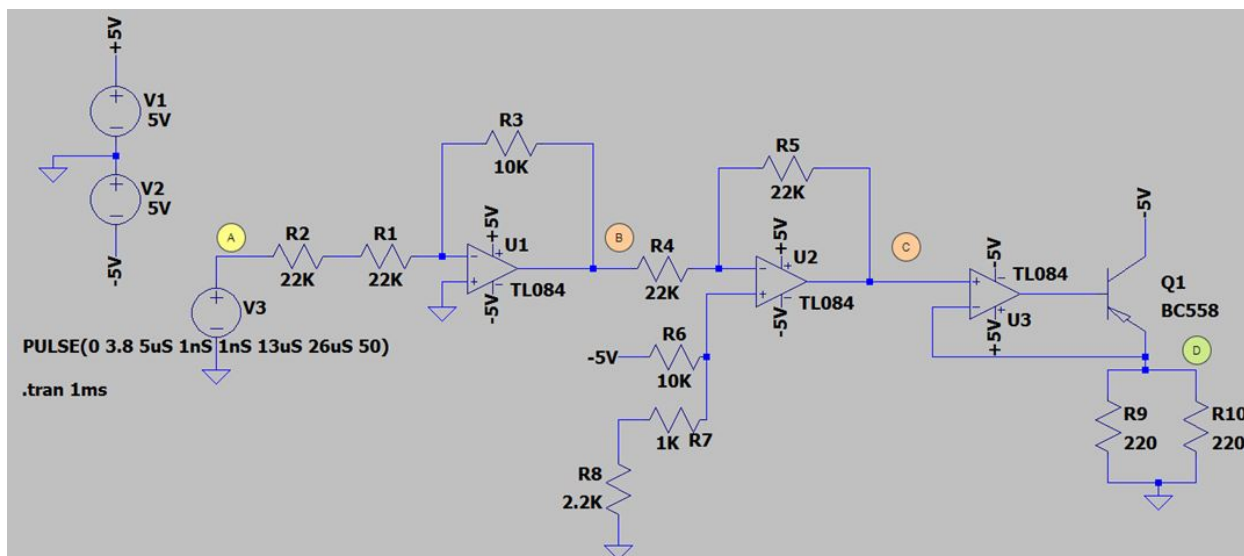


Figura 7.23: Simulación del acondicionador Tx en LTspice.

El primer amplificador operacional U1 atenúa la señal a un voltaje de 0.7 volts aproximadamente. La **Ecuación 7.1** muestra el cálculo del voltaje de salida de U1 y la **Figura 7.24** muestra el voltaje de entrada (Verde Nodo a) que es de 3.8 V y también se muestra el voltaje de salida (Azul Nodo b) del U1, se observa que la salida está entre -0.7 V y -0.8 V .

$$V_{outU1} = \frac{-(3.8V)(10k\Omega)}{10k\Omega + 22k\Omega + 22k\Omega} = -0.7V \quad (7.1)$$

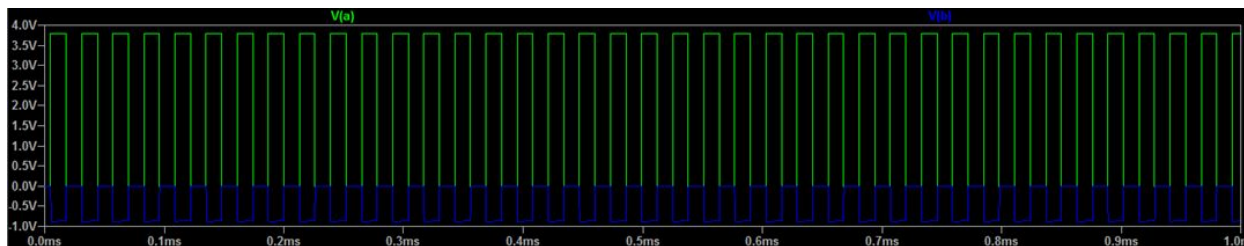


Figura 7.24: (Verde) voltaje de la fuente en el nodo A, (Azul) Voltaje de salida del U1.

El amplificador U2, invierte la señal para dejarla en la misma fase de la señal de entrada, la ganancia es de 1 por tal motivo la amplitud de la salida del U1 se conserva y agrega un *offset* negativo como lo muestra la **Ecuación 7.2** para mover la señal dentro de los límites especificados para un TOSA. La **Figura 7.25** muestra la señal de entrada del U2 (Azul Nodo b) y su señal de salida (Verde Nodo c), se observa que el *offset* que se anexa en la

terminal positiva desplaza la señal entre -1.6 V y -2.4 V, esta señal es la que se necesita para el TOSA.

$$\text{OffsetU2} = \frac{-(5V)(2.2k\Omega + 1\Omega)}{10k\Omega + 2.2k\Omega + 1k\Omega} = -1.2V \quad (7.2)$$

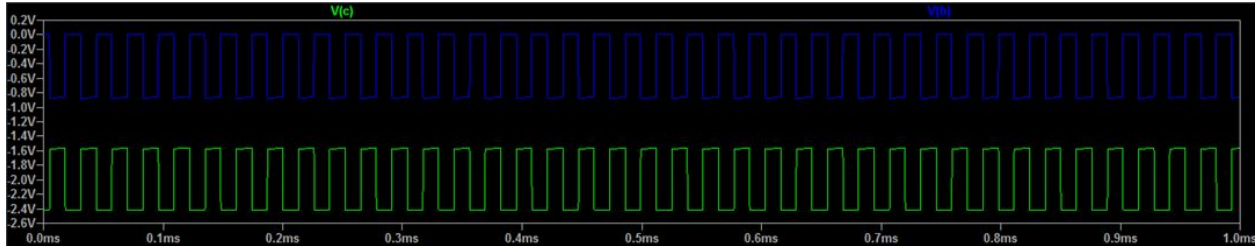


Figura 7.25: (Azul) Voltaje de salida del U1, (Verde) Voltaje de salida del U2.

El transistor Q1 junto con el Opamp U3 forman un buffer de corriente, ya que la corriente que proporciona el TL084 es de 40 mA no es suficiente para el TOSA que tiene un consumo de 120 mA aproximadamente. La forma de las señales en el nodo C y en el nodo D son las mismas sólo cambia la corriente. Las resistencias R9 y R10 cierran el circuito para que el transistor funcione como fuente de corriente.

La **Figura 7.26** muestra la señal de salida del Arduino (CH1 Amarillo) y la señal de entrada al TOSA (CH2 Verde). Se observa que la señal del canal 2 está entre -2.5 V y -1.5 V valores dentro de los límites, estas señales reales están muy cercanas a las calculadas en la simulación, una pequeña diferencia entre la simulación y la señal real se observa en el canal 2 (Verde), se nota que la señal no está totalmente cuadrada, debido a que esta señal ya tiene conectado al TOSA .

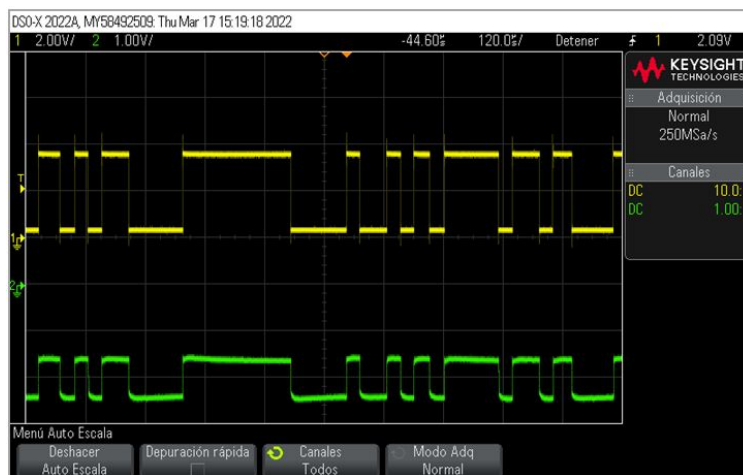


Figura 7.26: Canal 1 (Amarillo) Señal de salida del Arduino, Canal 2 (Verde) Señal de entrada del TOSA pin 6 RF3.

Los pines del TOSA están conectados de la siguiente manera:

DFB3: Es el pin para alimentar al láser interno del TOSA, con 2 resistencias en paralelo R12, R13 con valor de 220 ohms cada una forman una equivalente de 160 ohms con este arreglo se suministra una corriente de 36 mA.

RF3: Es la entrada de la señal de control del EAM.

PD3: Es la señal de salida del monitor de potencia por medio de un diodo PIN.

PDK: es la alimentación de los monitores de potencia óptica.

La **Figura 7.27** muestra las conexiones del TOSA.

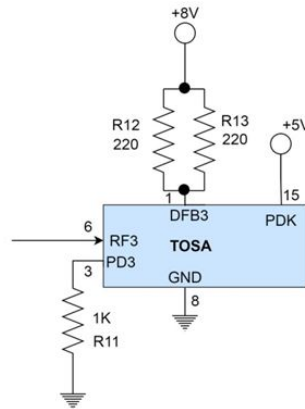


Figura 7.27: Conexiones del TOSA.

Receptor

La **Figura 7.28** muestra el circuito receptor, inicia con el ROSA que tiene una salida pequeña con un *offset* positivo, el capacitor en serie de 220 nF elimina el *offset* y en conjunto con la resistencia forman un filtro pasa altas, el AD620 está funcionando como un amplificador de ganancia 4, y el LM339 hace la comparación con un *offset* negativo, para tener a la entrada una señal que el Arduino de Rx pueda leer.

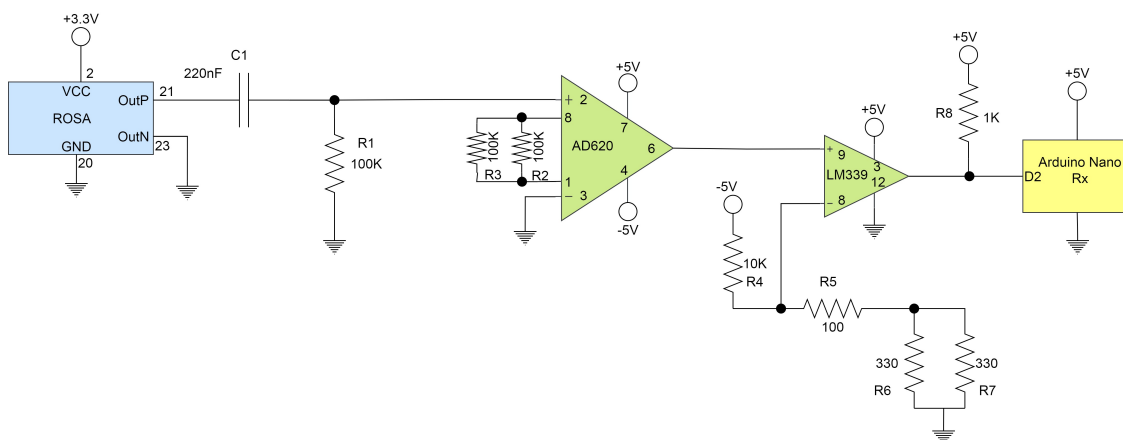


Figura 7.28: Circuito de recepción.

La salida del ROSA (Señal Verde Ch2) se muestra en la **Figura 7.29** también se muestra la salida del Arduino Tx (Señal Amarilla Ch1), se puede notar que la señal de salida del ROSA tiene un *offset* positivo de 1.6 V aproximadamente. El pulso que tiene un periodo mayor representa una frecuencia más baja y eso afecta la salida del ROSA mostrando una atenuación gradual, los pulsos con periodos pequeños que representan una frecuencia más alta tienen menos deformación, ya que el receptor ROSA funciona mejor con frecuencia altas.

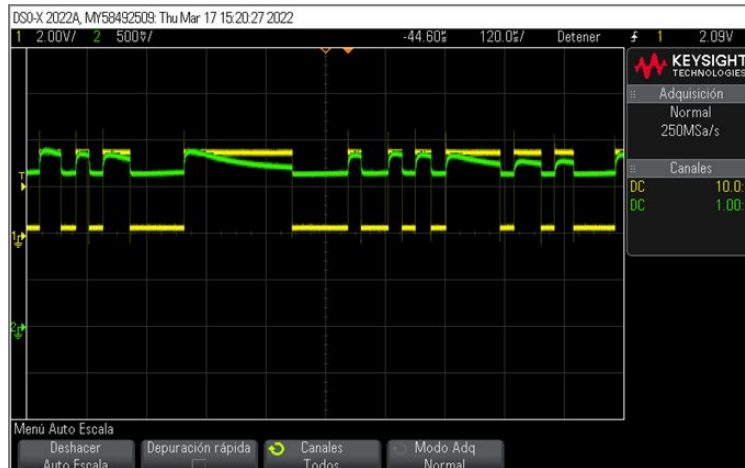


Figura 7.29: (Amarillo) Salida del Arduino Tx (Verde) Salida del ROSA.

La **Figura 7.30** muestra la señal después del capacitor, se observa que el *offset* positivo ha desaparecido y la señal pasa completamente debido a que el filtro pasa altas permite que la señal pase sin atenuación.

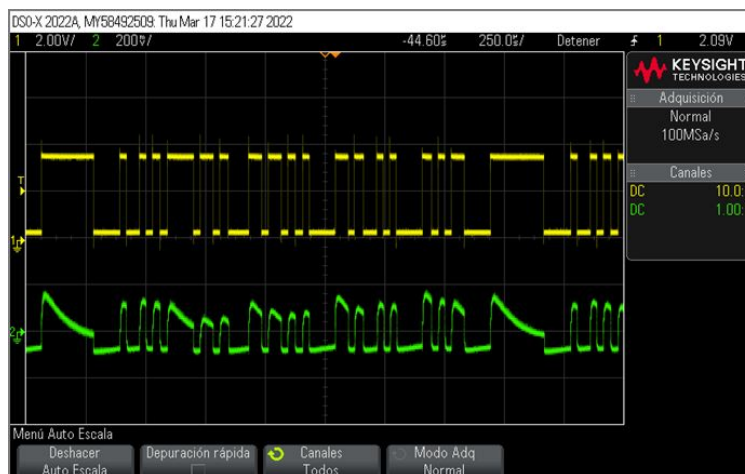


Figura 7.30: Señal Verde Ch2, después del capacitor C1.

El circuito usado para la simulación del filtro pasa altas se muestra en la **Figura 7.31**, tiene un capacitor de 220 nF y una resistencia de 100 kΩ, la fuente de voltaje se toma con una amplitud de 1 V_{AC} y una frecuencia de barrido desde 1 Hz hasta 100 kHz.

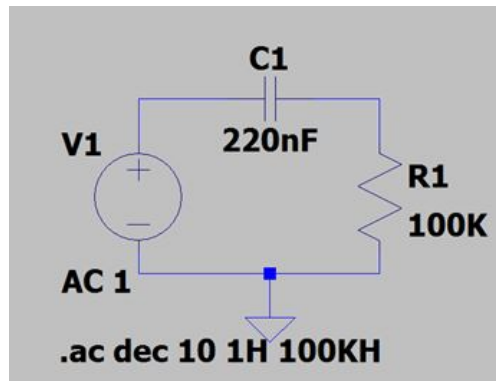


Figura 7.31: Circuito para la simulación del filtro pasa altas.

La Figura 7.32 muestra la respuesta en frecuencia del filtro pasa altas, se observa que la señal pasa completamente después de los 100 Hz, por tal motivo la señal de 38400 Hz pasa completamente a través del filtro y sin *offset*.

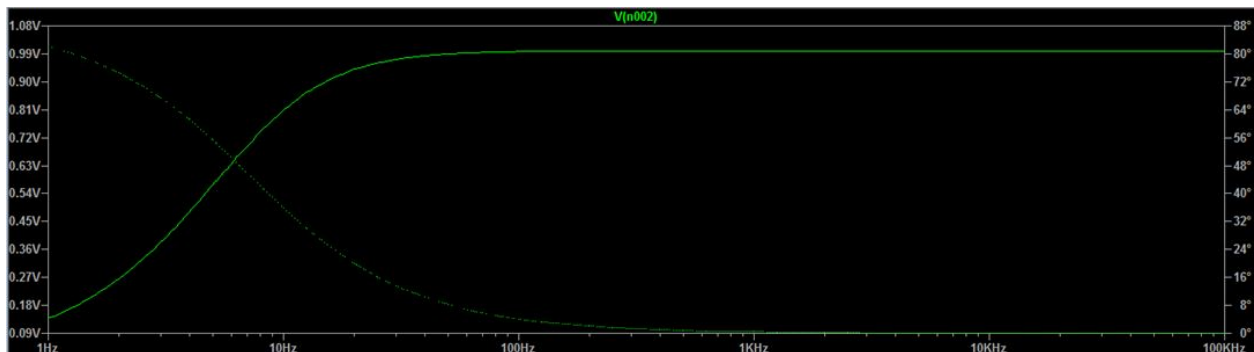


Figura 7.32: Respuesta del filtro pasa altas de 1 Hz hasta 100 kHz.

La Ecuación 7.3 muestra la fórmula para el cálculo de la frecuencia de corte del filtro pasa altas que elimina la CD, la frecuencia de corte es de 7.2 Hz.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (7.3)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi(100k\Omega)(220nF)} \quad (7.4)$$

La Figura 7.33 muestra la salida del Amplificador AD620 que amplifica 4 veces aproximadamente la señal que viene del ROSA, al amplificar la señal también amplifica las distorsiones originarias de la salida del ROSA, esta señal tiene una zona estable entre -100 mV y -300 mV que es donde se aplicara la comparación con el LM339.

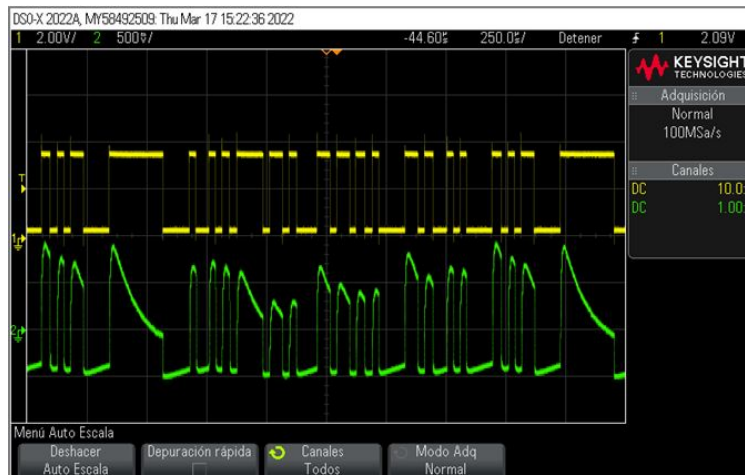


Figura 7.33: Señal verde Ch2, Señal de salida del amplificador de instrumentación AD620.

La salida del comparador LM339 se muestra en la **Figura 7.34**, la señal amarilla es la salida Tx del Arduino que se está tomando como la referencia de origen, la señal verde es la salida del comparador, el comparador tiene como referencia un voltaje de -122 mV en la terminal negativa, este voltaje está en la zona estable de la señal de amplificación del ROSA, con esto se logra una señal cuadrada y adecuada para la entrada del Arduino Rx.

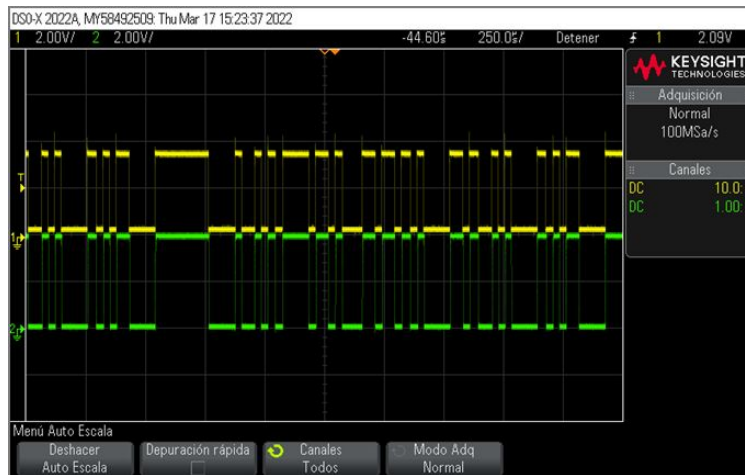


Figura 7.34: (Señal Amarilla Ch1) Salida del Arduino Tx, (Señal verde Ch2) Salida del comparador LM339 y entrada del Arduino Rx.

La **Figura 7.35** muestra el mensaje “Hola” en una pantalla de computadora, el mensaje es enviado repetidas veces.

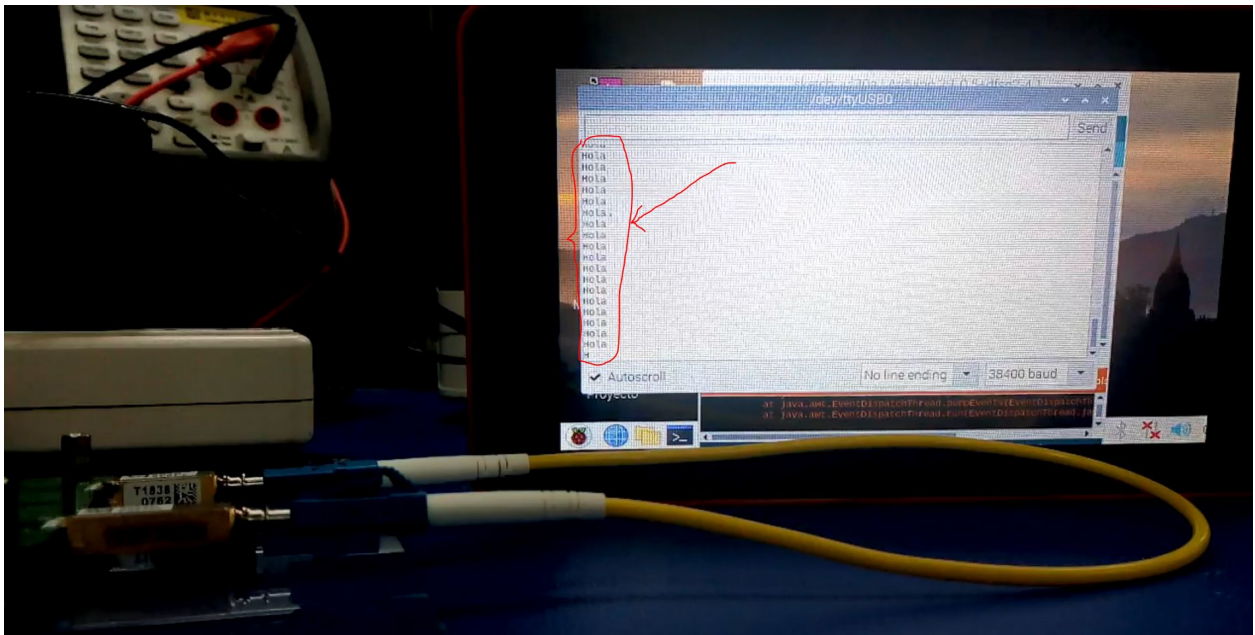


Figura 7.35: Mensaje “Hola” en la pantalla de la computadora.

La Figura 7.36 muestra que al desconectar la fibra se interrumpe el mensaje y también se producen datos erróneos.

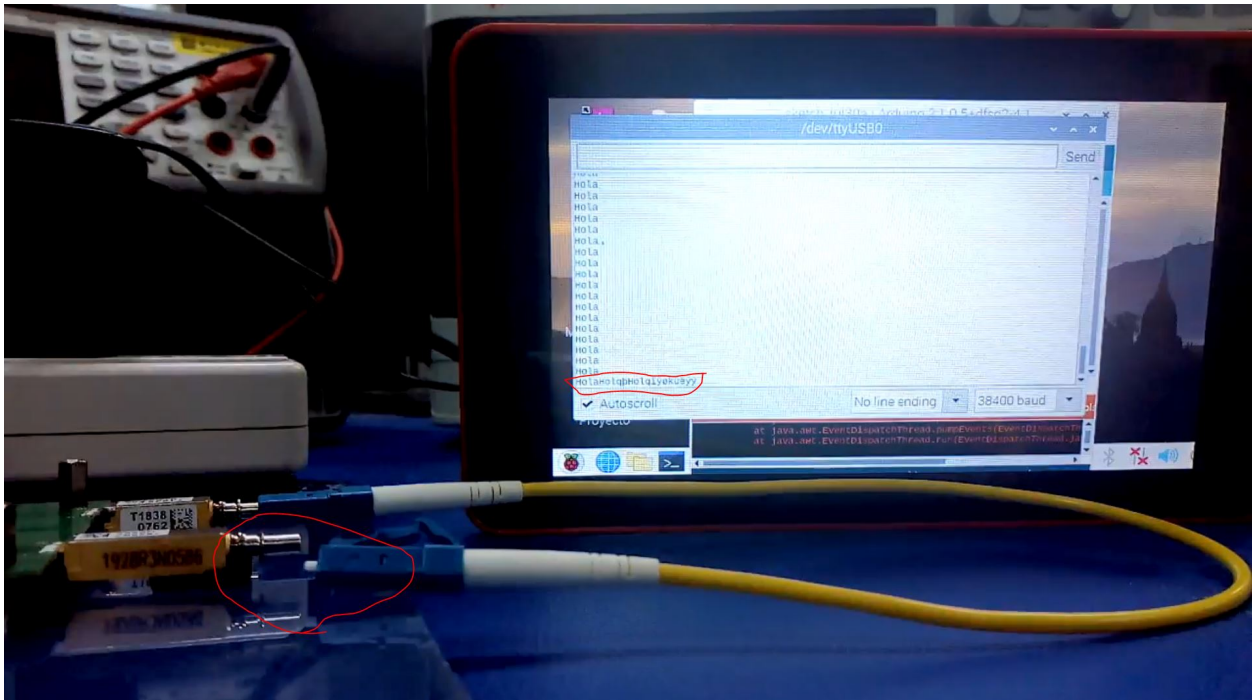


Figura 7.36: Mensaje “Hola” interrumpido al desconectar la fibra.

Conclusiones

El desarrollo teórico y práctico de este trabajo, con enfoque en una plataforma experimental, nos muestra que se puede entender las comunicaciones ópticas a un cierto grado de profundidad, viendo cómo interactúan las señales con el *hardware*, cómo se modifican y cómo viajan a través del *path* óptico. El entendimiento de esta sección de transmitir y recibir por medio de un TOSA y ROSA, ayudó a que el personal técnico de la empresa en que laboro, adquirieran la habilidad para poder deducir las causas de fallas en diferentes modelos de módems ópticos, con esto reducir el inventario de fallas y recuperar ganancias significativas para la empresa. Así mismo, mantener la confianza en el cliente para futuros productos que se den a manufacturar a la empresa. Se concluye que una plataforma experimental ofrece un entrenamiento completo y por encima de lo teórico, con buenos resultados en el *debug* de fallas en los módems ópticos.

El desarrollo de este trabajo represento para mí un crecimiento profesional, aumentando mis habilidades en el entendimiento de las comunicaciones ópticas y en la forma de transmitir el conocimiento a personal técnico.

El estudiar la maestría en diseño electrónico me ayudo a tener una capacidad de análisis superior a la adquirida en la ingeniería, las materias y los profesores del ITESO me ayudaron a conocer en profundidad las arquitecturas y diseños en electrónica que son relevantes en el campo en el que laboro. Con este conocimiento adquirido y transmitiéndolo a todo el personal técnico, se pretende incrementar el nivel de manufactura en electrónica en Jalisco.

Apéndice

A. TOSA Datasheet

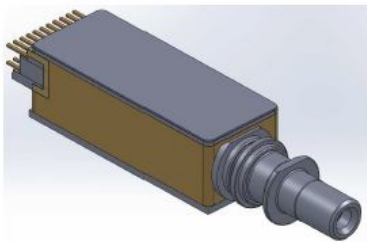


Preliminary Datasheet

TOSA for 100GBASE-LR4 and OTU4

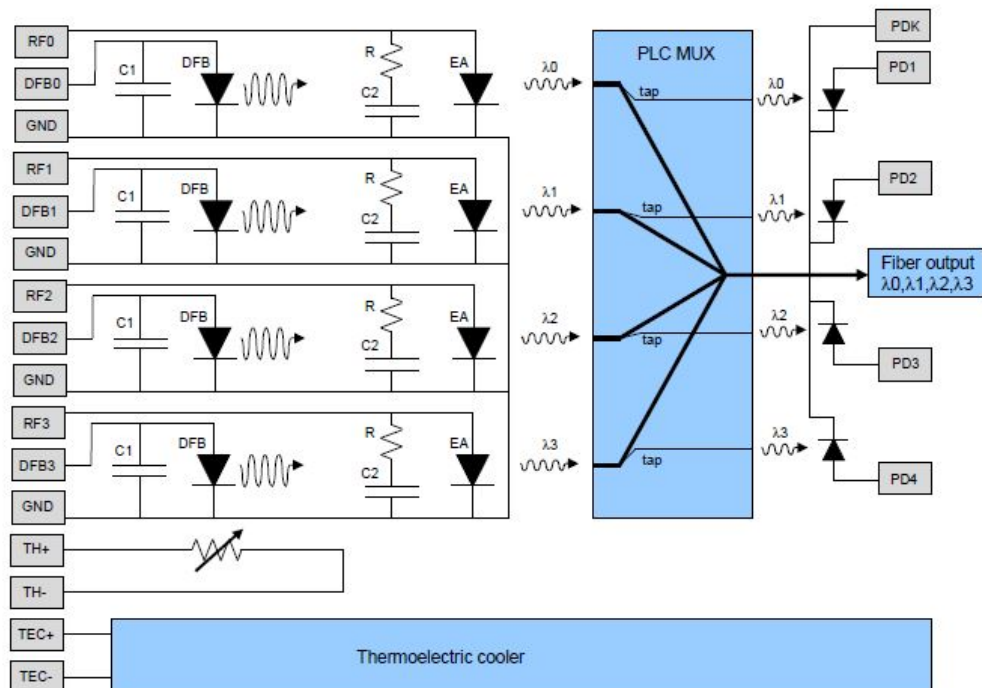
JDSU PN: 22023485-002

Key Features



- Small form factor for integration into CFP2, CFP4, and QSFP+28 form factor modules
- Supports both 25.78125Gb/s (100GBASE-LR4) and 27.9525Gb/s (OTU4) signal rates
- Four externally modulated DFB lasers (EML) on a LAN-WDM grid (800GHz spacing) located in the range 1294~1310nm
- Integrated 4:1 optical LAN-WDM multiplexer
- Optical taps in optical mux for power monitoring
- Thermo-Electric Cooler (TEC)
- Integrated Optical Isolator
- Hermetic package with high-speed ceramic feed through
- LC single mode (9/125um) fiber receptacle
- -5 to +75C operating case temperature

Functional Block Diagram



Absolute Maximum Rating

Parameter	Symbol	Min	Max	Units	Notes
DFB Laser Forward Current	I_{DFBAMR}		180	mA	
DFB Laser Reverse Voltage	V_{DFBAMR}		2	V	
EA Modulator Forward Voltage	V_{FEAAMR}		0	V	
EA Modulator Reverse Voltage	V_{REAAMR}		4	V	
EA Modulator Reverse Power	P_{EAAMR}		120	mW	
Photodiode Forward Current	I_{FPDAMR}		10	mA	
Photodiode Reverse Voltage	V_{RPDAMR}		25	V	
Photodiode Reverse Current	I_{RPDAMR}		10	mA	
Operating Case Temperature	$T_{CASEAMR}$	-5	75	°C	
Storage Case Temperature	T_{STGAMR}	-40	85	°C	
Process Temperature	$T_{PROCESS}$		125	°C	1
Soldering Temperature	T_{SOLDER}		370	°C	2
TEC Current	I_{TECAMR}		1.0	A	
Relative Humidity	RH		95	%	3
ESD Damage Threshold	V_{ESD}	250		V	4

Optical and Electrical Characteristics

Parameter	Symbol	Min	Typical	Max	Units	Notes
TOSA case temperature	T_{CASE}	-5	35	75	°C	1
Laser operating temperature	T_{LASER}	42	45	48	°C	2
Thermistor setpoint	T_{Tune}	38	41.5	45	°C	2
Lane frequencies	f_0 f_1 f_2 f_3		231.4 230.6 229.8 229.0		THz	
Lane wavelengths	λ_0 λ_1 λ_2 λ_3	1294.55 1299.04 1303.56 1308.11	1295.56 1300.05 1304.58 1309.14	1296.57 1301.07 1305.61 1310.17	nm	
Side-mode suppression ratio (SMSR), each lane	SMSR	30			dB	
DFB Laser threshold current	I_{th}		20	25	mA	
DFB Laser operating current	I_{dfb}		75	90	mA	3
DFB Laser operating voltage	V_{dfb}		1.35	1.50	V	
Total modulated launch power (BOL)	P_{total}			10.5	dBm	4
Modulated output power (BOL), each lane	$P_{\lambda,BOL}$	0.0		3.5	dBm	5
Modulated output power (EOL), each lane	$P_{\lambda,EOL}$	-0.6		4.0	dBm	6
Optical Modulation Amplitude (OMA), each lane, BOL	$OMA_{\lambda,BOL}$	-0.5		4.0	dBm	
Optical Modulation Amplitude (OMA), each lane, EOL	$OMA_{\lambda,EOL}$	-1.1		4.5	dBm	7
Difference in launch power between any two lanes (OMA)	P_{DIFF}			5.0	dB	
Fiber wiggle	wiggle			1.0	dB	8
Output power variation at constant photocurrent, each lane (tracking error)	TE	-1.0		1.0	dB	
RIN ₂₀ OMA	RIN_{OMA}			-130	dB/Hz	
Launch power in OMA minus TDP, each lane	$OMA_{\lambda} - TDP_{\lambda}$	-2.3			dBm	
Transmitter and dispersion penalty (TDP), each lane	TDP_{λ}			2.2	dB	9
Back-reflection tolerance	BR_TOL			-20	dB	
Transmitter reflectance	Tx_R			-30	dB	10
Monitor PD photocurrent	I_{PD}	15	70	210	uA	
Monitor PD reverse voltage	V_{PD}	1.0		5.0	V	

Modulator Characteristics

Parameter	Symbol	Min	Typical	Max	Units	Notes
Bit rate (NRZ)	BR	25.78125 +/- 100ppm 27.9525 +/- 20ppm			GBd	1
EA modulator bias voltage	EA_{bias}	-2.8V		-1.0	V	2
EA modulation voltage (p-p)	$EA_{mod,pp}$	1.2			Vpp	3
RF Extinction ratio (BOL)	$ER_{RF,BOL}$	4.5		6.0	dB	
RF Extinction ratio (EOL)	$ER_{RF,EOL}$	4.0		6.5	dB	
Optical eye mask margin	MM	10			%	
E/O bandwidth (-3dB electrical)	S_{21}	20.2	27		GHz	
Electrical low frequency cutoff	f_{min}		40	53	KHz	
RF return loss: 0.1 to 7 GHz	$S_{11, <7GHz}$	11			dB	
RF return loss: 7 to 28 GHz	$S_{11, >7GHz}$	$22.32 - 2.07 \cdot f + 7.20 \cdot 10^{-2} \cdot f^2 - 8.36 \cdot 10^{-4} \cdot f^3$			dB	f in GHz
EA modulator photocurrent	I_{mod}			20	mA	4
RF line impedance	Z		50		Ohms	

TEC and Thermistor Characteristics

Parameter		Symbol	Min	Typical	Max	Units	Notes
Thermistor Current		I_{TC}	10		100	μA	
Thermistor Resistance	T=25°C	R_{THERM}	9.9	10.0	10.1	k Ω	
	T=42°C			4.9083			
	T=45°C			4.3574			
	T=48°C			3.8757			
Thermistor Alpha at T=25°C		α_{LASER}		-4.38		%/°C	
Thermistor Coefficients		C_1 C_2 C_3		1.2156E-3 2.1925E-4 1.5241E-7			1
TEC control loop temp stability					±0.1	°C	2
Thermal Time Constant		τ		5		s	3
Temperature Ramp time		Δt_{ramp}		6		s	4
TEC AC resistance Δ over life		ΔACR			5	%	
			Typ., BOL	Max, BOL	EOL		
TOSA total electrical power dissipation	T _{CASE} = -5°C	P_{TOSA}	-	-	1.55 max	W	
	T _{CASE} =75°C		1.4	2.2	2.30 max		
TEC electrical power dissipation	T _{CASE} = -5°C	P_{TEC}	-	-	0.80 max	W	
	T _{CASE} =75°C		0.9	1.75	1.84 max		
TEC Current	T _{CASE} = -5°C	I_{TEC}	-	-	-0.40 min	A	5
	T _{CASE} =75°C		-	0.6	0.60 max		
TEC Voltage	T _{CASE} = -5°C	V_{TEC}	-	-	-2.00 min	V	5
	T _{CASE} =75°C		-	2.91	3.06 max		

Electrical Pin Assignment

Upper Row Pins	Symbol	Function	Bottom Row Pins	Symbol	Function
Pin1	DFB3	DFB anode, lane 3	Pin12	TH-	Thermistor-
Pin2	PD3	PD anode, lane 3	Pin13	GND	RF GND
Pin3	PD2	PD anode, lane 2	Pin14	RF3	EA anode, lane 3
Pin4	DFB2	DFB anode, lane 2	Pin15	GND	RF GND
Pin5	PD1	PD anode, lane 1	Pin16	RF2	EA anode, lane 2
Pin6	DFB1	DFB anode, lane 1	Pin17	GND	RF GND
Pin7	PD0	PD anode, lane 0	Pin18	RF1	EA anode, lane 1
Pin8	PDK	PD cathode, common	Pin19	GND	RF GND
Pin9	DFB0	DFB anode, lane 0	Pin20	RF0	EA anode, lane 0
Pin10	TEC+	TEC+	Pin21	GND	RF GND
Pin11	TEC-	TEC-	Pin22	TH+	Thermistor+

Note:

1. RF GND is electrically isolated from TOSA package case.
2. The DFB cathodes are electrically connected to RF GND.
3. TEC+ being at a higher voltage than TEC- corresponds to TEC cooling.

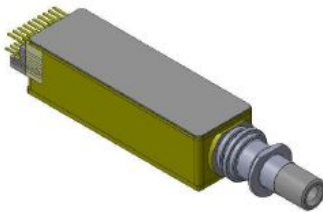
B. ROSA Datasheet



Preliminary Datasheet

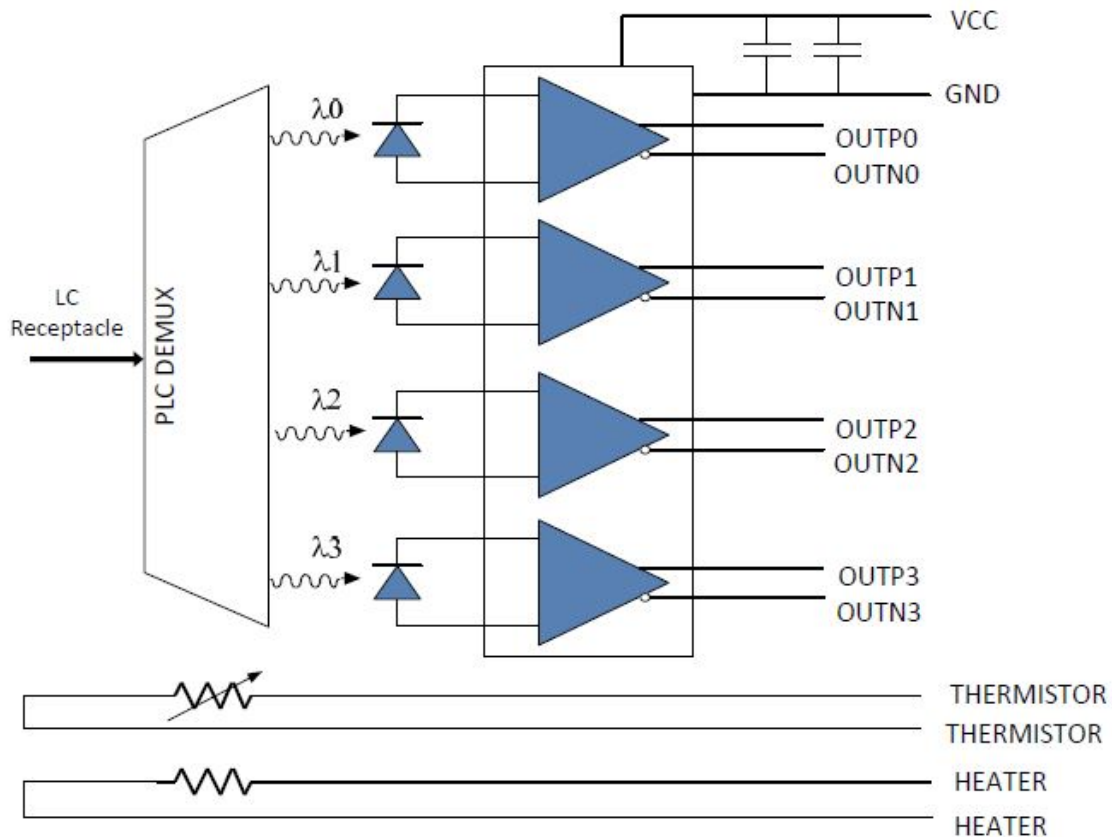
ROSA for 100GBASE-LR4 and OTU4

Key Features



- Small form factor for integration into CFP2, CFP4, and QSFP+28 form factor modules
- Multi-rate Operation
- Support both 25.78125Gb/s (100GBASE-LR4) and 27.9525Gb/s (OTU4) signal rates
- Integrated 1:4 optical LAN-WDM demultiplexer
- RSSI for input signal strength monitoring
- Hermetic package with high-speed ceramic feed through
- Single 3.3V supply
- Low power consumption
- LC single mode (9/125um) fiber receptacle
- -5 to +75C operating case temperature

Block Diagram



Absolute Maximum Rating

Parameter	Symbol	Min	Max	Units	Notes
Power Supply Voltage	V _{CC}	-0.5	4.0	V	
Operating Case Temperature	T _{CASE_AMR}	-5	75	°C	
Storage Case Temperature	T _{STG_AMR}	-40	85	°C	
Soldering Temperature	T _{SOLDER}		370	°C	Note-1
PLC Temperature	T _{PLC_AMR}		85	°C	
PLC Heater Current	I _{PLC_AMR}		1	A	
Relative Humidity	RH		95	%	Note-2
ESD – Data Output pins	ESD	500		V	Note-3
ESD – DC Pins	ESD	1000		V	Note-3
Optical Average Power Damage Threshold per Lane		5.5		dBm	Modulated or un-modulated

Opto-electrical Specifications

Parameter	Sym	Min	Typ.	Max	Unit	Note
Signaling Rate (each lane), LR4		25.78125±100ppm			GB/s	
Signaling Rate (each lane), OTU4		27.9525 ±20ppm			GB/s	
PLC temperature set point	T _{PLC}		65		°C	
Center wavelength – Lane 0	λ ₀	1294.53		1296.59	nm	
Center wavelength – Lane 1	λ ₁	1299.02		1301.09	nm	
Center wavelength – Lane 2	λ ₂	1303.54		1305.63	nm	
Center wavelength – Lane 3	λ ₃	1308.09		1310.19	nm	
Optical Isolation Among Channels	ISO	20			dB	
PDL of optical demux				0.3	dB	

Optical return loss	ORL	26			dB	
Average Receive Power (each lane)				4.5	dBm	1
Receive power, each lane (OMA)				5.5	dBm	
Difference in receive power between any two lanes (Average and OMA)				5.5	dB	
Receiver sensitivity (OMA), each lane, at 25.78 Gbps @ BER= 1E-12				-8.6	dBm	
Stressed receiver sensitivity (OMA), per lane, at 25.78 Gbps @ BER= 1E-12				-6.8	dBm	2
Receiver sensitivity (OMA), per lane, at 27.95 Gbps @ Pre-FEC BER= 1.8E-4				-11	dBm	
Conditions of stressed receiver sensitivity test						
Vertical eye closure penalty, each lane		1.8			dB	2
Stressed eye J2 Jitter, each lane		0.3			UI	
Stressed eye J9 Jitter, each lane		0.47			UI	

Parameter	Electrical Output RF Parameters					
	Sym	Min	Typ.	Max	Unit	Note
Conversion Gain		1600			V/W	At f=1GHz, input OMA= -5.7dBm
OE S21 -3dB small signal BW		18			GHz	Referenced to 100MHz,
OE S21 peaking				3.5	dB	Referenced to 100MHz,
Electrical return loss, f < 12GHz		6			dB	
Output differential voltage			350	700	mV	
Output Common-mode noise			15		mV _{rms}	
Differential Output Termination		90		110	Ω	

Electrical Specification

Parameter	Sym	Min	Norm	Max	Unit	Note
Supply Voltage	V _{CC}	3.135	3.3	3.465	V	
Supply Current	I _{CC}			274	mA	TIA Only
Total TIA Power Consumption	P _{TIA}			950	mW	TIA only
Total ROSA Power Consumption, Steady state	P _{TOSA}			1650	mW	Including PLC heater (max at T _{case} = -5°C)
Output Bias Voltage			2.5		V	Data output pins are DC coupled

RSSI Slope, Pin = -7dBm, Room temperature, BOL	R _{BOLRT}	0.5			A/W	
RSSI Current Offset, No Input Light		2		120	uA	
PLC Heater Resistance		5.5	7	8.5	ohm	BOL
PLC Heater Current				0.7	A	
PLC Heater Power, Steady State				0.7	Watt	

Thermistor Characteristics

Parameter	Sym	Min	Typ	Max	Units	Notes	
Thermistor Current	I _{TC}	10		100	μA		
Thermistor Resistance	R _{THERM}	T=25°C	9.9	10.0	10.1	kΩ	
		T=65°C		2.0682			
		T=75°C		1.4616			
Thermistor Alpha at T=25°C	α		-4.38		% / °C		
Thermistor Coefficients	A		1.2156E-3			1	
	B		2.1925E-4				
	C		1.5241E-7				

Electrical Pin Assignment

Top Row Pins			Bottom Row Pins		
Pin#	Name	Description	Pin#	Name	Description
1	VCC	Power Supply	11	GND	ROSA electrical ground
2	RSSI1	Received signal strength indicator, lane-1	12	OUTP0	Data output, non-inverting, lane-0
3	RSSI0	Received signal strength indicator, lane-0	13	OUTN0	Data output, inverting, lane-0
4	HEATER	PLC heater	14	GND	ROSA electrical ground
5	THERM	PLC temperature thermistor	15	OUTP1	Data output, non-inverting, lane-1
6	THERM	PLC temperature thermistor	16	OUTN1	Data output, inverting, lane-1
7	HEATER	PLC heater	17	GND	ROSA electrical ground
8	RSSI3	Received signal strength indicator, lane-3	18	OUTP2	Data output, non-inverting, lane-2
9	RSSI2	Received signal strength indicator, lane-2	19	OUTN2	Data output, inverting, lane-2
10	GND	ROSA electrical ground	20	GND	ROSA electrical ground
			21	OUTP3	Data output, non-inverting, lane-3
			22	OUTN3	Data output, inverting, lane-3
			23	GND	ROSA electrical ground

Bibliografía

- [1] CIENA, “What is roadm?.” Insights. <https://www.ciena.com/insights/what-is/what-Is-roadm.html> (Consultado 17 Ago., 2024).
- [2] C0pMer, “File:ciena 6500 alt.” wikimedia. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ciena_6500_alt.jpg (Consultado 17 Ago., 2024).
- [3] prooptix, “The history of optical transceiver form factors.” prooptix. <https://www.prooptix.com/news/transceiver-form-factors/> (Consultado 17 Ago., 2024).
- [4] Serway-Jewett, *Física Para Ciencias e Ingeniería con Física Moderna*, vol. 2. Cengage Learning, 7 ed., 2009.
- [5] M. Azadeh, *Fiber Optics Engineering*. Springer, 2 ed., 2009.
- [6] G. Ghione, *Semiconductor Devices for High Speed Optoelectronics*. Cambridge University Press, 1 ed., 2009.
- [7] OFS, “How to speak “fiber geek” | article 2: Dispersion.” ofsoptics. <https://www.ofsoptics.com/how-to-speak-fiber-geek-article-2-dispersion/?srsltid=AfmB0oqdpMzzuygwix1BUBpWFFFIiEs6wf73LWYYHC4PdrCCHsG5sn8> (Consultado 24 Ago., 2024).
- [8] JDSU, “Tosa for 100gbase-lr4 and otu4.” JDSU PN: 22023485-002, Nov. 2015 (Consultado 24 Ago., 2024).
- [9] I. P. Kaminow, *Optical Fiber Telecommunications VI-B, Systems and Networks*. ELSEVIER, 1 ed., 2013.
- [10] S. Karp, *Fundamentals of Electro-Optic System Design*. Cambridge University Press, 1 ed., 2012.
- [11] H. Xenos, “Updated: 800g nothing but the facts.” CIENA. <https://www.ciena.com/insights/articles/800g-nothing-but-the-facts.html> (Consultado 24 Ago., 2024).

- [12] R. O. V. Ariel Leiva L., Marco Tarifeño G., “Effects of polarization mode dispersion (pmd) on propagation of optical pulses in optical fibers,” *Revista chilena de ingeniería*, vol. 15, no. 3, pp. 336–343, 2007.