



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DEL ESTADO DE HIDALGO**



Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
Área Académica de Computación y Electrónica

---

Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

**Señalización multi-nivel en el dominio óptico  
empleando como elemento central  
un amplificador óptico de semiconductor**

**T E S I S**

Para obtener el grado de Ingeniero en Electrónica y  
Telecomunicaciones

**Presenta**

**Saavedra Islas Jaime**

Asesores:

Director Dr. Pérez Cortés Obed

Co Director Dr. Gómez Pozos Heberto

Mineral de la Reforma, Hidalgo, México Noviembre 2017



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**  
**Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería**  
*Institute of Basic Sciences and Engineering*  
**Área Académica de Computación y Electrónica**  
*Computer Science and Electronics Department*

Mineral de la Reforma, Hidalgo, a 16 de octubre del 2017.

**Número de control:** ICBI-AACyE/1856/2017

**Asunto:** Autorización de impresión de Tesis

**PDIET. JAIME SAAVEDRA ISLAS**  
**PRESENTE.**

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado al trabajo de titulación de nombre "SEÑALIZACIÓN MULTI-NIVEL EN EL DOMINIO ÓPTICO USANDO COMO ELEMENTO CENTRAL UN AMPLIFICADOR ÓPTICO DE SEMICONDUCTOR" y que después de revisarlo en reunión de sinodales, han decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado

- PRESIDENTE:** Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas
- PRIMER VOCAL:** Dr. Obed Pérez Cortes
- SEGUNDO VOCAL:** Dr. Heberto Gómez Pozos
- TERCER VOCAL:** Dr. Ruslan Gabbasov
- SECRETARIO:** Dr. Omar López Ortega
- PRIMER SUPLENTE:** Dr. Esteban Rueda Soriano
- SEGUNDO SUPLENTE:** Ing. Claudio Iván Duran Marroquín

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad y mi atenta consideración.

**ATENTAMENTE.**  
**"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"**

**Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas**  
 Coordinador de la Licenciatura en  
 Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones



**Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería**  
**Área Académica de Computación y Electrónica**

EGR/pov



Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5  
 Colonia Carboneras  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184  
 Tel. +52 771 7172000 ext. 8320  
 aacye\_icbi@uaeh.edu.mx

[www.uaeh.edu.mx](http://www.uaeh.edu.mx)

# Dedicatoria

*El presente trabajo,  
es del compromiso constante,  
está dedicado a mi familia  
y todas aquellas personas  
quienes han inculcado sus valores,  
conocimientos, experiencias,  
apoyo y confianza para concluir  
satisfactoriamente este proyecto.  
Por todo eso, Muchas GRACIAS.*

Agradecimiento a

**PROMEPA** a toda la dirección por su  
apoyo otorgado para concluir  
el documento durante el periodo  
Agosto - Noviembre 2017.

**CITIS - UAEH** por la asesoría  
académica brindada por los  
Doctores y sinodales que  
aportaron sus conocimientos  
para sustentar este documento.  
Además a toda la UAEH,  
Ingenieros(as), Licenciados(as)  
y Catedráticos quienes  
mostraron sus diferentes  
personalidades para hacer más  
amena mi estancia.  
Todo esto, propicio la motivación  
para la ejecución de la  
presente investigación. Gracias...

# Resumen

En este trabajo de tesis se propone el diseño y se realiza la simulación de un sistema electro-óptico que realiza la función de señalización multinivel en el dominio óptico. Tal función es una de las operaciones requeridas para la implementación del procesamiento de la información en los sistemas de telecomunicaciones ópticos.

El diseño propuesto tiene como elemento central al Amplificador Óptico de Semiconductor (SOA) por sus siglas en inglés; se explotan dos fenómenos no lineales que se suscitan en este: la modulación cruzada de la ganancia (XGM) y la modulación cruzada de la polarización (XPolM).

El diseño se basa en una arquitectura *control-prueba* y un polarizador lineal, en el que la señal de control la conforman dos señales ópticas digitales binarias y la señal de prueba es una señal en la cual se codifica la información de las dos primeras. Al propagarse la señal de *control* por el SOA se modifican las propiedades físicas de este último, por medio de la XGM y XPolM, lo que conlleva a cambios en las componentes del campo electromagnético de la señal de *prueba*, los cuales se traducen en cambios en su intensidad cuando esta pasa por el polarizador lineal.

El diseño se implementó en el software *VPI-photonics*, y se realizó un estudio sistemático que permitió establecer los valores de longitud de onda y potencia para las señales de *control y prueba*. Se encontró que a pesar de que los fenómenos de interés, XGM y XPolM, se acentúan conforme la potencia de la señal de *control* lo hace, el efecto combinado de ambos con el polarizador lineal provoca el efecto opuesto al deseado. La señal de *control* representa la entrada al sistema propuesto mientras que la señal de *prueba* es la salida. Dado que la señal de control está formada por dos señales digitales binarias, existen cuatro posibles combinaciones de esta a la entrada del sistema, a saber 00, 01, 10 y 11, para cada una de ellas la potencia de salida de la señal de *prueba* adquiere un nivel diferente. Esta aplicación funcional permitirá incrementar la eficiencia espectral de los sistemas de telecomunicaciones ópticos.

Palabras clave:**Procesamiento de información en el dominio óptico, SOA, XGM, XpolM, Eficiencia espectral.**

# Abstract

In this thesis work the design is proposed and the simulation of a electro-optical system that performs the function of multilevel signaling in the optical domain. This function is one of the operations required for the implementation of information processing in optical telecommunications systems.

The proposed design has as a central element the Optical Semiconductor Amplifier (SOA, for its acronym: Semiconductor Optical Amplifier); two phenomena that arise in this are exploited: the cross-modulation of the gain (XGM) and the cross-polarization modulation (XPolM). The design is based on a *control-test* architecture and a linear polarizer, in which the control signal is made up of two binary digital optical signals and the test signal is a signal in which the information of the signals is encoded. first two. When the signal of *control* is propagated by the SOA, the physical properties of the SOA are modified, by means of the XGM and XPolM, which leads to changes in the components of the electromagnetic field of the signal of *test*, which translates into changes in its intensity when it passes through the linear polarizer.

The design was implemented in the software *VPI-photonics*, and a systematic study was carried out that allowed to establish the values of wavelength and power for the signals of *control and test*. It was found that although the phenomena of interest, XGM and XPolM, are accentuated as the power of the *control* signal does, the combined effect of both with the linear polarizer causes the opposite effect to the desired one. The signal of *control* represents the input to the proposed system while the signal of *test* is the output. Since the control signal is formed by two binary digital signals, there are four possible combinations of this at the input of the system, namely 00, 01, 10 and 11, for each of them the output power of the signal of *test* acquires a different level. This functionality application which would allow to increase the spectral efficiency of the opticals telecommunications systems.

keywords: **Information processing in the optical domain, SOA, XGM, XpolM, spectral efficiency.**

# Índice general

|   |           |
|---|-----------|
| Dedicatoria . . . . .                                       | III       |
| Resumen . . . . .   | V         |
| Abstract . . . . .  | VII       |
| Índice general . . . . .                                    | IX        |
| Índice de figuras . . . . .                                 | XI        |
| Índice de tablas . . . . .                                  | XIII      |
| <b>1. Introducción</b>                                      | <b>1</b>  |
| 1.1. Planteamiento del problema . . . . .                   | 3         |
| 1.2. Objetivo general . . . . .                             | 3         |
| 1.3. Objetivos particulares . . . . .                       | 4         |
| 1.4. Metodología . . . . .                                  | 4         |
| 1.5. Organización de la tesis . . . . .                     | 5         |
| <b>2. Marco teórico</b>                                     | <b>7</b>  |
| 2.1. Fundamentos del dispositivo SOA . . . . .              | 7         |
| 2.2. Principios básicos de amplificación óptica . . . . .   | 10        |
| 2.2.1. Inversión de población . . . . .                     | 13        |
| 2.3. Materiales . . . . .                                   | 14        |
| 2.4. Modulación Cruzada de la Ganancia . . . . .            | 15        |
| 2.5. Modulación Cruzada de la Polarización . . . . .        | 17        |
| 2.5.1. Polarizador lineal . . . . .                         | 21        |
| <b>3. Desarrollo metodológico</b>                           | <b>23</b> |
| 3.1. La función óptica de señalización multinivel . . . . . | 23        |
| 3.2. Diseño del sistema óptico experimental . . . . .       | 26        |
| 3.3. Caracterización de la XGM . . . . .                    | 27        |
| 3.4. Caracterización de la XPolM . . . . .                  | 31        |
| <b>4. Resultados</b>  | <b>35</b> |
| 4.1. Introducción . . . . .                                 | 35        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.2. Sistema óptico en el simulador <i>VPI-photonics</i> . . . . . | 38        |
| 4.3. El efecto XGM . . . . .                                       | 41        |
| 4.4. El efecto XpolM . . . . .                                     | 43        |
| 4.5. Resultado combinado con XGM y la XpolM . . . . .              | 46        |
| <b>5. Conclusiones</b>   | <b>49</b> |
| 5.1. Conclusiones . . . . .  | 49        |
| 5.2. Contribuciones . . . . .                                      | 51        |
| 5.3. Trabajo futuro . . . . .                                      | 52        |
| <b>Bibliografía</b>  | <b>53</b> |

# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| 1.1. Evolución del producto BL a través del tiempo. Figura adaptada de “Fiber-Optic Communication”de Agrawal Govind P. 2010, Wiley, pp 3.                     | 2  |
| 2.1. Representación básica de un dispositivo SOA. Figura adaptada de“Semiconductors Opticals Amplifiers”de Michael J. Conelly P.2004, Kluwer, pp 8. . . .     | 8  |
| 2.2. Representación básica de las estructuras SOA. Figura adaptada de “Semiconductors Opticals Amplifiers”de Michael J. Conelly P.2004, Kluwer, pp 8. . . . . | 9  |
| 2.3. Forma de onda de los espectros SOA. Figura adaptada de“Semiconductors Opticals Amplifiers”de Michael J. Conelly P.2004, Kluwer, pp 8. . . .              | 10 |
| 2.4. Representación de la absorción estimulada. . . . .   | 11 |
| 2.5. Representación de la emisión espontanea. . . . .   | 12 |
| 2.6. Representación de la emisión estimulada. . . . .   | 12 |
| 2.7. Representación básica de la inversión de población. . . . .  | 13 |
| 2.8. Estructuras básicas de los dispositivos SOA . . . . .  | 14 |
| 2.9. Esquema de propagación <i>prueba/control</i> en un SOA. . . . .  | 16 |
| 2.10. Representación de la propagación del haz de luz a un SOA. . . . .   | 17 |
| 2.11. Algunos estados de polarización localizados sobre la esfera de Poincaré.  | 19 |
| 2.12. Rotación angular del estado de polarización del haz de prueba en función de la intensidad del haz de control en la esfera de Poincaré . . . .           | 20 |
| 2.13. Propagación de un haz de luz a través de un polarizador. . . . .  | 22 |
| 3.1. Bosquejo de la función multinivel. La información contenida en dos señales digitales (entrada), es mapeada a una señal de 4 niveles (salida).            | 24 |
| 3.2. Representación de la salida final de la función planteada. . . . .   | 25 |
| 3.3. Diagrama del sistema óptico propuesto. . . . .   | 26 |
| 3.4. Esquema del arreglo propuesto . . . . .  | 28 |
| 3.5. Representación del arreglo en el simulador <i>VPI-photonics</i> . . . . .  | 29 |
| 3.6. Curva del comportamiento del efecto XGM en el SOA. . . . .   | 30 |
| 3.7. Diagrama del arreglo propuesto. . . . .  | 31 |



---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.8.  | Representación del arreglo óptico en el simulador. . . . .                       | 32 |
| 3.9.  | Puntos de los estados de polarización en la esfera de Poincaré. . . . .          | 33 |
| 3.10. | Resultado de la caracterización de la XpolM. . . . .                             | 34 |
| 4.1.  | Ancho de banda a diferentes velocidades de transmisión digital. . . . .          | 36 |
| 4.2.  | Función de transferencia que emerge del polarizador lineal. . . . .              | 37 |
| 4.3.  | Representación del sistema óptico en el simulador <i>VPI-photonics</i> . . . . . | 39 |
| 4.4.  | Representación de la potencia $P(Cw)$ despues del SOA. . . . .                   | 42 |
| 4.5.  | Localización de los estados de polarización en la esfera de Poincaré. . . . .    | 44 |
| 4.6.  | Representación de la rotación angular debido a la XpolM. . . . .                 | 45 |
| 4.7.  | Representación de la salida del sistema óptico. . . . .                          | 47 |

# Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Parámetros de Stokes de algunos estados de polarización. . . . .       | 18 |
| 3.1. Salida del sistema en función de las combinaciones de entrada. . . . . | 24 |
| 3.2. Mediciones obtenidas en el simulador. . . . .                          | 30 |
| 4.1. Valores de potencia para la implementación del sistema óptico. . . . . | 40 |
| 4.2. Valores de potencia antes del polarizador lineal. . . . .              | 41 |
| 4.3. Valores de la rotación angular antes del polarizador limeal. . . . .   | 43 |
| 4.4. Potencia de salida del sistema óptico. . . . .                         | 46 |
| 4.5. Porcentaje de salida del sistema óptico. . . . .                       | 48 |

# Capítulo 1

## Introducción

Los sistemas de telecomunicaciones actuales se enfrentan a dos retos principalmente: el número de usuarios y el ancho de banda requerido; ambos creciendo de manera acelerada gracias a la diversificación de los servicios ofrecidos por los distribuidores y a la convergencia de diferentes tecnologías; todo esto consecuencia de la globalización. Gran variedad de servicios y contenidos se ofertan en la actualidad por las diferentes empresas de telecomunicaciones y estos son: audio y video de alta fidelidad, televisión de alta definición, video conferencias en tiempo real, explosión del uso de redes sociales, mensajería instantánea, video-llamadas en diferentes plataformas, llamadas por wifi entre otros. Todo ocasionado por la potencialidad de las computadoras, la digitalización de las redes, la expansión de la telefonía móvil y nuevas tecnologías que propician cambios radicales en la infraestructura de las redes de telecomunicaciones. También, el empleo del ciberespacio por excelencia como el Internet que satisface las necesidades y actividades cotidianas de los usuarios y son los responsables directos del aumento de banda ancha en las redes de telecomunicaciones; estos en constante crecimiento teniendo cerca de 3,739,698,500 millones de suscriptores a nivel mundial[1]. Las empresas dedicadas y encargadas de los servicios de telecomunicaciones consideran un futuro incierto si emplean y conservan la misma tecnología para cumplir con la demanda. No obstante, la tecnología óptica se presenta como la alternativa para hacer frente a los retos mencionados. De hecho hoy en día, está disponible ofreciendo un mayor ancho de banda comparado con el que ofertan otros sistemas de telecomunicaciones<sup>1</sup> a pesar de que su potencial no es explotado al máximo. Si bien, un sistema de telecomunicaciones basado en fibra óptica posee un producto  $BL^2$  del orden de  $10^{12}$  bps-km mientras que un sistema basado en cable coaxial es de  $10^5$  bps-km o uno basado en microondas de  $10^6$  bps-km, este podría incrementarse si el procesamiento de la información se realiza en el dominio óptico y no en el dominio eléctrico como

---

<sup>1</sup>Cable coaxial, satélites, microondas, etc.

<sup>2</sup>B tasa de transmisión (medida en bits por segundo, bps) y L longitud del enlace (medida en km.)

se realiza en la actualidad. En la figura 1.1 muestra la aparición de las diferentes tecnologías utilizadas para satisfacer las necesidades de comunicación.

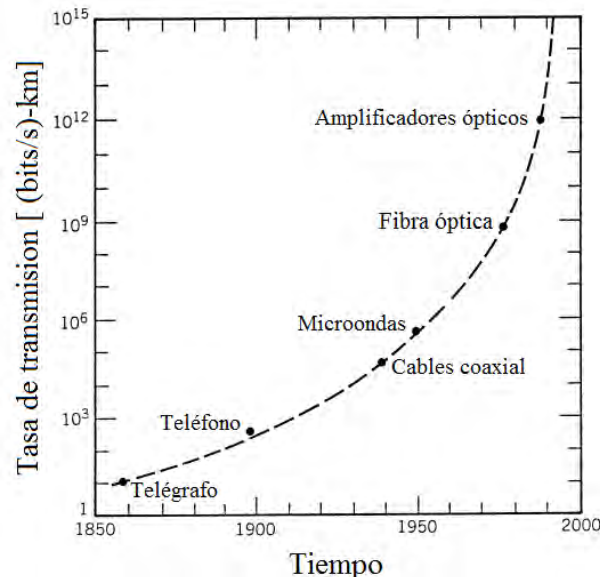


Figura 1.1: Evolución del producto BL a través del tiempo. Figura adaptada de “Fiber-Optic Communication” de Agrawal Govind P. 2010, Wiley, pp 3.

El procesamiento de información se refiere a la ejecución de los protocolos de comunicaciones, que hacen posible que exista un circuito de comunicación entre el usuario A y el usuario B dentro de una red de telecomunicaciones compleja (millones de usuarios todos ellos interconectados). En los sistemas actuales las funciones requeridas para implementar dichos protocolos se realizan en el dominio eléctrico, es decir, por medio de equipo electrónico. Dicho con otras palabras, en los sistemas de telecomunicaciones actuales únicamente la transmisión de información se realiza en el dominio óptico, el resto se realiza en el dominio eléctrico. El procesamiento de la información involucra muchas funciones, para aclarar lo que significa tome por ejemplo una de más elementales: la amplificación. Esta actualmente ya se realiza en el dominio óptico, es decir, existe un dispositivo<sup>3</sup> que tiene como entrada una señal óptica y que a su salida se tiene una mayor ganancia de la señal de entrada. No obstante, hasta 1988 esta función elemental se realizaba en el dominio eléctrico. Esto significa que en un nodo donde se requería amplificar la señal, en primer lugar esta debía convertirse a una señal eléctrica<sup>4</sup> y con esta modular otro láser de potencia adecuada para después reenviarla por la fibra óptica.

<sup>3</sup>Por ejemplo, un EDFA es un amplificador óptico que transmite a largas distancias la información

<sup>4</sup>Por medio de un foto detector

Esto implica tres procesos: primero convertir la señal del dominio óptico a eléctrico, segundo hacer con la información aquello que se desea y finalmente volver a convertirla a forma de luz. Este proceder hace que se invierta tiempo e infraestructura en la conversión óptico-electrónico y viceversa, lo que, visto desde muchos puntos de vista, es ineficiente o indeseable. Entonces el procesamiento de información en el dominio óptico no es otra cosa que evitar el paso de conversión del dominio óptico al dominio eléctrico en repetidas ocasiones.

Algunas de las funciones requeridas actualmente para el procesamiento de la información son: conversión de longitud de onda, ecualización de amplitud, compensación de dispersión, recuperación de reloj, conversión de formato NRZ a RZ, almacenamiento, operaciones booleanas, operaciones aritméticas, extracción e inserción de segmentos de bits en una secuencia, etc. Otra función requerida, y que se aborda en este trabajo de tesis, es la señalización multinivel; esta permitiría entre otras cosas implementar la técnica de multicanalización en la amplitud, la cual incrementaría la eficiencia espectral de un sistema de telecomunicaciones óptico.

## 1.1. Planteamiento del problema

Los sistemas de telecomunicaciones actuales se denominan opacos ya que la transmisión de información se realiza en el dominio óptico y el procesamiento de la información en el dominio eléctrico. El reto actual es diseñar e implementar sistemas que eventualmente permitan el procesamiento de la información en el dominio óptico.

En este sentido se plantea la necesidad de contar con un sistema que permita implementar la señalización multinivel, es decir, codificar en la amplitud de una señal la información de dos señales digitales binarias, que representan información de dos usuarios. Esta funcionalidad puede formar parte de otro sistema que realice otra función o por si solo puede emplearse en una aplicación directa<sup>5</sup>.

## 1.2. Objetivo general

Diseñar y simular un sistema electro-óptico que permita codificar la información de dos señales digitales binarias ópticas (entrada) en la amplitud de una tercera señal también óptica (salida). El diseño propuesto tiene como elemento central un SOA y un polarizador lineal. Dado que las entradas al sistema son dos señales binarias ópticas, entonces existirá una y solo una de las cuatro posibles combinaciones en cualquier instante (00, 01, 10, 11) que forman al haz de control, la señal óptica que contendrá la información de ambas tendrá el papel del haz de prueba.

---

<sup>5</sup>Como la multicanalización en el dominio de la amplitud

Esto, será posible mediante el esquema de propagación *control/prueba* que permite la manipulación de diversos parámetros del haz de prueba en función de la potencia del haz de control. Efectivamente, como la intensidad del haz de control aumenta, la XGM suprime más la potencia del haz de prueba a la salida del SOA y por otro lado, la XpolM hace un cambio en el estado de polarización del haz de prueba, que eventualmente será la salida del sistema. Aunque, los fenómenos son antagónicos predecirán que valores de potencia y longitudes de onda de las señales binarias ópticas de entrada serán introducidos al dispositivo SOA, que eventualmente se conviertan en cambios de potencia por el polarizador. Esto, será posible mediante el software *VPI-photonics* que simulará el diseño propuesto y se corroborará el desempeño de este. Esta funcionalidad tiene aplicaciones en el procesamiento de la información en el dominio óptico, particularmente en la multicanalización en amplitud; esta última permitiría incrementar la eficiencia espectral en las redes de telecomunicaciones ópticas.

### 1.3. Objetivos particulares

- Selección de un SOA de las librerías del software *VPI-photonics* en el que se presenten los fenómenos de interés, XGM y XPolM.
- Caracterización de dispositivos pasivos en el simulador (controladores de estado de polarización, polarizador lineal) y activos (láser y SOA, principalmente).
- Estudio del fenómeno de la XGM y XPolM en arquitectura control-prueba empleando el simulador *VPI-photonics*
- Recolección y análisis de datos en el software R del fenómeno de la XPolM con el formalismo de Stokes.
- Determinación de las intensidades y longitudes de onda de la señal de prueba y control que maximicen la tasa de extinción.

### 1.4. Metodología

Se emplea el simulador *VPI-photonics* para caracterizar el comportamiento de los fenómenos involucrados, XGM y XPolM, a fin de determinar el efecto de cada uno de estos por separado. Posteriormente determinar bajo qué condiciones de longitud de onda y potencia (tanto para la señal de prueba, como para los niveles de potencia que representarán al uno y cero lógico de la señal de control) se obtiene la menor compresión debido a la XGM y la mayor rotación debido a la XPolM. Conjuguar estos resultados para determinar la región en que el sistema presente un comportamiento lineal.

## 1.5. Organización de la tesis

El resto de la tesis está organizada de la siguiente manera:

- Capítulo II.- En el capítulo se expone los principales fundamentos del SOA, la teoría de su principio de operación y una breve descripción de la fenomenología que es propiamente del dispositivo SOA.
- Capítulo III.- El capítulo describirá la función de señalización multinivel, que da un paso para implementarla en el sistema óptico planteado. Además, un bosquejo del comportamiento del dispositivo SOA mediante el simulador *VPI-photonics*.
- Capítulo IV.- En el capítulo se recopilan los resultados obtenidos del sistema óptico que fueron extraídos del simulador *VPI-photonics* y son plasmados mediante tablas y graficas respectivamente.
- Capítulo V.- Finalmente, el capítulo proporciona las principales conclusiones de este trabajo de tesis, que dan sustento a lo planteado en el objetivo general.

# Capítulo 2

## Marco teórico

El presente capítulo recopila los aspectos más importantes del dispositivo SOA y estos son: los antecedentes históricos, las principales estructuras, su principio de operación y la fenomenología (XGM y la XpolM) propia del dispositivo. Estos últimos representan las columnas principales que dan sustento a este trabajo de tesis.

### 2.1. Fundamentos del dispositivo SOA

Los primeros estudios sobre el dispositivo SOA se llevaron a cabo en la época de la invención del láser semiconductor en la década de los 60's. En el transcurso de la década de los 70's se iniciaron los primeros trabajos sobre el SOA, a tal grado, que atrajo mucho más interés en las investigaciones.

Antes del año de 1989, hubo avances importantes sobre el diseño y modelado del SOA, que se basaron en diodos laser de semiconductor con recubiertos anti reflejantes. En el año 1989, el SOA comenzó a ser diseñado en su propia estructura, con el empleo de estructuras basadas en guía de ondas más simétricas; lo que producían mínimas perturbaciones de polarización al haz de luz incidente.

Desde entonces, el diseño y desarrollo del dispositivo SOA, están progresando a la par con los diferentes materiales semiconductores que son empleados para la fabricación de dispositivos ópticos, la tecnología en recubrimiento anti reflectantes, envases y circuitos integrados fotónicos. [4, 10].

La definición que describe al amplificador óptico semiconductor SOA, por sus siglas *Semiconductor Optical Amplifier* es un dispositivo opto-electrónico similar a un láser de semiconductor, excepto que carece de cavidad resonante (sin paredes laterales reflejantes), su tamaño es reducido y bajo consumo de potencia, con un espectro de ganancia no lineal; su funcionalidad principal es de amplificar un haz de luz [10].



Un diagrama esquemático del dispositivo SOA es presentado en la figura 2.1, que muestra las principales partes de este amplificador óptico.

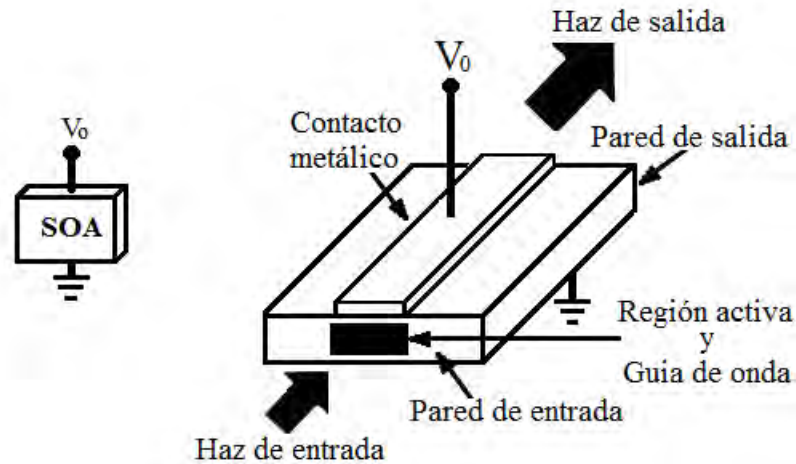


Figura 2.1: Representación básica de un dispositivo SOA. Figura adaptada de “Semiconductors Optical Amplifiers” de Michael J. Connelly P.2004, Kluwer, pp 8.

De manera particular, la arquitectura del SOA está basada en una guía de ondas, que se utiliza para limitar la propagación de la onda de luz que viajaba por la región activa y que también produce sensibles y fuertes estados de polarización. La región activa tiene la capacidad de impartir ganancia óptica a una señal de luz de entrada. Sin embargo, la región activa tenía un confinamiento óptico tan débil que parte de la señal de luz se fugaba por las paredes del material semiconductor, que provoca la reducción de la ganancia óptica del dispositivo. Su principio de operación es tan solo inyectarle una corriente eléctrica mediante un contacto metálico insertado en la superficie del semiconductor; lo que es suministrada por medio de una fuente externa de voltaje ( $V_0$ ). Desde ese momento que se alimenta de corriente origina una emisión de radiación no lineal de forma progresiva y un limitado espectro de ganancia [10]. En general, el dispositivo SOA se puede dividir en dos clases: El primero, Fabry-Perot SOA es diseñado con una estructura similar a un diodo laser de semiconductor, ya que posee una cavidad resonante con dos paredes reflejantes fijadas a las caras laterales del semiconductor; lo que significaba que gran parte de la luz generada volvía a la cavidad interna. Es decir, el haz incidente se amplifica como también hace muchas pasadas por el dispositivo que dan origen a la emisión de ondas luminosas de un haz muy intenso y la radiación de luz infrarroja.

En cambio, un SOA es similar a un diodo láser de semiconductor, pero carece de cavidad resonante. Es decir, sin paredes reflejantes en la cavidad interna del material semiconductor. En el momento que se propaga un haz de luz se amplificaba de forma progresiva y sin reflexiones de las ondas luminosas por parte de la cavidad interna o eran insignificantes. Es decir, el haz de luz solo sufre una sola pasada por el amplificador[10]. Estas dos clases de estructuras son mostradas en la figura 2.2.

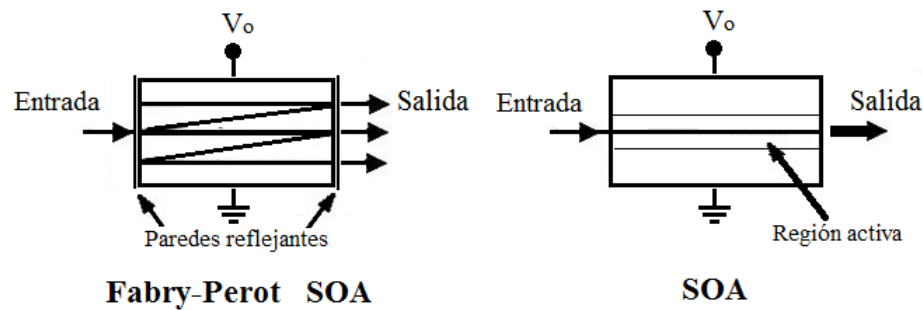


Figura 2.2: Representación básica de las estructuras SOA. Figura adaptada de “Semiconductors Optical Amplifiers” de Michael J. Connelly P.2004, Kluwer, pp 8.

Una característica de los SOA es que poseen un propio espectro de ganancia que depende del diseño y modelado de su estructura interna; lo que limitaba el ensanchamiento espectral a una cierta región donde se podía propagarse un haz de luz.

La forma espectral de los dispositivos SOA se clasifica en dos tipos:

Primero, el SOA tiene un comportamiento de radiación no lineal progresiva, con un ancho espectral que es delimitado por la cavidad interna del dispositivo. La banda óptima espectral es donde se propagan ciertas longitudes de onda de luz, la cual está determinada por la región activa del SOA a cierta longitud de onda ( $\lambda_0$ ) se encuentra el pico máximo ganancia del espectro. Por otro lado, el dispositivo Fabry-perot SOA su emisión radiación de luz se presenta de manera similar al SOA con la diferencia que al poseer una cavidad interna con paredes reflejantes. Esto, daba origen a que las ondas luminosas realicen muchas pasadas por la parte interna del amplificador; lo que presentaba un espectro de ganancia con muchos rizados u oscilaciones en la onda progresiva. Los diferentes espectros son representados en la figura 2.3.

Sin embargo, ya existen en la actualidad diversas investigaciones y trabajos de diferentes autores que han nombrado a este tipo de emisión del SOA como la emisión espontánea amplificada (ASE) <sup>1</sup>, como la principal propiedad óptica del SOA, donde se producen los fenómenos no lineales XGM y la XpolM principalmente, que son aprovechados para la aplicación de diversas funcionalidades en el dominio óptico.

<sup>1</sup>Por sus siglas en inglés *amplified stimulated emission*

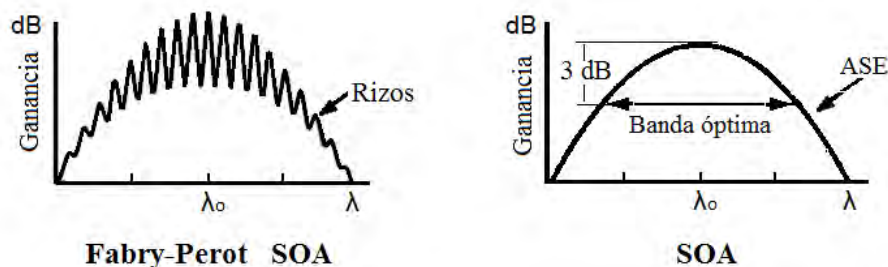


Figura 2.3: Forma de onda de los espectros SOA. Figura adaptada de “Semiconductors Optical Amplifiers” de Michael J. Conolly P.2004, Kluwer, pp 8.

Hoy en día, los avances en tecnología SOA están en desarrollo que puede ser utilizado como una unidad de ganancia general (Algo importante mencionar, es que los valores de ganancia del SOA están en el rango de 5 a 20 dBm, que son típicos de los dispositivos prácticos), sino también con un esencial interés en muchas aplicaciones funcionales como la conmutación óptica, la modulación óptica y la conversión de longitud de onda, el tratamiento de señales ópticas, la elaboración de puertas lógicas, etc. [4, 10]. Debido a los avances en las técnicas de fabricación de semiconductores ópticos y diseño de dispositivos, especialmente en los últimos cinco años, el SOA está mostrando una gran promesa para el ser utilizado en la evolución de las redes de comunicación óptica. El empleo del SOA en circuitos fotónicos integrados (PICs), incluyendo a (transistores) está atrayendo mucho interés de investigación [10].

## 2.2. Principios básicos de amplificación óptica

Para una descripción básica del proceso de amplificación óptica se utilizan modelos relativamente simples para describir las propiedades del material, evitando el uso de cálculos complejos basados en la mecánica cuántica.

Dicho lo anterior, la emisión estimulada es el proceso responsable de las capacidades del dispositivo SOA de amplificar una señal de luz, esta ocurre simultáneamente en la región activa junto con otros dos procesos: la absorción estimulada y la emisión espontánea de fotones. Como se sabe, la energía de los electrones en los materiales semiconductores, puede estar representada en una de las bandas mediante el modelo de bandas de energía. Este contiene dos bandas de energía que son nombradas de siguiente manera: la banda de valencia (BV) a la zona que están concentrados la mayoría de los electrones y la banda de conducción (BC) que contiene la mayor ausencia de electrones que son denominados espacios vacíos o huecos[20, 22].

Cuando el material semiconductor no experimenta una energía externa, la mayoría de los electrones están localizados en la banda de valencia. Sin embargo, cuando se presenta una energía suficientemente fuerte para que los electrones adquieran una energía mayor que la región de gap<sup>2</sup> energía que separa ambas bandas, la energía de estos es representada en la banda de conducción. Como el semiconductor de la región activa del SOA es directo, es decir que si un electrón es excitado por una energía física externa da un salto de la BV a la BC o relajado en la banda de conducción hacia la banda de valencia, que produce una transición vertical que solo puede ir de una banda de energía a otra. Por tal motivo, las bandas de energía se pueden modelar como el modelo de dos niveles diferentes de energía, donde se presentan los procesos antes mencionados [14, 18]. Tomando en cuenta la forma de modelar a las bandas de energía, se puede explicar los procesos de absorción y amplificación dentro de la región interna del SOA. Es decir, cuando un electrón puede pasar de un nivel de energía a otro, emitiendo o absorbiendo una unidad de luz conocida como fotón.

El proceso de absorción estimulada es cuando un fotón de luz con energía suficiente fuerte estimula a un electrón localizado en la banda de valencia provocando la subida o transición de este, que se aloja en un hueco de un nivel de energía superior en la banda de conducción dejando un espacio ausente en la banda de valencia. En este proceso de pérdida mostrado en la figura 2.4, el fotón incidente se extingue.

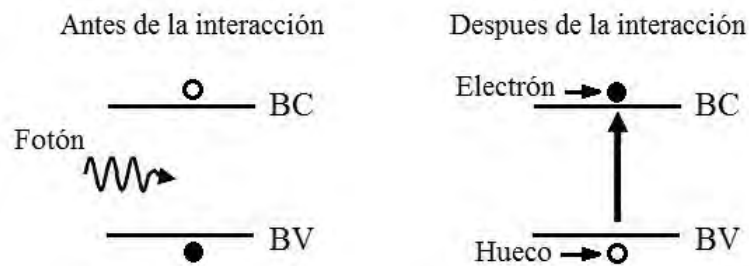


Figura 2.4: Representación de la absorción estimulada.

El otro proceso mencionado, la emisión espontánea ocurre cuando el electrón por la excitación se localiza en la banda de conducción salta hacia un estado de energía desocupado de la banda de valencia. Sin embargo, el proceso de emisión espontánea se desprende energía en forma de un fotón de menor energía que continua con su estado de propagación cambiando de fase y de forma aleatoria<sup>3</sup>, que en cualquier instante es absorbido por alguna banda de energía.

<sup>2</sup>Es la energía adicional que debe imprimirse al electrón para la transición de la banda de valencia a la de conducción

<sup>3</sup>Este tipo de propagación es conocida como la emisión no coherente que se presenta, por ejemplo en un diodo led cuando emite luz

Este proceso de emisión espontánea de un fotón es mostrada en la figura 2.5.

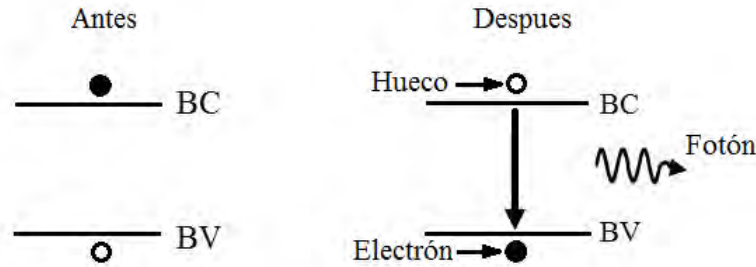


Figura 2.5: Representación de la emisión espontánea.

Finalmente, el proceso de emisión estimulada consiste en la interacción de un fotón con el electrón que se encuentra en un estado excitado de la banda de conducción. El resultado de la interacción deriva que el electrón pierda energía dirigiéndose a la banda de valencia, liberando su exceso de energía en forma de un fotón de energía idéntica al fotón que indujo la transición. Al mismo tiempo, cada fotón describe una onda que viaja a la misma dirección que la generada por el otro fotón produciendo fotones idénticos que conservan la misma fase, frecuencia y dirección de propagación<sup>4</sup>. Este proceso de emisión estimulada se bosqueja en la figura 2.6.

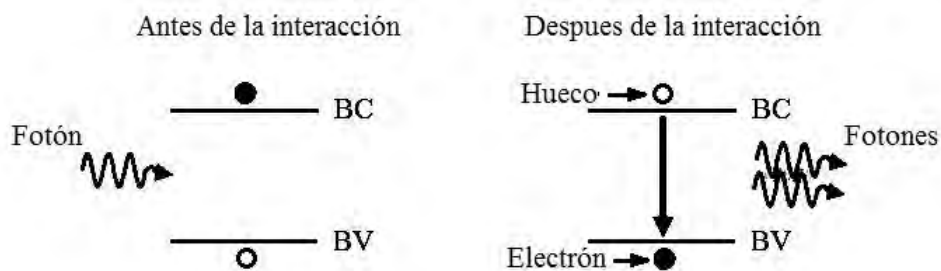


Figura 2.6: Representación de la emisión estimulada.

En conclusión, la ganancia del SOA de amplificar luz está directamente relacionada con el material semiconductor, la fabricación de la estructura de confinamiento que alberga a estos procesos que son: la emisión espontánea y la emisión estimulada que deben predominar sobre la absorción estimulada para que prevalezca la ganancia óptica [23, 22].

<sup>4</sup>El proceso de emisión estimulada produce la emisión coherente que es típica de la emisión de radiación de un rayo láser

### 2.2.1. Inversión de población

La amplificación óptica es un proceso físico determinado por la inversión de población que es el principio vital de los dispositivos amplificadores de luz. En particular, la inversión de población posee dos situaciones: la primera, es mostrada de forma básica en la figura 2.7, que es cuando un SOA no se halla sin ninguna perturbación externa la mayoría de los electrones de la región activa se encuentran en niveles de energía de la banda de valencia. Es común decir, que la banda de valencia este llena de electrones y la banda de conducción vacía de estos.

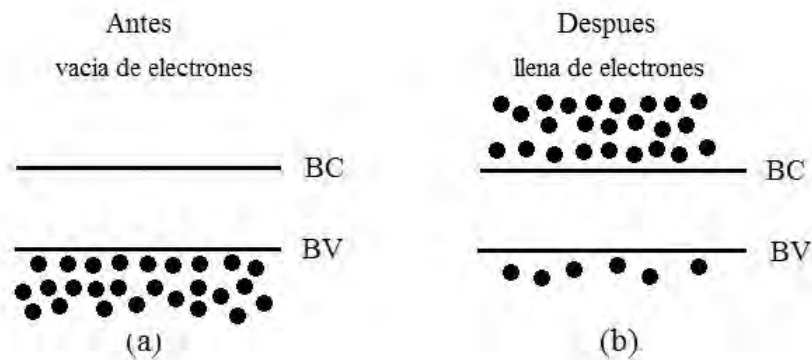


Figura 2.7: Representación básica de la inversión de población.

Sin embargo, cuando al SOA se le suministra una fuente de corriente, los electrones que entran al semiconductor con una alta energía cinética ocupando niveles de energía medio altos de la banda de conducción. Al mismo instante que ingresa un electrón otro es extraído del semiconductor por la ruptura de enlaces de baja energía. Es decir, la corriente inyectada introduce electrones cuya energía es colocada en la banda de conducción y extrae electrones cuya energía estaba representada en la banda de valencia[4]. De hecho, los electrones desprendidos que se colocan en la banda de conducción forman una especie una masa de plasma donde se produce colisiones (electrón-electrón) y (electrón-fonón) la cual permite que niveles bajos de la banda de conducción haya más electrones.

Entonces, en la BC se localizan más electrones que en la BV se tiene la condición de inversión de población que se presenta en la figura 2.7b, como medio capaz de amplificar luz o producir emisión estimulada en el SOA. Por lo que existe un caso contrario, si el número de electrones de la BC es inferior que la BV, no hay inversión de población se tiene la condición de absorción estimulada. Entonces, el mecanismo que da paso de la amplificación y/o absorción de la luz de un SOA es mediante la inyección de corriente eléctrica que provoca la condición de inversión y que mantenga el número de fotones constante [23].

## 2.3. Materiales

Las primeras investigaciones sobre SOA se centraron desde la invención del láser semiconductor a principios de los 60s cuando se fabricaban los primeros láseres de semiconductor. Dando origen a los primeros dispositivos basados en homoestructuras de Arseniuro de Galio (GaAs) que era la unión de materiales semiconductores tipo n y tipo p. La emisión que emitían no producía pulsos altos de potencia y operaban en modo continuo a bajas temperaturas[10, 23]. La estructura básica se muestra en la figura 2.8.

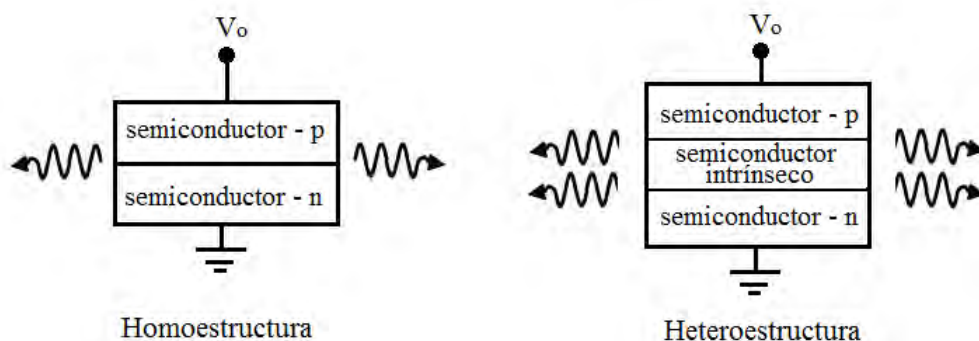


Figura 2.8: Estructuras básicas de los dispositivos SOA

En la década de los 70's, dio la llegada a dispositivos de doble capas denominadas heteroestructuras que eran construidas mediante la unión a diferentes semiconductores<sup>5</sup>. Esto estimuló a una mayor investigación sobre el empleo del SOA en los sistemas de comunicación óptica. Las heteroestructuras poseían propiedades superiores como modo de operación pulsante a altas potencias de pico en emisiones continuas y discontinuas, operan a temperatura ambiente y menores emisiones de calor, mayor emisión a diferentes longitudes de onda y la corriente de consumo era reducida. Por esas razones, las heteroestructuras sustituyen por completo a las homoestructuras [4, 10].

A partir de la década de 80's hubo avances importantes sobre el diseño y modelado de los dispositivos SOA, que se centraron los estudios en las heteroestructuras que empleaban un compuesto (AlGaAs/GaAs SOA) que operaba en el rango de 830 nm, esta longitud de onda tenía un factor de atenuación en fibras ópticas de  $SiO_2$  (óxido de silica) de apenas 2 dB/km (decibeles por km). A finales de los 80s, los estudios sobre materiales de semiconductores dieron paso a la heteroestructura con un compuesto (InP/InGaAsP SOA) apareciendo con un diseño propio que operaba entre las regiones de longitud de onda en el rango de 1300 y 1550 nm respectivamente.

<sup>5</sup> Como el Galio, Arsénico, Aluminio, Indio, Fosforo, Germanio y Silicio entre otros más

Esta región de longitud de onda encontraba un valor mínimo de atenuación para las fibras ópticas de  $SiO_2$  de 0.2 dB/km a 1550 nm y una dispersión muy cercana de cero en la longitud de onda de 1300 nm [19].

Pero, a partir del año de 1989 las estructuras del SOA se construían y diseñaban de manera diferente a los diodos láser de semiconductor integrando películas anti-reflectantes a la cavidad interna que contenía la unión de diferentes materiales semiconductores, la estructura interna era una especie de guía de onda enterrada, el material semiconductor con un índice de refracción elevado, y era altamente sensible al estado de polarización y de ahí surge el SOA [4, 10, 9].

## 2.4. Modulación Cruzada de la Ganancia

En general, referirse al fenómeno no lineal de la Modulación Cruzada de la Ganancia es el resultado de propagarse de forma simultánea dos haces de luz por un SOA. Estos haces son nombrados por diferentes autores en diversas publicaciones de investigación como los detonantes de diversos fenómenos en el SOA, que son denominados: El primero, haz de prueba y el otro haz de control.

Este fenómeno XGM se presenta y es más evidente mediante la arquitectura de propagación *prueba/control* que es el esquema que permite la manipulación de ciertos parámetros de un haz mediante la intensidad de otro haz y cuyas longitudes de onda deben ser distintas al propagarse simultáneamente por un SOA.

De manera particular, bajo el esquema de propagación *prueba/control*, la intensidad del haz de prueba debe ser considerablemente menor que el haz de control a fin de que la perturbación en el SOA, se deba únicamente, y solamente, al haz de control. Por otra parte, la longitud de onda del haz de prueba debe ser una distancia prudente a la longitud de onda del haz de control<sup>6</sup>, para que las propiedades ópticas del SOA no sean afectadas por otros fenómenos no lineales<sup>7</sup> y la perturbación se deba solamente por el haz de control.

Es importante mencionar, cuando el SOA opera bajo condiciones de saturación, la ganancia disponible es distribuida entre ambos haces dependiendo de sus intensidades y longitud de onda. Los cambios de intensidad del haz de control tiene un efecto inverso en sobre la intensidad del haz de prueba.

Tal y como se muestra en el esquema de la figura 2.9. Si sabemos, que bajo el esquema de *prueba/control*, si cuando el haz de control está ausente, la intensidad que observa el haz de prueba es fuerte por lo que la potencia de este haz es elevada. Pero si ambos haces de prueba y control se inciden simultáneamente a un SOA.

<sup>6</sup>La región espectral de trabajo es determinado por la tabla ITU grid banda C que comprende el rango entre las longitudes de onda de 1500nm hasta 1600nm respectivamente[6]

<sup>7</sup>Por ejemplo la mezcla de cuatro ondas



Esto implica que la ganancia disponible para el haz de prueba sea reducida. Por tal condición, la potencia del haz de prueba después del amplificador es menor comparada con el caso en el que está ausente el haz de control.

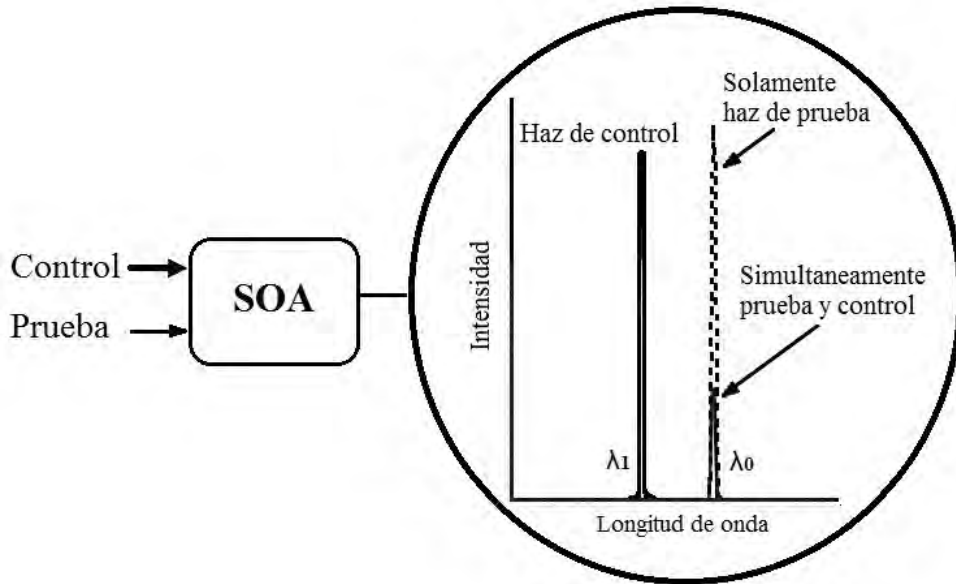


Figura 2.9: Esquema de propagación *prueba/control* en un SOA.

En nuestro caso particular nosotros estaremos solamente interesados en lo que ocurre con la intensidad del haz de prueba que está en función de la intensidad del haz de control. El SOA se utiliza normalmente para amplificar las señales de luz moduladas. Supongamos que si la intensidad del haz de control es modulada en una secuencia de bits, entonces la transferencia de información contenida en el haz de control, al mismo tiempo el haz de prueba también será modulada, con la información del haz de control[4, 10].

Finalmente, bajo la propagación *prueba/control* es el escenario donde se manifiestan diversos no lineales entre los cuales: la Modulación Cruzada de la Ganancia en [25, 7], la Modulación Cruzada de la Polarización en [5, 21], la Mezcla de Cuatro Ondas FWM, acrónimo de four wave mixing en [2, 8] entre otros.

## 2.5. Modulación Cruzada de la Polarización

De manera general, un haz de luz natural o comúnmente onda electromagnética está compuesta de dos ondas planas: la primera, el campo magnético y la otra como el campo eléctrico que ambos campos forman una onda transversal que se propaga de forma ortogonal y elíptica por el espacio.

Para analizar la propagación de un haz a un SOA, el enfoque será únicamente al campo eléctrico del haz de interés. De hecho, el haz que se incide a un SOA posee un estado de polarización que es caracterizado por la orientación de su campo eléctrico  $E$  que se expresa como la suma vectorial de dos componentes que están sujetas a la relación entre las amplitudes y las fases de sus componentes:  $E_x$ ,  $E_y$  y eligiendo un sistema de referencia apropiado, el eje  $Z$  es paralelo a la propagación del haz. Este esquema básico de propagación se muestra en la figura 2.10 de un haz incidente [16, 10].

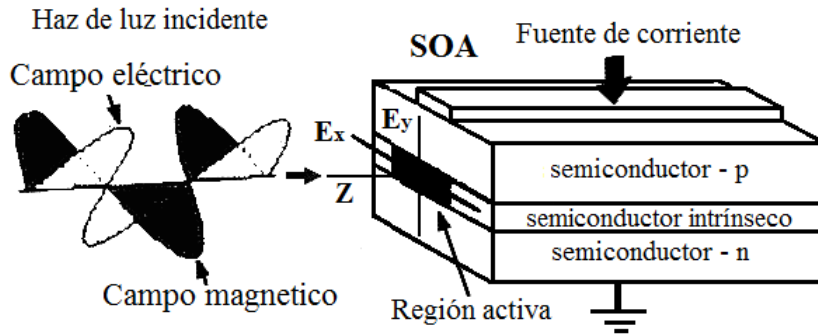


Figura 2.10: Representación de la propagación del haz de luz a un SOA.

El fenómeno no lineal de la modulación cruzada de la polarización XpolM se refiere al cambio en el estado de polarización que adquiere un primer haz cuando la intensidad del otro haz fluctúa simultáneamente un SOA. Es decir, bajo el esquema de *prueba/control*, la intensidad del haz de control perturba las propiedades ópticas del amplificador SOA que cambia las componentes del campo eléctrico, que da el estado de polarización del haz de prueba[21]. De manera particular, la intensidad del haz de control debe ser considerablemente mayor que el haz de prueba y longitudes de onda diferentes a una cierta distancia de separación para que solamente el haz de control cambie el estado de polarización del haz de prueba, lo que causara el efecto del fenómeno de la XpolM.

Por su parte, el efecto XpolM también modifica la birrefringencia de la región activa que se debe al diseño estructural que tiene una arquitectura basada a una guía de ondas, lo que lo vuelve birrefringente al dispositivo SOA.

Ahora bien, la birrefringencia que exhibe los dispositivos ópticos pasivos es un parámetro constante, en un SOA no lo es. Efectivamente, cuando un SOA fluctúa la potencia de un haz perturba los índices de refracción de la región activa que depende de la corriente de inyección, la ganancia óptica que modifica el índice de esta región, siendo los factores más relevantes del amplificador. En particular, para ser el caso de nuestro interés es importante mencionar que la intensidad inducida por el haz de control acentúa el efecto de birrefringencia sobre el haz de prueba modificando las componentes de su campo eléctrico, que da el cambio de estado de polarización [16, 17, 13].

Independiente del mecanismo sea el que bajo ciertas circunstancias domine la manifestación de la XpolM, para cuantificar el efecto que sufre un haz de este fenómeno se emplea el formalismo de Stokes. Es decir, para el estado de polarización del campo eléctrico se definen cuatro cantidades llamadas parámetros de Stokes que se determinan a partir de las amplitudes y fases de las componentes del campo eléctrico del haz. Los parámetros de Stokes se identifican de la siguiente manera: el primero,  $S_0$  la potencia del haz polarizado y los parámetros  $S_1, S_2$  y  $S_3$  son las cantidades de las componentes cartesianas del campo eléctrico que determinaran un punto del estado de polarización. Desde un punto matemático, los parámetros de Stokes están representados por medio de un vector de Stokes, lo cual está formado por los valores correspondientes de  $S_0, S_1, S_2$  y  $S_3$  del campo eléctrico y según la propagación de sus componentes describen ciertas figuras geométricas que son mencionados en la tabla 2.1 para algunos de los vectores de Stokes de cinco estados de polarización[11].

| Parámetro | Horizontal | Lineal<br>+45 grados | Vertical | Circular<br>derecha | Circular<br>izquierda |
|-----------|------------|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|
| $S_0$     | 1          | 1                    | 1        | 1                   | 1                     |
| $S_1$     | 1          | 0                    | -1       | 0                   | 0                     |
| $S_2$     | 0          | 1                    | 0        | 0                   | 0                     |
| $S_3$     | 0          | 0                    | 0        | 1                   | -1                    |

Tabla 2.1: Parámetros de Stokes de algunos estados de polarización.

Si bien, los estados de polarización que corresponden a los parámetros de Stokes son más evidentes sobre la superficie de una esfera denominada esfera de Poincaré. Esta esfera solamente utiliza cantidades normalizadas y por lo tanto, los parámetros de Stokes son normalizados sobre una esfera de radio unitario. La representación de los anteriores estados de la polarización que definen su posición sobre la esfera de Poincaré son presentados en la figura 2.11.

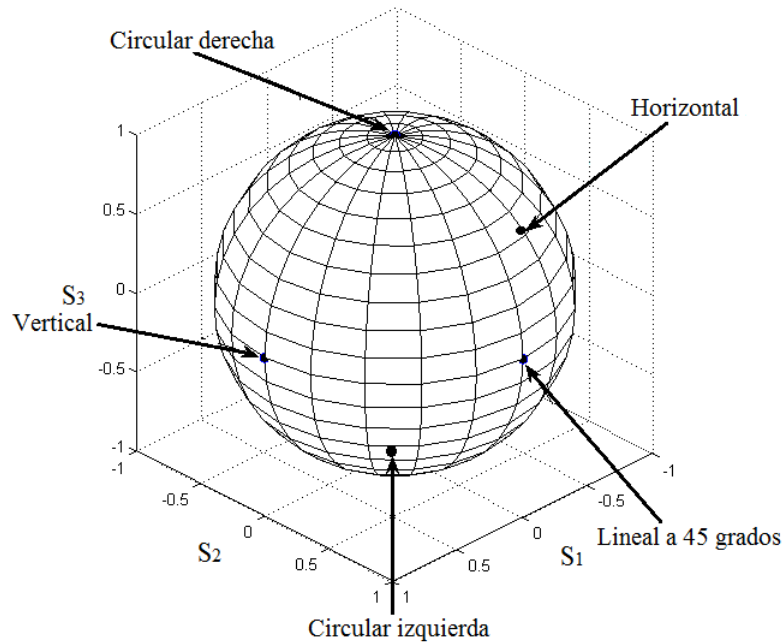


Figura 2.11: Algunos estados de polarización localizados sobre la esfera de Poincaré.

A lo largo de este trabajo de tesis se emplean los parámetros de Stokes normalizados y se hará referencia a estos simplemente como los parámetros de Stokes. Por tal motivo, también hace pensar que los haces de prueba y control tendrán solamente un parámetro de Stokes que indica el grado de polarización y la localización de su estado de polarización sobre la superficie de la esfera de Poincaré.

Ahora bien, para cuantificar el efecto de la XpolM que presenta el haz de prueba, esto será algo complicado determinar los parámetros de Stokes, por los diferentes factores como el ruido adicional por amplificación, el haz de control y longitudes de onda desconocidas que son ajenas al haz, etc. Tales efectos adicionales pueden contrarrestarse empleando un dispositivo óptico denominado filtro óptico que rechazara los haces indeseables, que solamente da el paso a la longitud de onda del haz de prueba de interés, para determinar lo cometido.

Si se sabe, la XpolM actúa bajo el esquema *prueba/control* se deduce que si la intensidad es más potente del haz de control, mayor será la perturbación inducida por la región activa del amplificador y en consecuencia mayor será el cambio de las componentes del campo eléctrico del haz de prueba. Es decir, mientras persista una mayor intensidad del haz de control, entonces mayor será el cambio en el estado de polarización del haz de prueba. Es evidente, que si el estado de polarización del haz de prueba de interés cambia, entonces la ubicación sobre la esfera cambia también.

A partir del hecho, que es posible determinar los parámetros de Stokes que son resultado de la medición del efecto XPolM se cuantifique, midiendo a la salida del SOA en cuestión, el ángulo entre dos estados de polarización del haz de prueba. Es decir, que los dos puntos del haz de prueba que están sobre la esfera de Poincaré y son debido a dos diferentes intensidades de entrada del haz de control. Esta es mostrada en la figura 2.12.

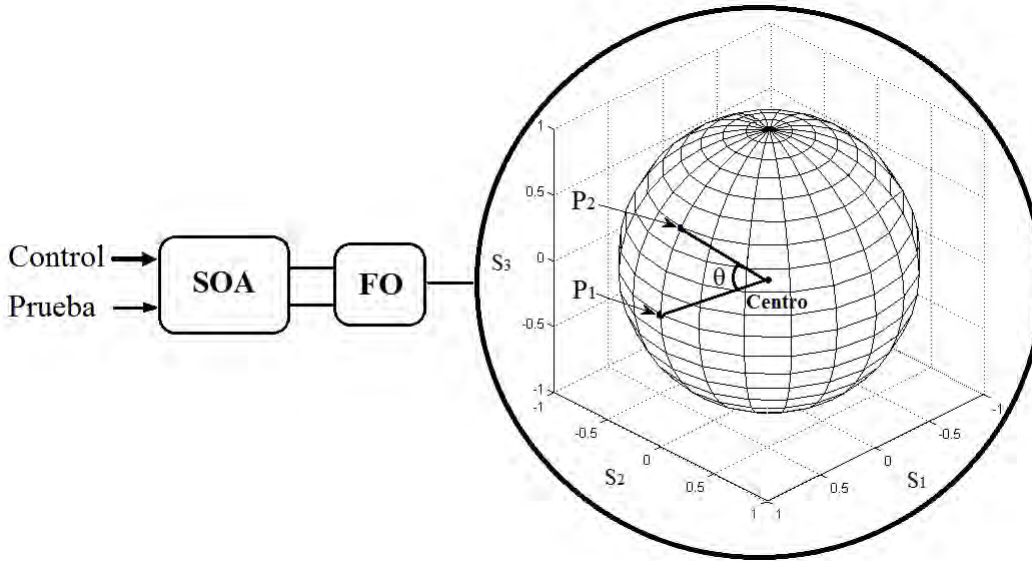


Figura 2.12: Rotación angular del estado de polarización del haz de prueba en función de la intensidad del haz de control en la esfera de Poincaré

Este cambio en el estado de polarización del haz de prueba están determinados por los puntos  $P_1$  y  $P_2$  de los estados de polarización, lo primero que se deberá calcular es el ángulo que los separa dichos puntos. Para esto, se determina la distancia lineal entre ambos puntos mediante la ecuación 2.1 descrita a continuación.

$$c = \sqrt{(s_1^1 - s_1^2)^2 + (s_2^1 - s_2^2)^2 + (s_3^1 - s_3^2)^2} \quad (2.1)$$

Donde:

$S^{1,2}$  : Índices de los puntos de los estados de polarización  $P_1$  y  $P_2$

$S_{1,2,3}$  : Parámetros de Stokes del  $P_1$  y el  $P_2$  (haz de prueba)

$c$  : Distancia lineal entre los puntos de polarización

Posteriormente, se determina el ángulo de desplazamiento, que también es nombrada como la rotación sobre la esfera de Poincaré, la separación entre los estados de polarización  $P_1$  y  $P_2$  del haz de prueba es determinada por la ecuación 2.2, dando dicha distancia angular.

$$\theta = \arccos\left(1 - \frac{c^2}{2}\right). \quad (2.2)$$

Donde:

$c$  :Distancia lineal

$\theta$  : Separación angular entre estados de polarización  $P_1$  y  $P_2$ .

Para la medición del desplazamiento angular del estado de polarización del haz de prueba será mediante la elección de un estado de polarización de referencia ( $P_1$ ) donde a una cierta intensidad del haz de control hay un desplazamiento que va desde ese punto a distancia de otro punto arbitrario ( $P_2$ ) al incrementarse la intensidad del haz de control. Entonces, para el estado de referencia del haz de prueba se obtiene cuando la intensidad de entrada del haz de control es considerablemente menor de intensidad inicial o casi nulo, que no altere los parámetros de Stokes iniciales de la prueba [11]. En definitiva, que bajo un esquema de propagación *control/prueba*, otros autores han demostrado que si “el estado de polarización del haz de prueba es lineal a 45 grados”, entonces la perturbación de la birrefringencia estructural producida por el haz de control, es el principal mecanismo responsable del fenómeno XPolM [21, 16].

Específicamente, con la XpolM es el mecanismo responsable del estado de polarización del haz de prueba cambie a la salida de un SOA, cuando este cambio es introducido con una polarización lineal horizontal o vertical a un polarizador lineal lo que sucederá que haya la máxima intensidad o la extinción del haz de prueba. Por tal motivo, es importante señalar que por medio de la modulación cruzada de la polarización se han implementado diversas funciones de procesamiento ópticas como son: la conversión de longitud de onda [28], puertas lógicas [27], ecualizadores de potencia [12], conmutadores [26], memorias tipo flip-flop [5], entre otras.

### 2.5.1. Polarizador lineal

El polarizador es dispositivo que da un sentido diferente al estado de polarización de un haz de luz polarizada o no, que al pasar por el polarizador, puede hacerla lineal. El polarizador es construido con material dieléctrico que únicamente permite el paso de un haz de luz a una dirección paralelamente a su eje de transmisión. La figura 2.13, se presenta el polarizador con eje de transmisión vertical y ángulo  $\theta$  de separación existente es el eje de paso y la resultante del campo eléctrico del haz incidente.

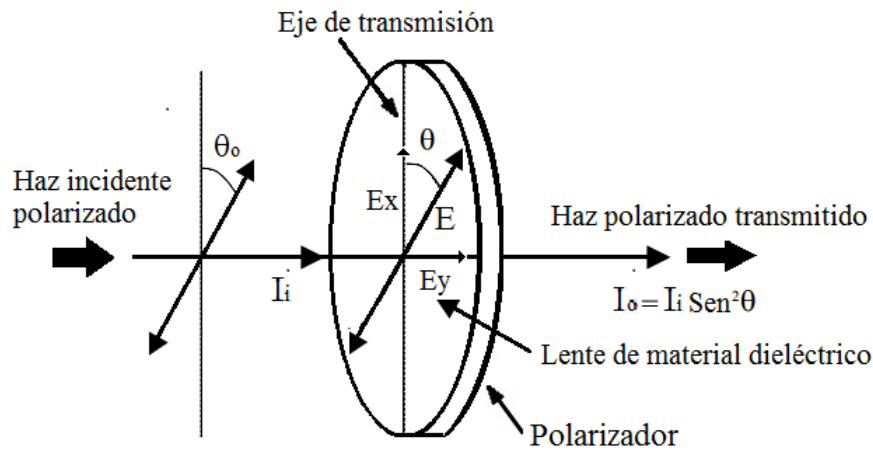


Figura 2.13: Propagación de un haz de luz a través de un polarizador.

Entonces, el polarizador lineal obedece la ley de Malus que se expresa cuantitativamente entre la relación la intensidad de un haz de luz polarizada incidente, el ángulo con respecto al eje de transmisión del polarizador, lo que resulta es la intensidad que es proporcional al coseno del ángulo del haz incidente[15]. En general, la expresión que relaciona la intensidad de salida del SOA es designada, para el haz de prueba es  $I_i$  que es la luz polarizada que tendrá una dirección  $\theta_0$  que es el estado actual del estado de polarización del haz de prueba que incide a la superficie del polarizador lineal, mientras el ángulo  $\theta$  es conformado por el plano del eje de transmisión y la intensidad  $I_o$  que es la salida del haz de prueba transmitida. La expresión que deduce el comportamiento del polarizador es por medio de la ecuación.

$$I_o = I_i \sin^2(\theta) \quad (2.3)$$

Donde:

$I_o$  :Intensidad de salida (haz de prueba)

$I_i$  : Intensidad de entrada (haz de prueba)

$\theta$  : Ángulo de incidencia del haz de prueba

Obsérvese que la ecuación 2.3 predice que cuando se incide el haz de prueba verticalmente polarizado, que coincida con el eje vertical de transmisión del polarizador. Este dejara pasar toda la intensidad del haz de prueba incidente y la extinción del haz de prueba irá disminuyendo progresivamente a medida que el ángulo  $\theta$  se aproxima a un ángulo igual a 90 grados ( $\theta = 90^\circ$ ) [15].

# Capítulo 3

## Desarrollo metodológico

El presente capítulo se muestra el diseño del sistema óptico planteado, sino también, la función multinivel que implementara y bajo qué condiciones operará (labor que se realiza en el capítulo IV). También, se validan los efectos XGM y la XpolM que definirán el comportamiento del SOA en el simulador *VPI-photonics*.

### 3.1. La función óptica de señalización multinivel

De manera general, el planteamiento de la función de señalización multinivel es que transforme la información de dos señales digitales binarias ópticas (entrada) a una sola señal óptica (salida) caracterizada en intensidad de amplitud, que contenga las dos señales. Es decir, la señal óptica de salida tendrá 4 niveles de intensidad.

Para nuestro caso de interés, la información es transportada en dos señales ópticas que son representadas con las diferentes combinaciones digitales de entrada y que son traducidas a la salida del sistema, en una señal óptica independiente, que tendrá la información de las dos señales ópticas en 4 diferentes niveles de intensidad óptica, lo más equidistantes posibles a una relación lo más linealmente posible.

Para ejemplificar, la implementación propuesta de la función óptica de señalización multinivel considere la representación de la figura 3.1. Donde la entrada está formada y representada por dos señales ópticas digitales binarias  $D_1$  y  $D_0$ , siendo el MSB (bit más significativo) y el LSB (bit menos significativo) respectivamente. El sistema óptico propuesto hará el procesamiento de información con la función planeada y el resultado es una tercera señal óptica, que eventualmente será una señal óptica multinivel. De hecho, para cada tiempo de bit<sup>1</sup> de las señales de entrada se tiene la combinación de dos bits, por ejemplo, para un tiempo cualesquiera de  $t_0$  a  $t_1$  y  $t_3$  a  $t_4$  que corresponde a una y solo una de la combinación digital de (00) y la (11).

---

<sup>1</sup>El tiempo de duración de un pulso digital de nivel alto (1) o también de nivel bajo (0)



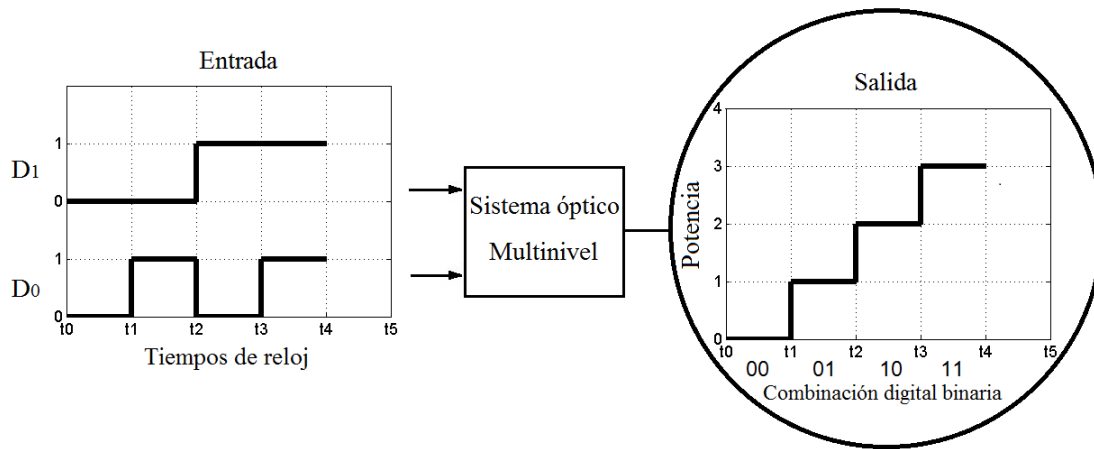


Figura 3.1: Bosquejo de la función multinivel. La información contenida en dos señales digitales (entrada), es mapeada a una señal de 4 niveles (salida).

Para este caso en particular, el diseño del sistema óptico propuesto se definirá el número de bits de la señal de entrada, entonces el número de señales digitales ópticas considerado en este trabajo de tesis es de 2, por lo que estará formada por  $2^2 = 4$  combinaciones de dos bits las dos señales de entrada representados por (00, 01, 10, 11) y también contara con el mismo número de elementos, en este caso en 4 niveles diferentes de intensidad. Es decir, contara con 4 niveles de amplitud de potencia y estos son: 0, 0.33, 0.66 y 1, todos los valores de amplitud son normalizados. En la tabla 3.1, se etiqueta como el dominio a las señales digitales de entrada de dos usuarios identificados por las siglas  $D_1$  y  $D_0$  respectivamente y bajo la etiqueta de salida son las 4 niveles de potencia que contiene las dos señales de información de dos usuarios.

| Entradas |       | Señal de salida      |
|----------|-------|----------------------|
| $D_1$    | $D_0$ | Potencia normalizada |
| 0        | 0     | 0                    |
| 0        | 1     | 0.33                 |
| 1        | 0     | 0.66                 |
| 1        | 1     | 1                    |

Tabla 3.1: Salida del sistema en función de las combinaciones de entrada.

Con la información de la tabla 3.1, se construye la gráfica correspondiente en la figura 3.2. Con ello, se relaciona las combinaciones digitales (entrada) con la amplitud de señal de potencia (salida) representando la función de señalización multinivel. Es pertinente aclarar, que la intersección (combinación-potencia) se da con eje horizontal la combinación digital y el vertical la potencia normalizada que oscila entre 0 y 1.

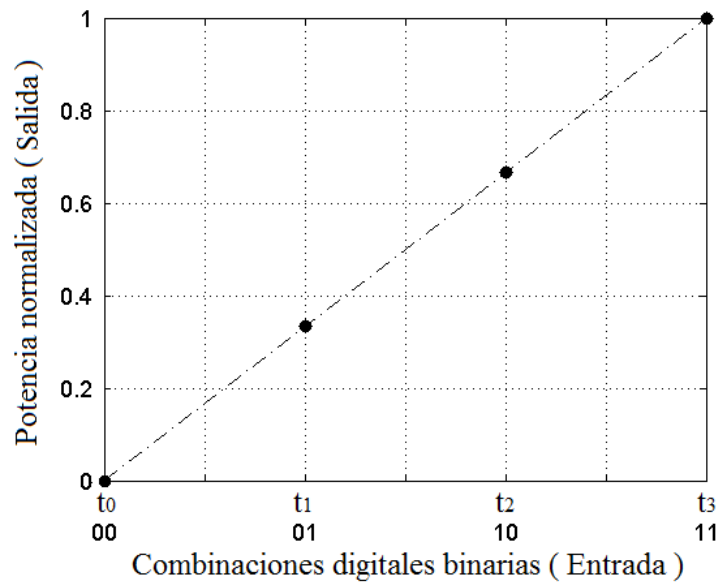


Figura 3.2: Representación de la salida final de la función planteada.

Estrictamente, la señal que arroja el sistema propuesto es una señal multinivel de 4 niveles de intensidad. Entonces, un ejemplo el nivel es de 0 y otro nivel el 4, o cualquier otro, representa un valor de potencia óptica, por ejemplo, el 0.33 y el 1 a un instante de tiempo de  $t_1$  y el otro de  $t_3$  respectivamente.

En la actualidad, ya existen diferentes trabajos de sistema multinivel con distintas tecnologías para la transmisión de información. Por ejemplo, con campos magnéticos, que al cambio del campo magnético de un transductor magnético genera una señal eléctrica que un circuito de decisión dice si lo recibido es o no información; el único problema es que la transmisión deberá emplearse tecnología magnética. Por otra parte, el sonido, la transmisión es por la modulación de una portadora de sonido que la recibe un transductor piezo eléctrico que traduce una señal eléctrica de información que es sometida al mismo proceso de decisión; la transmisión debe emplear tecnología acústica, etc. Lo cual resulta algo complicado al emplear estas tecnologías y el pensar los inconvenientes que presentan en la transmisión.

Hoy en día, la gran mayoría de los sistemas de comunicaciones emplean luz como portadora de información. Aun la importancia del empleo de tecnología óptica a las redes ópticas de comunicaciones es tema de investigación, que atrae las miradas de los investigadores. En este trabajo contribuye al empleo dispositivos ópticos que realicen el procesamiento de señales digitales ópticas para incrementar la tasa de transmisión y la eficiencia espectral de las redes ópticas actuales.

## 3.2. Diseño del sistema óptico experimental

Para la construcción del sistema que fue planteado en el objetivo general de este trabajo de tesis, se basa en el diagrama básico que se esquematiza en la figura 3.3. Este sistema completamente óptico tiene como elemento central al dispositivo óptico SOA y un polarizador lineal. Iniciando con la descripción del diagrama del sistema óptico, al amplificador SOA se le insertan simultáneamente tres láseres, que solamente dos de ellos poseen idéntica longitud de onda y representan a las dos señales digitales de entrada  $D_1$  y  $D_0$  que posteriormente los 2 haces se conforman para desempeñar el papel de un solo haz que será el láser de control respectivamente. El tercer laser posee una longitud de onda distinta a los otros dos láseres y la amplitud de su potencia es constante. Por tal motivo a este haz se le ha denominado el láser Cw. Estos tres láseres se propagan simultáneamente dentro del SOA, la potencia total del láser de control perturba las propiedades ópticas del amplificador a través de los distintos fenómenos no lineales XGM y la XpolM<sup>2</sup>. Los fenómenos mencionados inducen cambios en la amplitud de potencia y variaciones en su estado de polarización del láser (Cw) para este caso, este láser es el de interés.

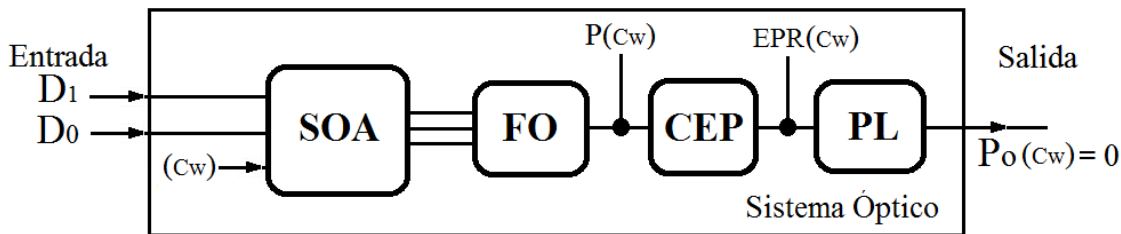


Figura 3.3: Diagrama del sistema óptico propuesto.

Después de que atraviesan al amplificador se introducen a un filtro óptico (FO) que rechaza la longitud de onda del láser de control y longitudes de onda adicionales ocasionadas por un SOA, y solamente, da el paso a la longitud de onda del láser (Cw). Para continuar, se ha agregado un bloque que presenta a un Controlador de Estado de Polarización (CEP), el dispositivo cumple una función fundamental de transformar el estado de polarización del láser de prueba que sale del filtro. En nuestro caso, cuando la potencia total del láser de control sea cero  $P(\text{láser de control})=0$ , el CEP es empleado para trasladar el estado de polarización que emerge del filtro a un estado de polarización perpendicular al eje de paso vertical del polarizador lineal.

<sup>2</sup>Los efectos opuestos son explotados para sintetizar la función de señalización multinivel

En particular, la manipulación de este estado será de nuestro interés que se denominara el Estado de Polarización de Referencia (EPR) del láser (Cw), es cuando la potencia total del láser de control (las dos señales digitales ópticas) tendrá una combinación de entrada de (00), la menos significativa. Es decir, a la salida en el control de estado de polarización (CEP) se tendrá el estado de polarización de referencia EPR-(Cw) y por tal motivo, la salida del polarizador lineal habrá la máxima extinción del láser (Cw) teniendo una potencia total de 0 watts.

Cabe mencionar, que si la potencia del láser de control es diferente a 0 watts, lo que sucederá que los fenómenos no lineales XGM y la XpolM cambiarán el estado de polarización del láser (Cw) a la salida del amplificador SOA. Entonces, el estado de polarización de referencia que se tenía después del (CEP), tendrá un diferente estado de polarización que se denominara un estado de polarización arbitrario EP-(Cw) del láser (Cw), que dependerá de las combinaciones digitales de entrada habrá diferentes estados de polarización y de potencia total P(Cw) del láser (Cw) que emerge del SOA<sup>3</sup>, ambos parámetros se inciden al polarizador lineal. Sin embargo, la potencia de salida del polarizador es determinada por la ley de Malus, la ecuación que la describe es:  $P_o(Cw) = P(Cw) * \sin^2(\theta)$ , que relaciona el punto de la potencia P(Cw) que es determinada por XGM y la  $\theta$  rotación angular del estado de polarización entre EPR(Cw) y el EP-(Cw) es definida por la XpolM sobre la esfera de Poincaré, que ambos emergen del SOA. Ambos parámetros dependen de la potencia total de las combinaciones digitales. Por lo tanto, el polarizador lineal traducirá los cambios de potencia en niveles del láser (Cw) sintetizando la función de señalización multinivel.

### 3.3. Caracterización de la XGM

Si sabemos, el SOA posee diferentes propiedades ópticas que una de las principales es impartir una ganancia óptica a un haz de luz y la otra se aprovecha para suscitar los fenómenos no lineales XGM y la XpolM que ocurre cuando se propagan simultáneamente dos haces en el SOA. De hecho, mantienen ambas una relación mutua que son: Primero, bajo la condición de saturación del SOA disminuye la ganancia del haz de luz de entrada y por otra parte, el fenómeno XGM se manifiesta bajo la condición de saturación de ganancia del SOA, el haz de control comprime la ganancia del haz de prueba. Ambos fenómenos producen el efecto de la compresión de un haz de entrada. De hecho, para cuantificar la XGM será bajo el esquema *prueba/control* la intensidad del haz de control comprimirá la ganancia el haz de prueba, que será la referencia de entrada y salida del dispositivo SOA. Para ello, se emplea la función de transferencia del amplificador SOA que es la salida sobre la entrada<sup>4</sup> del haz de entrada.

<sup>3</sup>asumiendo que las pérdidas de potencia del FO y CEP son insignificantes

<sup>4</sup>  $G_{SOA} = salida/entrada$

Lo mencionado implica que es necesario determinar las variables de interés, que son las intensidades y longitudes de onda de los láseres prueba y control que cuantifiquen el comportamiento de la XGM, esto será posible con el simulador *VPI-Photonics*. Específicamente, bajo el esquema *prueba/control* la intensidad del láser de control manipulara a la intensidad del láser de prueba (que debe ser menor intensidad al laser de control), cuyas longitudes de onda distintas (contenidas en el ancho espectral del SOA) y que solamente el láser de control induzca el efecto XGM sobre la salida del láser de prueba, que eventualmente predecirá el comportamiento del SOA.

De manera particular, se propone el diseño de un arreglo óptico que estará sometido a las condiciones anteriormente mencionadas, que dan la posibilidad de presentarse el efecto de la XGM. El arreglo es esquematizado en la figura 3.4.

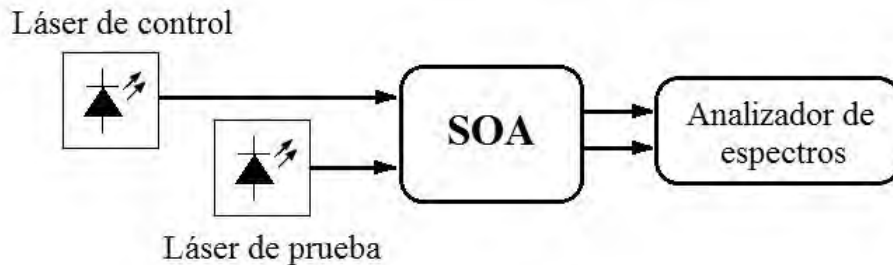


Figura 3.4: Esquema del arreglo propuesto

El principio de operación del arreglo es efectuar la variación de la intensidad del láser de control que manipulara el efecto XGM comprimiendo la intensidad del láser de prueba, que será visualizada en un analizador de espectros en el simulador.

Los parámetros determinados para el arreglo propuesto son: Primero, el láser de prueba tiene la longitud de onda  $l = 1555.935$  nm y cumpliendo la condición establecida de la intensidad de potencia es constante de  $P_{prueba} = 30\mu$  w equivale a  $-15.22$  dBm, que es menor intensidad al láser de control. Por otra parte, el láser de control de longitud de onda  $l = 1551.59$  nm, con una ventana de separación de  $4.342$  nm con respecto al otro láser y finalmente, el rango que posee el láser de control tiene contenidas las siguientes intensidades:  $-30, -25, -20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15$  dBm.

De hecho, la potencia del láser de control manipula a la potencia del láser de prueba en un estado estático, es decir, se cambia una y solamente una de las intensidades del láser de control; lo que se tendrá el mismo número de registro de intensidades del láser de prueba. Los resultados obtenidos del láser de prueba son objeto de análisis para cuantificar el efecto XGM del SOA que fue elegido en el simulador *VPI-Photonics*. Para este caso, el experimento se ejecutó 5 veces para estimar la operación de los dispositivos ópticos ajustando los parámetros mencionados de cada uno de ellos.

A fin de verificar de manera experimental que es posible el efecto del fenómeno XGM mediante el simulador *VPI-photonics*. El simulador caracteriza los dispositivos ópticos por medio de bloques que están contenidos en las librerías, que permitirán construir el arreglo experimental propuesto. El entorno de simulación ofrece el cambio de parámetros a los dispositivos ópticos, que son ajustados a los parámetros antes mencionados. La figura 3.5 muestra la simulación computacional del arreglo experimental.

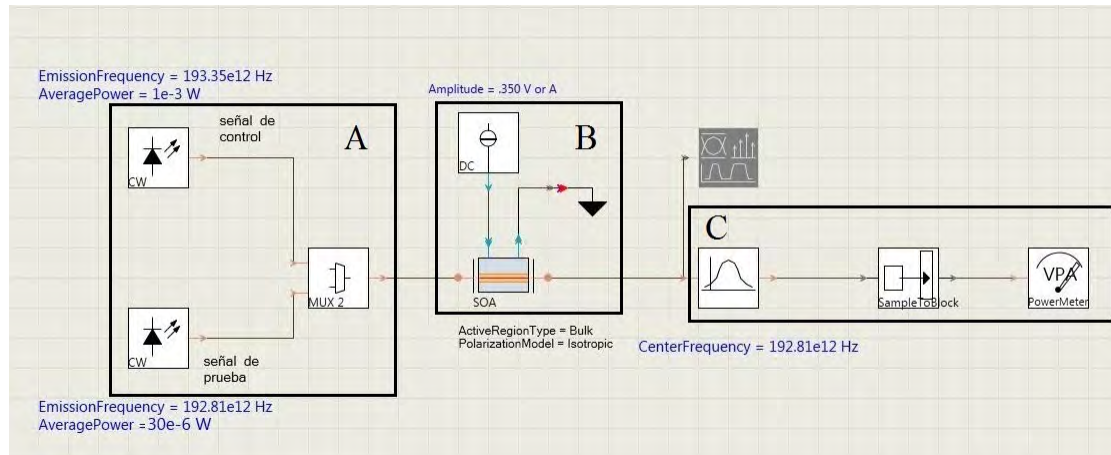


Figura 3.5: Representación del arreglo en el simulador *VPI-photonics*.

A continuación se describe el arreglo experimental que compruebe la existencia del comportamiento del efecto de la XGM en el SOA mediante el simulador *VPI-photonics*. Este arreglo se divide en tres partes principales: En primer lugar, la parte derecha A, se localizan dos haces de haz continuo que representan ambos láseres de prueba y control, son multicanalizados con un multiplexor (MUX ideal) al amplificador SOA. En la parte central B, se localiza el (SOA) elegido del simulador, para suscitar el efecto de la XGM son introducidos ambos láseres y también, el SOA cuenta con conexión a corriente eléctrica con el bloque (DC) y a tierra respectivamente. Por otro lado, el bloque oscuro representa a un instrumento de medición (analizador de espectros) que muestra parámetros propios de los espectros de ambos. Luego, la parte izquierda C, contiene dos bloques: Primero, el opcional (filtro óptico) que su función es el rechazo de longitudes de onda adicionales que emergen del SOA, que da paso solamente a la longitud de onda  $\lambda = 1555.935$  nm del láser de prueba. Enseguida, el siguiente bloque denominado (*powermeter*) es un instrumento de medición en el simulador, que extrae la lectura de intensidad óptica del láser prueba.

La tabla 3.2 muestra los resultados obtenidos de las intensidades del láser de prueba de entrada y salida, el experimento se ejecutó 3 veces en el simulador, que arrojará cada uno de los niveles de intensidad del láser de prueba, que eventualmente las mediciones del láser de prueba cuantificaran la respuesta del efecto XGM.

| Láser de control<br><i>dBm</i> | Láser de prueba<br>Entrada <i>mw</i> | Láser de prueba<br>Salida <i>mw</i> | Ganancia SOA<br><i>dB</i> |
|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| -30                            | 0.03                                 | 3.943198203                         | 21.2                      |
| -25                            | 0.03                                 | 3.921920987                         | 21.2                      |
| -20                            | 0.03                                 | 3.856615991                         | 21.1                      |
| -15                            | 0.03                                 | 3.664303479                         | 20.9                      |
| -10                            | 0.03                                 | 3.15879998                          | 20.2                      |
| -5                             | 0.03                                 | 2.220502437                         | 18.7                      |
| 0                              | 0.03                                 | 1.199539884                         | 16.0                      |
| 5                              | 0.03                                 | 0.528130461                         | 12.5                      |
| 10                             | 0.03                                 | 0.223296389                         | 8.72                      |
| 15                             | 0.03                                 | 0.102957673                         | 5.36                      |

Tabla 3.2: Mediciones obtenidas en el simulador.

Para determinar el cálculo de ganancia será utilizado solamente el láser de prueba, el cual la cuantifica mediante la siguiente expresión:  $G_{soa} = Prueba_{salida}/Prueba_{entrada}$ , cuyos valores son traducidos a decibeles (dB) por:  $10*\log(Prueba_{salida}/Prueba_{entrada})$ . Con los resultados obtenidos de las columnas (Ganancia SOA) y la intensidad del láser de control de la tabla 3.2, se representara la curva característica de la ganancia del SOA elegido en el simulador. La grafica es mostrada en la figura 3.6.

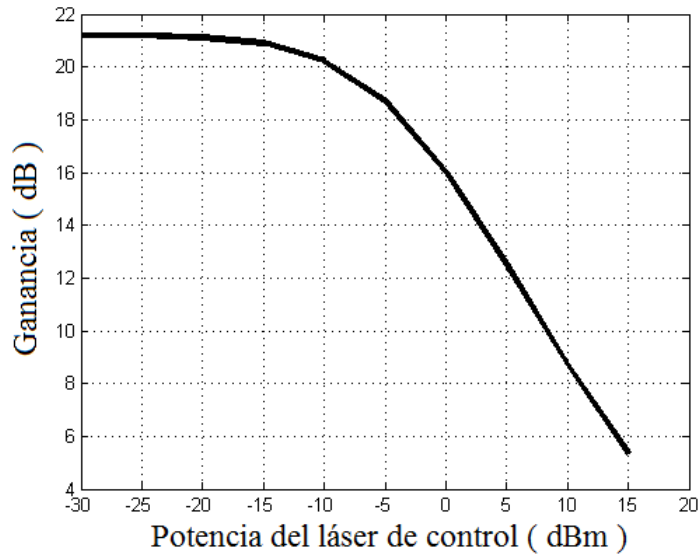


Figura 3.6: Curva del comportamiento del efecto XGM en el SOA.

La figura 3.6 muestra la ganancia del SOA en función de la potencia del láser de control. Es decir, la máxima de ganancia de 21.3 dBm se presenta en el rango de -30 dBm hasta -15 dBm de la intensidad del láser de control. Por otro parte, esta ira disminuyendo a medida que la intensidad llegue a -5 dBm provocando una disminución de 3 dBm del punto máximo de ganancia. Finalmente, si la potencia del láser de control sigue aumentando hasta los 15 dBm esta refleja la ganancia de 5.36 dBm aproximadamente. Por tal motivo, la curva de la ganancia presenta no linealidad a medida que se comprime la potencia del láser de prueba. Relacionando el efecto de la XGM con la respuesta de ganancia del SOA y lo más importante la emulación del comportamiento de la XGM del dispositivo SOA, con el simulador *VPI-photonics*.

### 3.4. Caracterización de la XPolM

Si sabemos, que el fenómeno XpolM se manifiesta en el momento que dos haces prueba y control se propagan simultáneamente en el SOA. Es decir, la intensidad del láser de control perturba las propiedades ópticas en el SOA originando los efectos XGM y la XpolM al mismo tiempo; lo que indica los cambios de intensidad y polarización a la salida del láser de prueba. Esta sección se enfoca en encontrar las intensidades y longitudes de onda de los láseres prueba y control, que cuantifique el comportamiento del efecto XpolM en el SOA elegido en el simulador *VPI-photonics*. A fin de verificar si es posible el efecto de la XpolM se propone un arreglo óptico que bajo el esquemaprueba/control la intensidad del láser de control cambia el estado de polarización del láser de prueba (de menor intensidad al laser de control), cuyas longitudes de onda son distintas (localizadas en la región espectral del SOA), ambos son insertados a un filtro óptico que solamente permite el paso al laser de prueba rechazando las longitudes de onda adicionales, lo que permite extraer solamente los parámetros de Stokes del estado de polarización del láser de prueba inducido por el efecto del fenómeno XpolM. Para analizar el comportamiento de la XpolM, se propone y esquematiza el arreglo óptico mostrado en la figura 3.7.

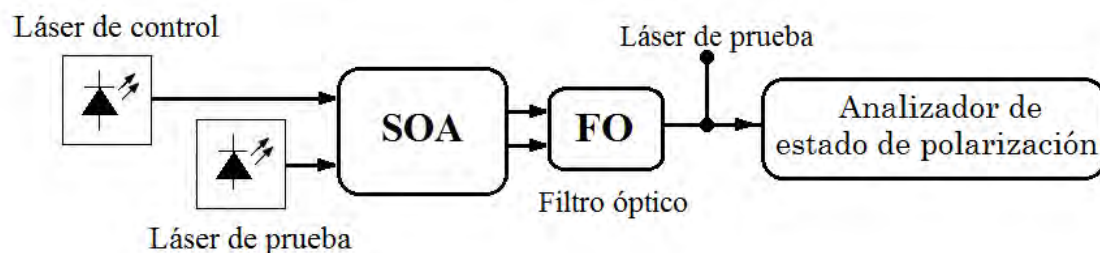


Figura 3.7: Diagrama del arreglo propuesto.



El arreglo operará mediante las condiciones establecidas, que es la variación del láser de control manipula al efecto XpolM que inducen cambios en el estado de polarización del láser de prueba, que son visualizados sobre la esfera de Poincaré del *simulador R*. Para este arreglo óptico serán establecidos los siguientes parámetros: En primer lugar, el láser de prueba tiene la longitud de onda  $\lambda = 1555.935$  nm a una intensidad  $30\mu\text{W}$  que equivale a  $-15.22$  dBm, con la única diferencia que su estado de polarización será lineal a  $45$  grados (lo que hace más notable el efecto XpolM) y por otro lado, el láser de control tiene la longitud de onda  $\lambda = 1551.59$  nm y la separación de  $4.342$  nm, para que solamente el láser de control modifique al láser de prueba; y factores adicionales no alteren la XpolM. El láser de control tiene un dominio de intensidades que son las siguientes:  $-11, -10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$  dBm. El mismo rango de cantidades tendrá los estados de polarización del láser de prueba al paso del filtro óptico con la respuesta del láser de prueba a  $\lambda = 1555.935$  nm, que cuantifica solamente los parámetros de Stokes del láser de prueba.

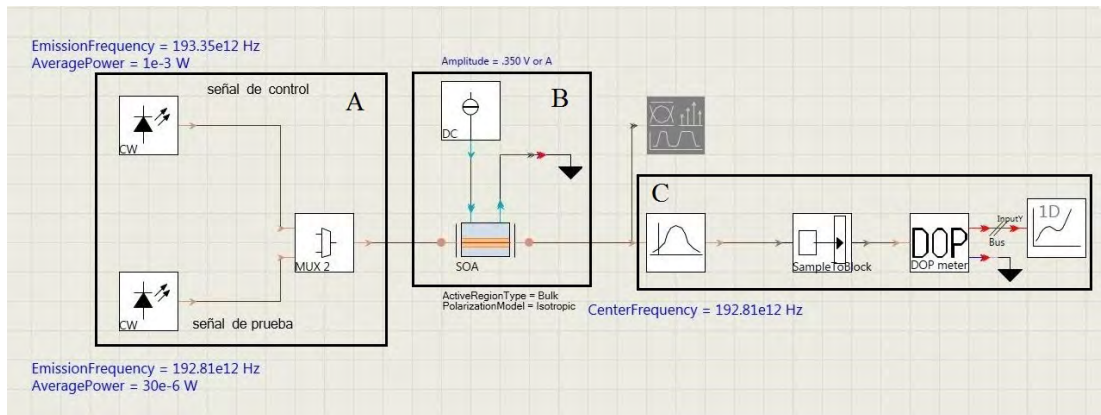


Figura 3.8: Representación del arreglo óptico en el simulador.

En la figura 3.8 se muestra la simulación computacional del arreglo experimental empleando los dispositivos contenidos en el software. En este arreglo, la parte derecha A, se utilizaron dos haces de haz continuo que representan los láseres de prueba y control, son multicanalizados con el bloque multiplexor (*Mux*) al amplificador óptico. En la parte central B, el (*SOA*) cambia el estado de propagación del láser de prueba mediante la XpolM, que también, se le suministra corriente con el bloque (*DC*) y conexión a tierra. Enseguida, en la parte izquierda C, la salida del *SOA* se introduce a un (filtro óptico), cuya respuesta de paso es solamente el láser de prueba  $\lambda = 1555.935$  nm, que rechaza las longitudes de laser de control y haces adicionales, con pérdidas insignificantes. Por otra parte, la parte izquierda C, se encuentran los instrumentos de medición (*DOP meter* y *1D*), el cual es un analizador de polarización en el simulador; lo que extrae los parámetros de Stokes del estado de polarización del láser de prueba.

Dando de hecho que los resultados obtenidos representan a cada uno de los estados de polarización del láser de prueba que fueron producidos por la intensidad del láser de control y que contienen las tres cantidades de Stokes que fueron extraídos cuando se ejecutó el experimento 3 veces para cada nivel de potencia del láser de control para encontrar los estados de polarización del láser de prueba. Sin embargo, los parámetros de Stokes del láser de prueba pueden ser representados en cambios de estados de polarización son más evidentes sobre la esfera de Poincaré mediante el *simulador R*. Los puntos obtenidos de los estados de polarización son mostrados en la figura 3.9 . Para nuestro caso de interés, se determinara la rotación angular entre los estados de polarización, la cual se calcula con las siguientes expresiones: Primero, la distancia lineal entre estados de polarización  $c = \sqrt{(s_1^1 - s_1^2)^2 + (s_2^1 - s_2^2)^2 + (s_3^1 - s_3^2)^2}$ . La rotación angular es calcula desde un punto de referencia (el primer estado de polarización) hasta el reciente estado de polarización del láser de prueba, entonces la rotación sobre la esfera de Poincaré se calcula mediante la ecuación:  $\theta = \arccos(1 - c^2/2)$ .

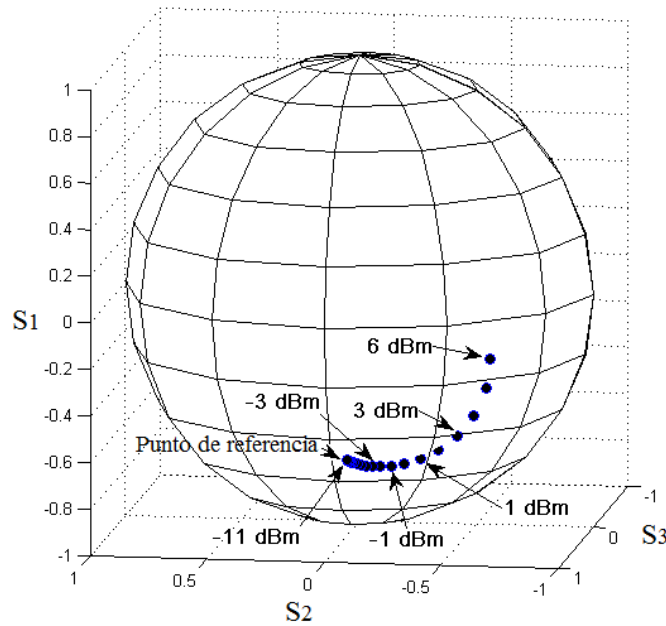


Figura 3.9: Puntos de los estados de polarización en la esfera de Poincaré.

La figura muestra la sucesión de puntos de los estados de polarización localizados en la esfera de Poincaré, que adquieren una rotación dependiendo de que sea más intensa la intensidad del láser de control comenzara en un punto de referencia, con la mínima intensidad de -11 dBm, y a partir de ahí, los demás puntos son cuantificados de los estados de polarización del láser de prueba que son producidos al aumentar la intensidad de potencia del láser de control hasta llegar al punto de los 6 dBm.

A fin de verificar la rotación angular desde el punto de referencia hasta el último estado de polarización se cuantifica empleando los parámetros de Stokes de cada uno de ellos y aplicando las ecuaciones mencionadas. Los resultados obtenidos de la rotación angular son representados mediante la figura 3.10.

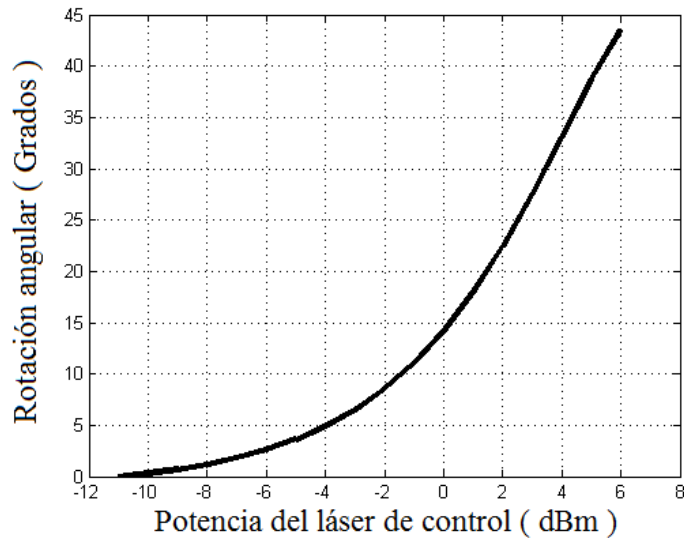


Figura 3.10: Resultado de la caracterización de la XpolM.

En la figura, se observa la rotación mínima de cero grados a una intensidad de -11 dBm del láser de control, que es el punto de referencia inicial de la rotación angular. Después, con el intervalo de -11 dBm hasta -2 dBm donde aumenta el láser de control, la diferencia de rotación angular es de 15 grados. A partir de los -2 dBm hasta la intensidad de 6 dBm se incrementa la rotación hasta los 35 grados aproximadamente. Lo cual comprueba el comportamiento del SOA al efecto de la XpolM, que indica la rotación angular de los estados de polarización son extraídos del simulador *VPI-photonics*.

En resumen, los arreglos experimentales propuestos permiten corroborar la aparición de los efectos XGM y la XpolM. Con ello, se comprueba la funcionalidad del entorno computacional y los dispositivos ópticos<sup>5</sup> empleados en el simulador *VPI-photonics*. Por otra parte, el simulador permitió emular el comportamiento del SOA, con lo que será posible predecir el desempeño del sistema óptico propuesto bajo las condiciones establecidas en este capítulo.

<sup>5</sup>El bloque del dispositivo cuenta con una dinámica similar a un dispositivo real

# Capítulo 4

## Resultados

En el presente capítulo se expone la implementación del sistema óptico, si no también permite dar cuenta del comportamiento del sistema mediante el simulador *VPI-photonics*. Tomando en cuenta los resultados obtenidos en las simulaciones son registrados e ilustrados a continuación.

### 4.1. Introducción

El ensanchamiento espectral que sufre una señal óptica al ser modulada depende directamente del ancho de bit de la señal digital eléctrica correspondiente. Dicho con otras palabras, a menor tiempo de bit<sup>1</sup> mayor el ensanchamiento de la señal óptica. Esto se traduce en una reducción del ancho de banda disponible en una fibra óptica para transmitir simultáneamente señales ópticas a otras frecuencias.

Para ejemplificar esto, considere la figura 4.1 muestra el espectro del mismo láser bajo diferentes condiciones: sin modular, modulada a 10 Gbps y modulada a 20 Gbps. Es evidente que para transmitir más información se requiere más ancho de banda de lo normal y por tal motivo se considera una alternativa de solución a ese problema.

De hecho una manera para hacer un uso eficiente del ancho de banda que ofrece la fibra óptica en este trabajo de investigación se implementa la técnica de señalización multinivel de cuatro niveles. Con ello, se busca duplicar la eficiencia espectral de las redes de telecomunicaciones de fibra óptica. Si se sabe, que en un tiempo de bit se transmite los bits de cada una de las dos diferentes señales, esto implica que el espectro sea el doble en ese momento. Después de la intervención de la técnica propuesta permite transmitir dos bits en una sola señal de ahí surge la mitad del espectro que puede ser enviado en cualesquiera de los dos espectros de las señales.

---

<sup>1</sup>A mayor velocidad de transmisión

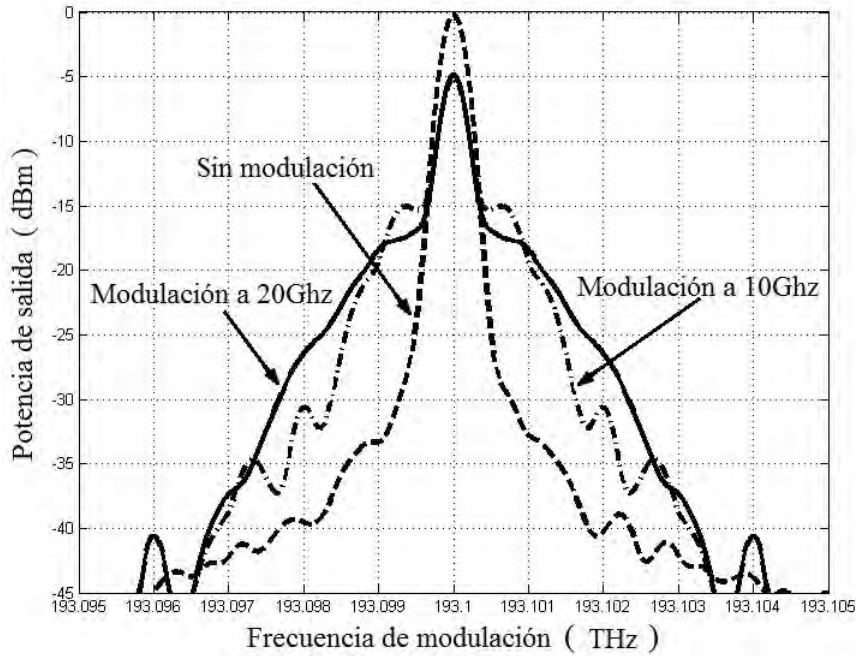


Figura 4.1: Ancho de banda a diferentes velocidades de transmisión digital.

Para nuestro caso de interés, el problema de ensanchamiento espectral en las redes ópticas puede reducirse considerablemente mediante la implementación del sistema óptico planteado. Si recordamos, que al sistema serán introducidas dos señales digitales binarias ópticas  $D_1$  y  $D_0$  (dos usuarios diferentes) forman el láser de control, que son traducidas a una tercera señal óptica caracterizada en niveles de intensidad (que es la señal de prueba), finalmente); lo que reduce a la mitad el espectro a la hora de la transmisión de información. Esto, será posible con el elemento central SOA y un polarizador lineal, que determinaran la señalización multinivel deseada en función de las combinaciones digitales de las dos señales de entrada.

Si se sabe, que los efectos de la XGM y la XpolM se acentúan conforme la potencia del láser de control aumenta. Sin embargo, no pueden incrementarse indiscriminadamente, por ello que los efectos son opuestos a la salida del SOA. Como emergen del polarizador asimila la salida la potencia  $P_o(Cw)$ , que se caracteriza en niveles de amplitud en forma lo más lineal posible. Si sabemos, que la función de transferencia del polarizador depende de dos factores: la potencia  $P(Cw)$  que es gobernada por la XGM mientras que el otro  $\theta$  es regido por la XpolM. Ambos parámetros son funciones que dependen de la potencia total de las señales digitales de entrada, entonces la potencia a la salida del polarizador estará determinada por la ley de Malus:

$$P_o(Cw) = P(Cw) * \text{sen}^2(\theta/2)$$

Por estos motivos es de esperarse que el valor de las variables  $P(Cw)$  y  $(\theta)$  dependan de la función de la intensidad total  $(D_1 + D_0)$  de la señal de control exhiban un comportamiento similar al mostrado en la figura 4.2.

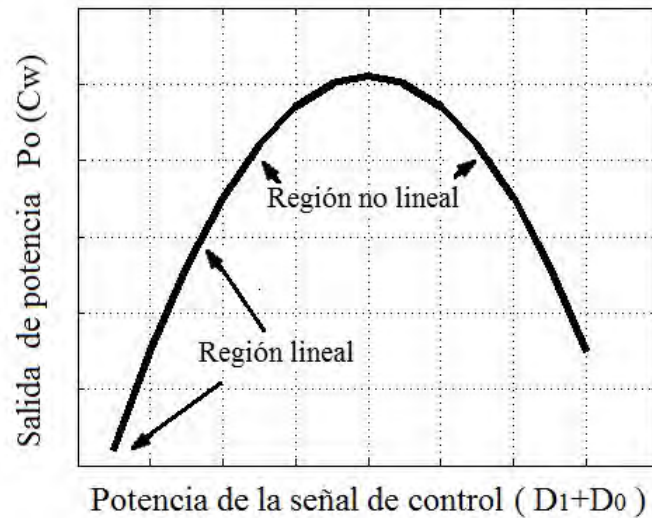


Figura 4.2: Función de transferencia que emerge del polarizador lineal.

Como se verá en la parte correspondiente a la simulación del sistema óptico, es el resultado simultáneo de los efectos opuestos XGM y la XpolM, es el que permite encontrar una relación lineal entre los valores de las combinaciones digitales de entrada y los valores de los niveles de salida. Dicha relación lineal no podría sintetizarse por el efecto único de la XPolM o de la XGM. De acuerdo a lo anterior, que cuando la potencia es mayor de las señales digitales hace que la XPolM mejore su eficiencia y de manera igual la XGM impone su acción típica de compresión sobre la potencia del láser  $(Cw)$ , resultando en una función de transferencia no lineal (en este caso, al tiempo que se combinan los efectos decrece o es una región no lineal). Lo anterior implica que se deben seleccionar los valores adecuados de potencia de las señales digitales para obtener la relación deseada (la hora, que crece el efecto combinado se asemeja a una función lineal). Para garantizar, que el sistema óptico cumpla con la función de señalización multinivel debe considerarse a la entrada del polarizador lineal una potencia total de las dos señales digitales ópticas  $(D_1 + D_0)$  tenga un valor de cero watts, que deberá mantener constante a un estado perpendicular al polarizador lineal. Esta condición da la máxima extinción del láser  $(Cw)$  cuando emerge del polarizador lineal con respecto a su eje de paso a uno vertical, que eventualmente contiene ambas señales digitales ópticas en un punto determinado a un valor de potencia  $P_o(Cw)$ .

## 4.2. Sistema óptico en el simulador *VPI-photonics*

La figura 4.3 muestra la simulación computacional del sistema óptico experimental empleando los dispositivos contenidos en las librerías del software *VPI-photonics*.

En este sistema óptico, se utilizan 2 láseres para generar las dos señales de entrada (dos usuarios diferentes) con potencia variable y longitudes de onda iguales ( $\lambda = 1551.613$  nm, respectivamente). Cada señal de entrada es introducida a un multicanalizador que pueden ser interpretadas como los bits de entrada de 2 bits, siendo D1 y D0 al MSB y LSB respectivamente, como es el caso de nuestro interés. A fin de obtener una descorrelación entre las secuencias de los bits D1 y D0, antes de introducirlos al multicanalizador. Por otro lado, un tercer láser es acoplado que genera al láser (Cw), el valor de la longitud de onda se eligió a  $\lambda = 1551.590$  nm, a partir de la simulación, mostro ser el que maximiza la potencia de salida del sistema óptico, el cual es controlado en polarización e insertado a otro multicanalizador.

La salida contiene a las dos señales multicanalizadas y el láser (Cw), se introducen al SOA. La manipulación del estado de polarización de las dos señales digitales a uno lineal orientado a cero grados. De igual forma, el láser (Cw) es introducido al SOA con un estado de polarización (lineal a 45 grados) con una potencia de 10 mw o de 10 dBm. La salida es recuperada y entonces es filtrada con un filtro de banda pasante centrado a la longitud de onda del láser (Cw). Una vez que el láser (Cw) es filtrado de las demás señales multicanalizadas y del resto de longitudes de onda adicionales del SOA, es introducido a un controlador de estado de polarización (CEP) para manipular conveniente su estado de polarización del láser (Cw), antes de ser introducido al polarizador lineal. Este último dispositivo tiene un eje de transmisión que es orientado verticalmente. Después, la salida del controlador de estado de polarización se conectan un medidor de potencia óptica y un analizador de estado de polarización para verificar la potencia  $P(Cw)$  del láser(Cw) y el estado de polarización de referencia  $EPR(Cw)$ , que deberá ser perpendicular antes del polarizador.

Por otro lado, los arreglos ópticos construidos en las secciones 3.3 y 3.4 permitió emular el comportamiento del SOA y con la información recolectada del simulador es aplicada al sistema óptico para predecir su comportamiento bajo las condiciones establecidas.

Esto significa, que el sistema óptico propuesto se ejecutó 8 veces en el simulador para cada una de las 4 posibles combinaciones de entrada ( $D_1, D_0$ ) permitiendo estimar los valores de los niveles lógicos (1 y 0) de potencia de las señales digitales de entrada que están expuestos en la tabla 4.1. Es pertinente aclarar, si el caso en que las potencias de los láseres ( $P(D1)=P(D0)$ ) son las mismas, esto presenta la situación si la combinación de entrada al sistema óptico es (01) ó (10) la misma potencia para ambos casos. Por tal motivo, la potencia de las señales digitales de entrada debe ser diferente al valor mayor al bit que representa ( $P_{D1} > P_{D0}$  ó  $P_{D1} < P_{D0}$ ).

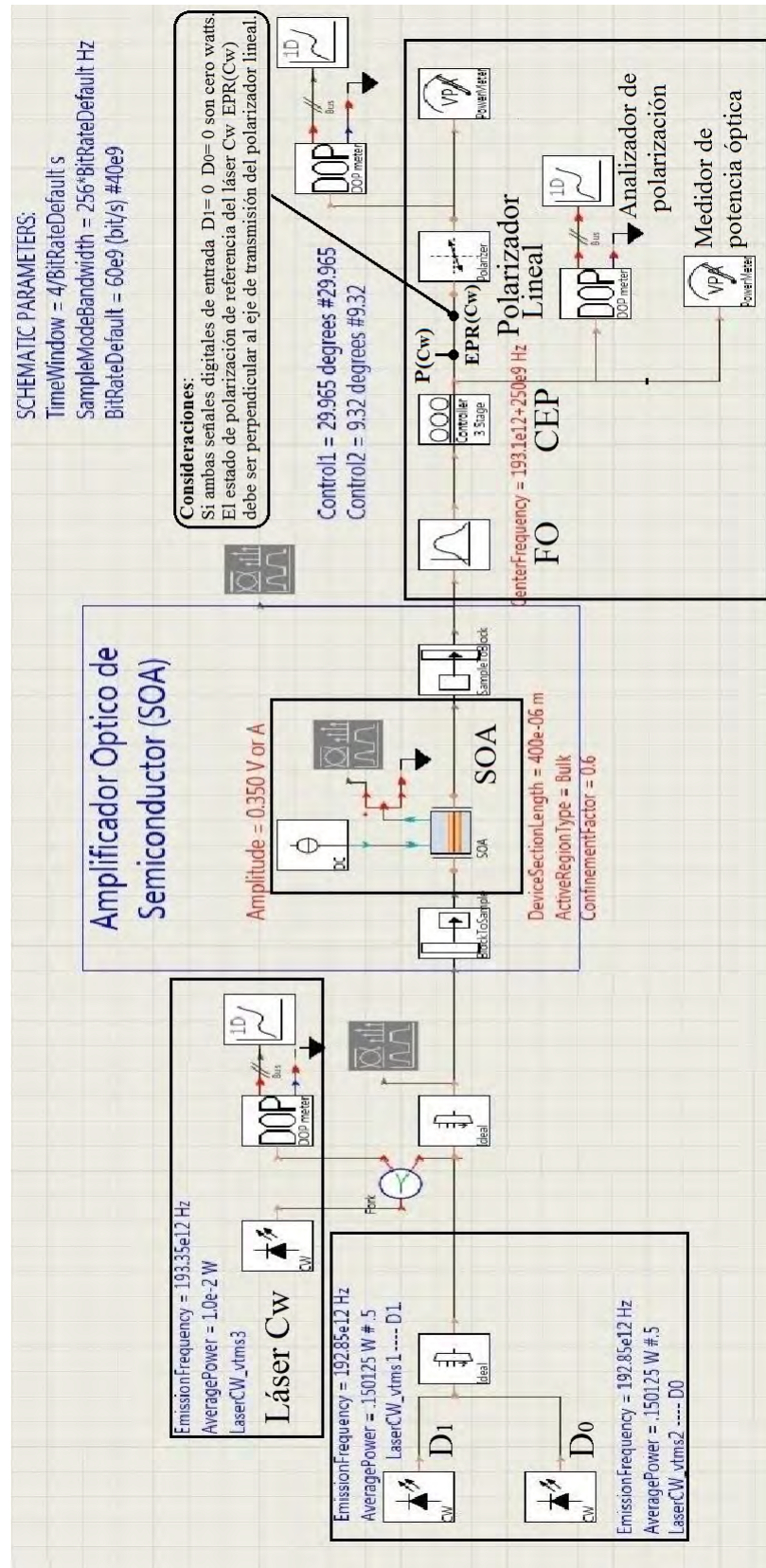


Figura 4.3: Representación del sistema óptico en el simulador *VPI-photonics*.



Desde el punto de vista funcional, el simulador puede ser tratado como un sistema de entrada y salida. Para poder realizar estas tareas, primero se considerara que el láser (Cw) a la entrada del SOA posee una potencia tan débil que fue 10 mw ó 10 dBm, en comparación con la que tienen las señales digitales de entrada. Para finalizar, las denominaciones hechas de las combinaciones de las señales de entrada en la tabla 4.1, se manipularan a un estado estático cada una de ellas, ya que estará presente a la entrada del sistema en un tiempo mucho mayor que aquel en el que ocurren los procesos físicos que determinan el comportamiento del SOA.

| Entradas digitales |       | Potencia de bits |            | Potencia total        |
|--------------------|-------|------------------|------------|-----------------------|
| $D_1$              | $D_0$ | $D_1$ (mw)       | $D_0$ (mw) | Señal de control (mw) |
| 0                  | 0     | 150.125          | 150.125    | 300.25                |
| 0                  | 1     | 150.125          | 383.4      | 533.6                 |
| 1                  | 0     | 616.8            | 150.125    | 766.92                |
| 1                  | 1     | 616.8            | 383.4      | 1000                  |

Tabla 4.1: Valores de potencia para la implementación del sistema óptico.

Los valores encontrados de las señales digitales de entrada son verificados desde el punto del estado de polarización de referencia EPR(Cw) del láser Cw donde se estableció para la potencia total de la señal de control sea igual a cero. Pero, cuando la potencia total aumenta de valor y la XPolM hace que el láser (Cw) pierda su estado de polarización de referencia EP-(Cw), la potencia a la salida del polarizador aumenta. No obstante, al aumentar la potencia la XGM reduce la amplitud del láser (Cw), es decir, la XGM y la XPolM tienen efectos antagónicos sobre la potencia que emerge del polarizador.

Para extraer los valores de potencia del sistema en el simulador se ejecutó 3 veces cada combinación que fue operado manualmente a fin de que las 4 combinaciones digitales de entrada, desde la combinación digital (00) hasta la (11). Para lograr este objetivo, el estado de polarización del láser (Cw) fue medido con el analizador de polarización (AEP) y modificado por medio del (CEP) a un estado de polarización lo más posible perpendicular al polarizador. Después de esto, se incidió nuevamente al polarizador y se midió la potencia  $P_o(Cw)$  para todas las combinaciones digitales de entrada utilizando el medidor de potencia óptica. Es decir, se determinó experimentalmente la función de transferencia lineal del sistema óptico, que se registra más adelante.

Desde otro punto de vista, el simulador es una herramienta que permite analizar el comportamiento del sistema óptico, por ejemplo, la progresión tanto de la amplitud como de la diferencia de polarización que experimentan la intensidad y rotación del láser (Cw) bajo cualquier combinación de la señal digital de entrada. En este sentido, el simulador es capaz de emular las condiciones en las que operara y analizar la respuesta de potencia  $P_o(Cw)$  como las respectivas variables que dependen de esta.

### 4.3. El efecto XGM

Para este caso, el experimento se ejecutó 3 veces para cada una de las 4 posibles combinaciones de entrada sintetizadas a partir de señales digitales de entrada de la tabla 4.1, respectivamente. Antes de mostrar los resultados de esta subsección, debe aclararse que el valor de la longitud de onda del láser (Cw) se eligió a 1551.590 nm en potencia de 10 mw, el cual, a partir de la simulación, mostro ser el que máxima potencia de salida en el SOA.

Los resultados obtenidos del láser (Cw) se estimaron a la salida del filtro óptico (FO) y del controlador de estado de polarización (CEP) (considerando insignificantes las pérdidas) son extraídos con un analizador de espectros o en su caso con un medidor de potencia óptica del simulador. Las potencias a la salida del SOA dependen de las diferentes combinaciones digitales de entrada, que será la potencia total P(Cw) antes de emerger del polarizador lineal. Las mediciones de potencia del láser (Cw) se muestran en la tabla 4.2.

| Entradas |       | Potencia P(Cw) |
|----------|-------|----------------|
| $D_1$    | $D_0$ | ( mw )         |
| 0        | 0     | 0.54885        |
| 0        | 1     | 0.43307        |
| 1        | 0     | 0.37379        |
| 1        | 1     | 0.30933        |

Tabla 4.2: Valores de potencia antes del polarizador lineal.

Notablemente, se observa la compresión de la ganancia del láser (Cw) conforme aumenta la potencia de las diferentes combinaciones digitales de entrada. Estos cambios en la potencia de 10 mw del láser (Cw) son ocasionados por el efecto de la XGM a la salida del SOA. Sin embargo, la tabla muestra que la mayor potencia del láser (Cw) es registrada por el simulador en la combinación digital de entrada en (00) que tiene la potencia total de 300.25 mw, lo cual el simulador arroja una mínima compresión de potencia registrando la potencia P(Cw) de 0.54885 mw, pero en caso contrario si la potencia total se eleva en cada combinación el efecto prevalecerá hasta la última combinación digital de (11) en potencia de 1000 mw , se registra la máxima compresión de potencia a la salida del láser (Cw) teniendo la mínima potencia P(Cw) de 0.30933 mw. Lo que demuestra el comportamiento del SOA, que cuando aumenta la potencia de las combinaciones de entrada, la XGM impone su acción típica que es la compresión de la potencia sobre el láser (Cw) después del paso del SOA, para cada uno de los términos de potencia del láser (Cw). La curva característica de la compresión de la potencia del láser (Cw) debido al efecto XGM es mostrada en la figura 4.4.

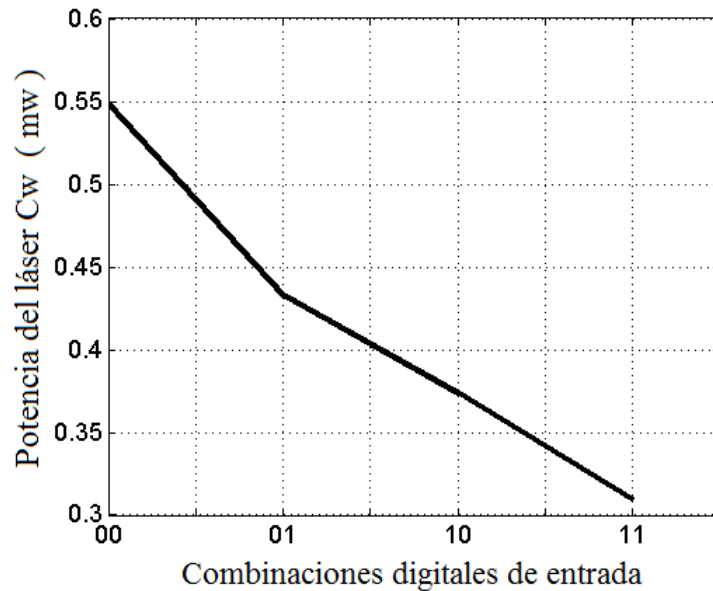


Figura 4.4: Representación de la potencia  $P(Cw)$  después del SOA.

La figura muestra los resultados obtenidos en el simulador, que son representados mediante una curva que indica como varía la respuesta de la potencia del láser  $Cw$  a medida que se incrementa las combinaciones digitales de entrada, que eventualmente se convierte en la potencia  $P(Cw)$  incidente antes del polarizador lineal.

La curva característica de la XGM muestra un comportamiento casi lineal con base a las mediciones realizadas en el simulador, bajo las condiciones establecidas, se observa la máxima potencia  $P(Cw)$  en la combinación de entrada en (00) y decrece al momento de aumentar las dos señales digitales de entrada hasta llegar a la combinación en (11) que comprime la potencia  $P(Cw)$  hasta un valor mínimo de potencia.

Si sabemos, lo cual es una parte de la ecuación de la ley de Malus, solamente falta verificar los diferentes niveles de potencia emergerán del polarizador lineal. En conclusión, la potencia que emerge del SOA, al momento de aplicar la arquitectura de *prueba/control* irá disminuyendo al láser ( $Cw$ ) con respecto a las combinaciones de las señales de entrada. Esto confirma el efecto del XGM del dispositivo SOA para el sistema óptico planteado.

## 4.4. El efecto XpolM

Tal y como se describió en la sección 3.4, la XpolM se debe a la potencia inducida y la perturbación del láser de interés que emerge del SOA. Es decir, que si incrementa la potencia total de cada una de las 4 diferentes combinaciones digitales de entrada, esto reflejara en el estado de polarización del láser (Cw) cambie al instante a la salida de SOA, por el efecto XpolM. De igual forma, el láser (Cw) tendrá una condición al ser introducido al SOA, lo que el estado de polarización lineal inclinado a 45 grados a longitud de onda 1551.590 nm con potencia de 10 mw, la cual en la simulación, mostro el cambio suficiente en el estado de polarización. Estos cambios de estados de polarización pueden cuantificarse por medio de los parámetros de Stokes del láser (Cw) que emerge el SOA, que son registrados a la salida del filtro óptico (lo que rechaza las longitudes adicionales y solamente da el paso al láser Cw) y después es introducido al control de estado de polarización (CEP) que cambiara a un estado de referencia por medio de un analizador de polarización lo registrara en el simulador. La manipulación del estado de polarización por el (CEP) es la colocación del punto denominado el estado de polarización de referencia EPR(Cw) del láser (Cw) (a la hora de hacerlo fue ajustado con la potencia de la combinación digital (00)) a un estado perpendicular al eje de transmisión vertical del polarizador lineal.

Con todo esto, será factible estimar teóricamente la distancia angular  $\theta$  que existe entre el estado de polarización de referencia EPR(Cw) del láser (Cw), explicado en la sección 3.4, y el estado de polarización que es inducido al laser (Cw) por una combinación digital de entrada particular. Conociendo este ángulo, inducido por la XPolM, se puede estimar la rotación del estado de polarización actual del láser (Cw) sobre la esfera de Poincaré. En nuestro caso, el experimento se ejecuta 3 veces para cada una de las 4 combinaciones digitales de entrada, que permitió extraer los parámetros de Stokes de cada estado de polarización reciente del láser (Cw), respectivamente. Las rotaciones angulares son registradas en la tabla 4.3 utilizando primeramente las expresiones: Primero, la distancia lineal entre estados de polarización  $c = \sqrt{(s_1^1 - s_1^2)^2 + (s_2^1 - s_2^2)^2 + (s_3^1 - s_3^2)^2}$ . y con el resultado anterior, se calcula la rotación angular ( desde el primer estado de polarización de referencia EPR-(Cw)), entonces la rotación angular se calcula con la ecuación:  $\theta = \arccos(1 - c^2/2)$ .

| Entradas |       | Rotación angular    |
|----------|-------|---------------------|
| $D_1$    | $D_0$ | Grados ( $\theta$ ) |
| 0        | 0     | 0                   |
| 0        | 1     | 4.414               |
| 1        | 0     | 7.659               |
| 1        | 1     | 12.500              |

Tabla 4.3: Valores de la rotación angular antes del polarizador limeal.

En la tabla anterior, se muestra los resultados obtenidos de la rotación angular de los 4 estados de polarización a partir de un estado de polarización referencia  $EPR(Cw)$ , se derivan los siguientes estados de polarización en función de la combinaciones digitales de entrada. Notablemente, las combinaciones (10) y (11) demuestran una mayor rotación angular de 7.659 y 12.50 grados, respectivamente. Cabe aclarar, que estos cambios en estado de polarización solamente pueden ser observados sobre la esfera de Poincaré, que es mostrada en la figura 4.5 indica el estado de polarización de referencia  $EPR(Cw)$  con los demás puntos de los estados de polarización que son representados sobre la esfera de Poincaré.

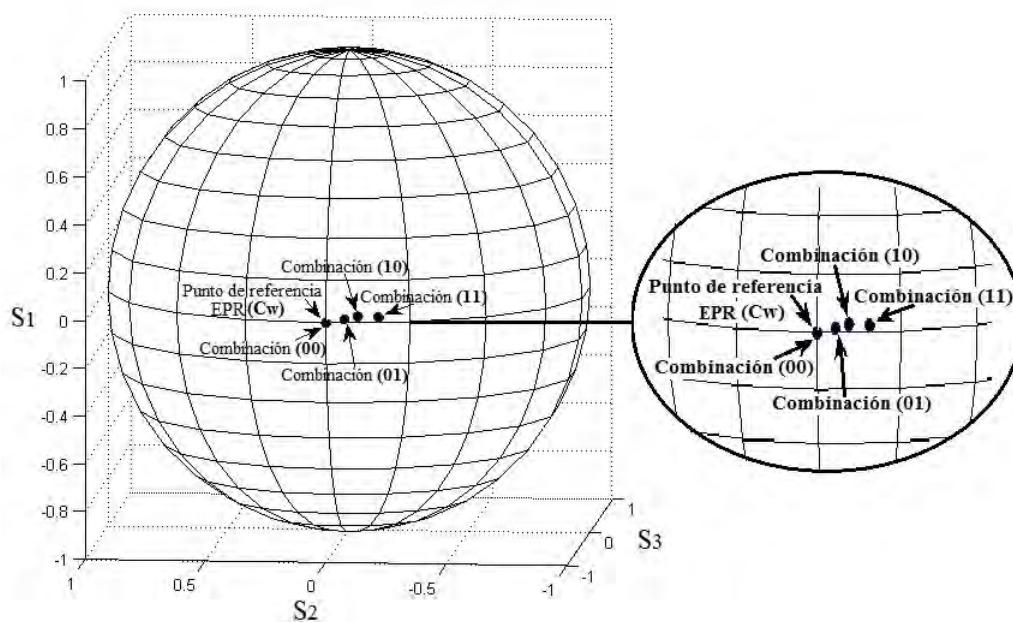


Figura 4.5: Localización de los estados de polarización en la esfera de Poincaré.

De la figura 4.5 solo nos interesa analizar, la relación de rotación angular que es adquirida por cada uno de los estados de polarización del láser ( $Cw$ ), debido al efecto  $XpolM$ , que relaciona la potencia inducida de las combinaciones digitales de entrada. Sin embargo, se pueden conseguir la rotación con solo el aumento de potencia a partir de la combinación digital (00) con potencia total de 300.25 mw se registra la rotación de cero grados (al hacerse referencia al mismo estado de polarización se tienen idénticos parámetros de Stokes), lo que significa que al momento del paso hasta la combinación digital (11) de potencia total de 1000 mw se perderá el estado de polarización  $EPR(Cw)$  al manifestarse el efecto  $XpolM$  a la salida de SOA generando la rotación angular desde el punto de referencia en  $EPR(Cw)$  al reciente punto de estado de polarización, el resultado de rotación es de 12.50 grados respectivamente.

Para la representación de la curva característica de la rotación angular, debido a la XpolM en el SOA, es mediante la figura 4.6 que muestra la rotación angular del estado de polarización del láser ( $C_w$ ) en función de las diferentes potencias de las combinaciones digitales de entrada.

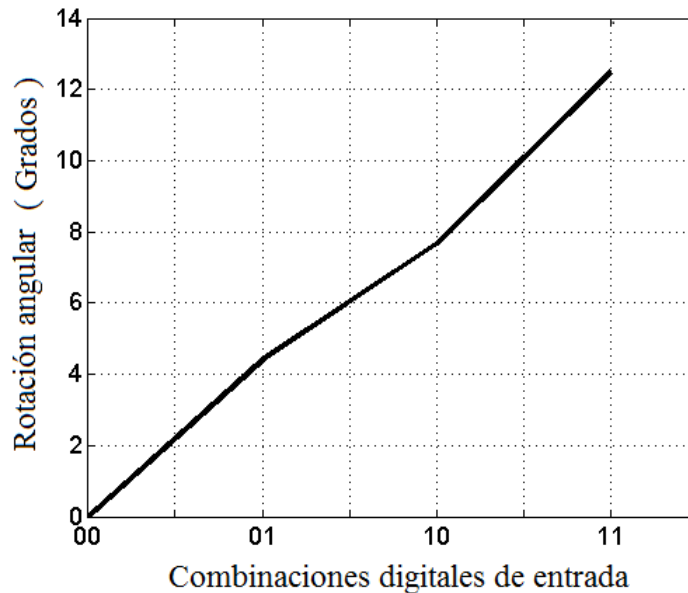


Figura 4.6: Representación de la rotación angular debido a la XpolM.

Lo que podemos encontrar en la gráfica de la figura 4.6 indica la representación de las combinaciones de las señales digitales de entrada en función de la respuesta de la rotación angular del láser ( $C_w$ ) a la salida del SOA, que tiene un crecimiento angular desde la combinación digital en (00) hasta la combinación digital de (11), que eventualmente será el punto máximo de rotación. Esto implica que se determina la segunda incógnita de la función de transferencia del polarizador lineal, que obedece a la ley de Malus. Lo cual responde a la expresión:  $P_o(C_w) = P(C_w) \cdot \text{sen}^2(\theta/2)$  que relaciona a la salida de potencia  $P(C_w)$  que está representada por los diferentes niveles de potencia del láser ( $C_w$ ) y también la magnitud de la rotación angular de los diferentes estados de polarización, según sea el caso. Esta situación implica que tanto la XGM, será predicha la potencia del láser ( $C_w$ ) y la XpolM, la rotación del estado de polarización; lo cual se tendrán ambos parámetros antes del polarizador lineal.

## 4.5. Resultado combinado con XGM y la XpolM

En la presente sección, se expone el producto combinado de los efectos XGM y la XpolM, que inducen cambios en los parámetros: Primero, la amplitud de potencia  $P(Cw)$  y después el estado de polarización del láser ( $Cw$ ) cuando emerge del SOA. Por tal motivo, el resultado deseado es una función lo más linealmente posible, que al introducir ambos efectos a un polarizador lineal se sintetiza una señal óptica en nivel de amplitud.

Con los datos obtenidos en las tablas 4.2 y 4.3 determinan las variables necesarias de potencia total  $P(Cw)$  y la rotación angular ( $\theta$ ) del láser ( $Cw$ ) que están presentes a la salida del SOA, que son partes fundamentales de la potencia  $P_o(Cw)$  que emergerá al aplicar la función de transferencia del polarizador lineal. Específicamente, el polarizador lineal obedece la ley de Malus mediante la expresión:  $P_o(Cw) = P(Cw) \cdot \sin^2(\theta/2)$  que cuantificará en forma lineal los niveles de potencia a la salida del polarizador, que representa un nivel de potencia de cada una de las 4 combinaciones de entrada. Finalmente, la señal recuperada es convertida en una sola señal óptica de diferentes niveles de potencia que contiene las dos señales digitales ópticas.

Por otro lado, el experimento se ejecutó 3 veces en la simulación para cada una de las 4 combinaciones digitales de entrada. Los resultados obtenidos son extraídos por el simulador mediante un medidor de potencia óptica colocado a la salida del polarizador lineal, lo que registrara los 4 niveles de potencia de las combinaciones digitales de entrada en la tabla 4.4.

| Entradas |       | Salida del sistema $P_o(Cw)$ |
|----------|-------|------------------------------|
| $D_1$    | $D_0$ | ( $\mu W$ )                  |
| 0        | 0     | 2.14                         |
| 0        | 1     | 3.87                         |
| 1        | 0     | 6.03                         |
| 1        | 1     | 9.92                         |

Tabla 4.4: Potencia de salida del sistema óptico.

En la tabla muestra la potencia de salida  $P_o(Cw)$ , la cual es evidentemente gobernada por XGM, la XPolM y por la ley de Malus que representaran a los valores de potencia que puede adquirir la señal multinivel para cada combinación digital de entrada. El termino  $\sin^2(\theta/2)$ , el cual es gobernado por la XPolM representa la fracción del termino  $P(Cw)$  de potencia del láser ( $Cw$ ). Efectivamente, la XPolM y la XGM son efectos antagónicos sobre la potencia de la señal de salida del sistema. Mientras, la potencia es incrementada en cada combinación digital, la XGM suprime la ganancia del SOA reduciendo la potencia de la señal convertida; la XPolM induce un cambio fuerte en el estado de polarización del láser ( $Cw$ ) permitiendo que este cruce el polarizador lineal.

El resultado final es una señal óptica multinivel representada en la figura 4.7, la cual se muestra en línea sólida la salida de potencia ( $P_o(C_w)$ ) como la salida producida por el sistema óptico propuesto en el simulador *VPI-photonics*, por otro lado, en línea punteada se representa la función óptica deseada, que es la señalización multinivel (la salida propuesta del sistema óptico); la línea recta de referencia es trazada desde el punto mínimo ( $2.14 \mu w$ ) hasta el máximo de potencia ( $9.97 \mu w$ ) de la salida del sistema óptico.

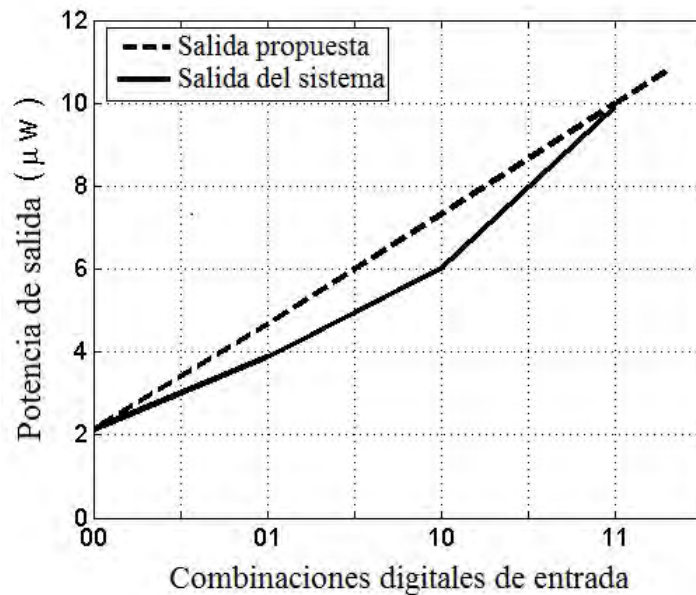


Figura 4.7: Representación de la salida del sistema óptico.

La figura muestra la representación de los valores obtenidos de salida de potencia  $P_o(C_w)$  sintetizados por el sistema óptico en el simulador. Sin embargo, que cuando se incrementa la potencia de las combinaciones digitales de entrada (00, 01, 10) se observa una curva de forma lineal a la deseada, esta desaparece cuando llega a la combinación digital (11) al incrementar la potencia de salida al nivel de  $9.92 \mu w$ .

En nuestro caso de interés, se enfoca el análisis en la curva de salida del sistema, entonces cuando ocurre la primera combinación digital en (00) con una potencia total de entrada diferente de cero watts arroja un nivel de potencia mínima, que es diferente a lo esperado para dicha combinación digital; la cual debe ser cero watts.

En respuesta a lo dicho anterior, la potencia establecida en la combinación digital (00) se manipulo de diferentes valores de potencia ajustando con el (CEP) sin lograr el ajuste exacto del estado de polarización a un estado perpendicular deseado.



Hubo momentos, que se alejaba drásticamente del estado perpendicular porque se cuantificaba en el simulador *software R* donde se visualizaba el punto deseado, entonces se tomó la decisión de aproximar lo más posible al estado perpendicular antes del polarizador lineal o donde los puntos de potencia fueran lo más posible a una representación lineal de la potencia recuperada de sistema.

Debido a esa limitación se encontró una mínima fluctuación de potencia, que fue extraída por el medidor de potencia óptica en el simulador, lo que registró la potencia  $P_o(C_w)$  de  $2.14 \mu w$  para la combinación digital de entrada es (00) de potencia total de 300.25 mw, en el caso contrario, el punto máximo de potencia se registró una potencia de  $9.97 \mu w$  a la salida del sistema óptico, aquella cuando la combinación digital de entrada es (11) con la potencia máxima de 1000 mw.

De manera particular, la figura 4.7 muestra la diferencia existente entre los diferentes niveles de potencia de la salida  $P_o(C_w)$ , esto puede cuantificarse el grado de alcance o bien la exactitud a la lineal recta deseada, con las 4 diferentes combinaciones digitales de entrada. Es decir, a la hora de sintetizar la función de salida del sistema óptico, es importante el porcentaje de exactitud de los niveles de potencia del sistema en comparación con la señalización multinivel deseada. En la tabla 4.5, se registra los valores de porcentaje de los niveles de potencia de la salida del sistema (línea solida) y las mediciones de las potencias de referencia (línea punteada).

| Entradas |       | Salida de $P_o(C_w)$ |
|----------|-------|----------------------|
| $D_1$    | $D_0$ | ( % )                |
| 0        | 0     | 0                    |
| 0        | 1     | 18.23                |
| 1        | 0     | 27.37                |
| 1        | 1     | 0                    |

Tabla 4.5: Porcentaje de salida del sistema óptico.

Los resultados obtenidos en la tabla, se observa que a potencias mayores de las combinaciones digitales (01, 10) muestran la mayor diferencia de potencia  $P_o(C_w)$ , que corresponden al segundo nivel con una diferencia de  $0.863 \mu w$  cuando la combinación digital es (01) de potencia total de 533.6 mw, para la siguiente combinación digital (10) de potencia total de 766.92 mw que refleja la diferencia del tercer nivel de potencia registrando la diferencia de potencia de  $1.296 \mu w$  que representa el 27.37%; el porcentaje obtenidos son de las diferencias que existen entre la representación lineal. De manera general, se comprueba que es posible sintetizar la función de transferencia lineal del sistema completamente óptico mediante el simulador *VPI-photonics*. El resultado es la transformación de dos señales digitales binarias ópticas a una tercera señal óptica caracterizada en niveles de amplitud en el dominio óptico empleando la función óptica de señalización multinivel.

# Capítulo 5

## Conclusiones

En este capítulo se presentan las principales conclusiones y las aportaciones de este trabajo de investigación. Además, las sugerencias para el desarrollo de un futuro trabajo.

### 5.1. Conclusiones

En este trabajo de investigación se abordó el problema que enfrentan los sistemas de telecomunicaciones a los grandes volúmenes de información. Con ello, para hacer frente al problema se emplea la tecnología óptica al emplear dispositivos ópticos.

Por tal motivo, se plantea el diseño de un sistema óptico que tiene como elemento central un SOA y un polarizador lineal, que permita la manipulación de los efectos de los fenómenos de la XGM y la XPolM del dispositivo SOA para sintetizar la señalización multinivel en el dominio óptico.

El SOA es un dispositivo activo de simple polarización eléctrica que es capaz de producir fenómenos lineales que son explotados para realizar diversas aplicaciones funcionales, el tamaño reducido de unas cuantas micras hace que su consumo de energía sea reducido y fabricación a partir de materiales semiconductores ofrece la eficiencia del 80 % aproximadamente a diferencia de otros materiales para la elaboración de semiconductores, ya que el material semiconductor para la fabricación es abundante en la naturaleza. La motivación de la implementación del SOA es fomentar la aplicación de dispositivos semiconductores, lo que se pretende en este trabajo es de promover, detonar e impulsar el empleo de los amplificadores ópticos de semiconductor en circuitos integrados, tarjetas fotónicas y equipos ópticos que realicen el procesamiento de señales en el dominio óptico.

Todo esto, será posible mediante el empleo del simulador del software *VPI-photonics*, que ha sido reconocido en diversas publicaciones de investigación donde se implementan diversas aplicaciones funcionales en el dominio óptico.

Este trabajo de investigación contribuye en el procesamiento de señales en el dominio óptico mediante la aplicación de la función de señalización multinivel. El sistema óptico realizara la función de transferencia lineal al transformar dos señales digitales ópticas de entrada a una tercera señal óptica caracterizada en amplitud de intensidad. Las simulaciones expuestas de las secciones 3.3 y 3.4 emulan el comportamiento del SOA, que es posible implementar su operación el simulador del software *VPI-photonics*; el cual se dará cuenta el desempeño del sistema óptico propuesto.

La respuesta del producto final del sistema óptico del producto XGM y XpolM que emergen del polarizador lineal, se obtuvo un punto inicial de fluctuación de  $2.14 \mu$  que se esperaba la potencia de 0 watts. Este problema radico en la posición puntual del estado de referencia  $EPR(Cw)$  del láser ( $Cw$ ) que emerge del SOA, que fue aproximado lo más posible al punto del estado perpendicular sobre la esfera de Poincaré al punto deseado antes del polarizador lineal (a la hora de innumerables intentos con niveles de potencias de la combinaciones digitales como es la primera combinación digital (00) solamente fue la aproximación a lo más cercano posible sin exactitud al estado de referencia del punto deseado). A partir de esta limitación se trazó la línea recta de referencia para cuantificar la diferencia entre la salida deseada y la salida del sistema. En el caso contrario, el estado perpendicular fuera vertical al polarizador con eje de propagación horizontal se produce una función de transferencia lineal decreciente.

Las mínimas potencias generadas pueden ser manipuladas con un amplificador óptico a una potencia considerable para la transmisión por fibra y finalmente detectada la codificación aceptable sea cuantificada y conforme un circuito de decisión determine la información de los bits recibidos de información.

El resultado final comprueba que al sistema se le introducirán dos longitudes de onda de las dos señales digitales de entrada que viajan por la fibra ocupando el doble del ancho espectral. La solución radica en implementarse el sistema óptico reduce a una sola señal óptica a una sola longitud de onda de cualquiera de las dos o diferente, que contiene ambas señales digitales; lo que permite es transmitir una sola señal que reduce a la mitad del espectro original en la fibra, que eventualmente se convierte en la eficiencia espectral de los sistemas de telecomunicaciones óptico.

## 5.2. Contribuciones

En el presente trabajo de investigación se contribuyó al diseño de un sistema óptico que permita implementar la función de señalización multinivel que emplea los efectos no lineales del dispositivo SOA para desarrollar el procesamiento de señales ópticas en el dominio óptico. Todo esto, mediante en el simulador *VPI-photonics*.

Las contribuciones del presente trabajo de investigación son las siguientes:

- Investigación de los dispositivos ópticos de las librerías del software *VPI-photonics* como son: En primer lugar, la funcionalidad de los bloques de los dispositivos ópticos e instrumentos de medición de salida y los dispositivos ópticos auxiliares, que serán empleados en el sistema óptico planteado.
- Un bosquejo general en las librerías del software *VPI-photonics* para encontrar un amplificador óptico SOA que se adapte a nuestras necesidades. La principal cualidad el comportamiento del SOA a los efectos no lineales XGM y la XpolM, que es validado su función en el simulador.
- La validación y caracterización de los efectos de los fenómenos XGM y la XpolM del dispositivo SOA elegido en el simulador *VPI-Photonics*
- La caracterización de los dispositivos ópticos del sistema óptico planteado, los cuales son: Primero, los dispositivos pasivos (polarizador, filtro óptico, controlador de estado de polarización) y los activos (láser y SOA, principalmente).
- Interpretación de gráficas y resultados derivados de la ejecución del sistema óptico completo en el simulador *VPI-photonics*, con el objeto de realizar una explicación más a detalle del sistema óptico presentado en este trabajo de investigación.
- La explicación de operación del sistema óptico completo en el simulador *VPI-photonics*. De manera general, que demuestre el producto final que es el encapsulado de dos señales digitales ópticas de entrada a una tercera señal óptica de salida; lo que maximice la eficiencia espectral en las redes de telecomunicaciones ópticas.

### 5.3. Trabajo futuro

Dentro de los trabajos a futuro se pretende mejorar y abarcar aspectos relacionados a esta investigación que son:

- La investigación más exhaustiva del SOA para ampliar sus aplicaciones funcionalidades, que da resultado al aprovechamiento de los efectos no lineales para una posible expansión de la transformación de señales en el dominio de la amplitud.
- Consideraciones en los dispositivos auxiliares para aprovechar las cualidades de dispositivo SOA. Por ejemplo, fibras ópticas que conserven el estado de polarización, equipos especializados para el tratamiento de señales ópticas como: detectores de niveles de amplitud óptica que codifique los bits recibidos y transmitidos con la función de señalización multinivel.
- Expandir el número de entradas digitales al sistema óptico, con la técnica de señalización multinivel realice el procesamiento de señales en el dominio óptico y el resultado la eficiencia espectral las redes de comunicaciones de fibra óptica.
- La motivación a la investigación de equipos de detección de niveles de potencia óptica para codificar los bits transmitidos y recibidos de la señal de información.
- La investigación y desarrollo de diversos arreglos ópticos, que en conjunto con el sistema óptico multinivel que le permita diversas funcionalidades en los sistemas de telecomunicaciones ópticos para la transmisión, distribución, modulación, entre otras funciones ópticas, que agilice el traslado de la información.

# Bibliografía

- [1] World internet usage and population statistics. 31 March 2017.<http://www.internetworldstats.com>. [Último acceso: 19 Noviembre 2017].
- [2] Agrawal, G. y Habbab, I. (1990). Effect of a four-wave mixing on multichannel amplification in semiconductor laser amplifiers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 26(3): 501-505.
- [3] Chow, W. W. y Koch, S. W. (1999). *Semiconductor-Laser Fundamentals*, Editorial Springer, Berlin.
- [4] Duta, N. K. y Wangg, Q. (2006). *Semiconductor optical amplifier*. World Scientific, New Jersey.
- [5] Dorren, H., Lenstra, D., Liu, Y., Hill, M., y Khoe, G.-D. (2003). Nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers: theory and application to all-optical flip-flop memories. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 39(1): 141-148.
- [6] ITU grid. Reglamento de Radiocomunicaciones segunda edición. Suiza Ginebra, Año 2012.
- [7] Kim, J., Laemmlin, M., Meuer, C., Bimberg, D., y Eisenstein, G. (2009). Theoretical and experimental study of high-speed small-signal cross-gain modulation of quantumdot semiconductor optical amplifiers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 45(3):240-248
- [8] Kumar Das, N., Yamayoshi, Y., y Kawaguchi, H. (2000). Analysis of basic four-wave mixing characteristics in a semiconductor optical amplifier by the finite-difference beam propagation method. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 36(10): 1184-1192.
- [9] Marcuse, D. (1974). *Theory of dielectric optical waveguides*. Academic Press, New York.

- 
- [10] Michael J. Connelly. University of Limerick, Ireland, *Semiconductor Optical Amplifier*, New York, año 2004.
- [11] Goldstein, D. (2003). Polarized light. Marcel Dekker, New York, segunda edición
- [12] Gopalakrishnapillai, B., Premaratne, M., Nirmalathas, A., y Lim, C. (2005). Power equalization using polarization rotation in semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(8): 1695-1697.
- [13] Guo, L. y Connelly, M. (2004). Demonstration of birefringence in a bulk semiconductor optical amplifier and its application to all-optical wavelength conversion. *Technical Digest: Symposium on Optical Fiber Measurements, 2004.*, páginas 167-170.
- [14] Içsevçi, A. y W. E. Lamb, J. (1969). Propagation of light pulses in a laser amplifier. *Physical Review*, 185(2): 517-545.
- [15] Polarización lineal. (2003). Verificación experimental de la ley de Malus.
- [16] Maldonado, R., Soto Ortiz, H., y Solis, K. (2008). Simplified model for estimating the cross-polarization modulation in a bulk semiconductor optical amplifier. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 44(9): 850-857.
- [17] Manning, R., Antonopoulos, A., Le Roux, R., y Kelly, A. (2001). Experimental measurement of nonlinear polarisation rotation in semiconductor optical amplifiers. *Electronics Letters*, 37(4): 229-231
- [18] Rosencher, E. y Vinter, B. (2004). *Optoelectronics*. Cambridge, Cambridge.
- [19] Saleh, B. E. A. y Teich, M. C. (2002). *Photonics*. John-Wiley, New York.
- [20] Sargent, M. I., Scully, M. O., y Lamb Jr., W. E. (1974). *Laser physics*. Addison-Wesley, Massachusetts.
- [21] Soto, H., Erasme, D., y Guekos, G. (1999). Cross-polarization modulation in semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(8): 970-972
- [22] Peter W. Milonni and Joseph H. Eberly. *Plasser Physics*. Editorial Wiley
- [23] Shimoda, K. (1984). *Introduction to laser physics*. Springer, Berlin.
- [24] Tomasi Wayne. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Edición 4*, Editorial Pentice Hall: 470-473

- 
- [25] Xinliang, Z., Dexiu, H., y Deming, S. J. L. (2000). En Novel XGM wavelength conversionscheme based on SLAOLM , páginas 159 y 160.
- [26] Yang, X., Li, Z., Tangdionga, E., Lenstra, D., Khoe, G., y Dorren, H. (2004). Subpicosecond pulse generation employing an soa-based nonlinear polarization switch in a ring cavity. *Optics Express*, 12(11): 2448-2453.
- [27] Zhang, J., Wu, J., Feng, C., Xu, K., y Lin, J. (2007). All-optical logic or gate exploitingnonlinear polarization rotation in an soa and red-shifted sideband filtering. *IEEE Photonics Technology Letters*, 19(1): 33-35.
- [28] Zhao, M., De Merlier, J., Morthier, G., y Baets, R. (2002). Dynamic birefringence of the linear optical amplifier and application in optical regeneration. *Selected Topics in Quantum Electronics*, 8(6): 1399-1404.