

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

# **Efecto no lineal SPM y XPM en redes TWDM-PON**

Juan Carlos López Bermúdez

Ingeniería en Telecomunicaciones

Nelson Darío Gómez Cardona

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**15 de Agosto de 2018**

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

En el presente proyecto el propósito es realizar un estudio de una arquitectura TWDM-PON).

El estudio se realizó a través de una simulación por medio de un software especializado (Optisystem) que permite ofrecer información valiosa de rendimiento y tolerancia con el fin de evaluar la influencia de los efectos no lineales SPM y XPM en la propagación de la señal en una red PON actualizada y con coexistencias de tecnologías como lo son TDM y WDM.

Se encontró que las simulaciones indican la calidad máxima del enlace en la infraestructura diseñada y el desempeño óptimo antes de presentar deterioro de la señal.

También se comprobó que el impacto de los efectos no lineales se ven reflejados con altas potencias, afectando la transmisión.

Palabra clave: red óptica pasiva de multiplexación por división de tiempo y de longitud de onda, TWDM-PON, auto modulación de fase, SPM, modulación de fase cruzada, XPM, red pasiva óptica, PON, multiplexación por división de tiempo, TDM, multiplexación por longitud de onda, WDM.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## ABSTRACT

---

In the present project the purpose is to carry out a study of a TWDM-PON architecture).

The study was carried out through a simulation by means of a specialized software (Optisystem) that allows to offer valuable performance and tolerance information to evaluate the influence of the non-linear effects SPM and XPM on the propagation of the signal in a red PON updated and with co-existing technologies such as TDM and WDM.

It was found that the simulations indicate the maximum quality of the link in the designed infrastructure and the optimal performance before witnessing the signaling.

It was also found that the impact of non-linear effects is reflected with high power, affecting transmission.

Keyword: Passive optical time division multiplexing wavelength and wavelength, TWDM-PON, auto phase modulation, SPM, cross phase modulation, XPM, passive optical red, PON, time division multiplexing, TDM, multiplexing per wavelength, WDM.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RECONOCIMIENTOS

---

Primero agradecer a Dios

Quisiera agradecer a mi esposa, a mi madre quienes estuvieron incentivándome y apoyándome desde el primer día y sobre todo por su amor.

Luego me gustaría reconocer la gran ayuda que me ha brindado mi tutor, Nelson Darío Gómez Cardona; quien siempre tuvo la mejor disposición en ayudarme y compartir sus conocimientos para desarrollar esta investigación. Gracias a su guía y su colaboración esto se ha hecho posible.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## ACRÓNIMOS

---

FFTx	Fibra hasta (Fiber to the x)
FWM	Mezcla de cuatro ondas (Four Wave Mixing)
PON	Passive optical red (Passive optical network)
AON	Red activa óptica (Active optical network)
GVD	Dispersión de velocidad de grupo (Group speed dispersion)
TDM	Multiplexación por división de tiempo (time division multiplexing)
WDM	Multiplexación por división de onda (multiplexing per wavelength)
TWDM-PON	Multiplexación de división de tiempo y longitud de onda (Passive optical time Division multiplexing wavelength and wavelength)
NRZ	No regreso a cero (Non-Return-to-Zero)
SBS	Dispersión de Brillouin simulado (Simulated Brillouin Scattering)
SPM	Automodulación de Fase (Self-Phase Modulation)
XPM	Modulación de Fase Cruzada (Cross Phase Modulation)
SRS	Dispersión Raman simulada (Simulated Raman Scattering)
SSFM	Método de Fourier de paso dividido (Split-Step Fourier Method)
S-SSFM	Método simétrico Fourier de paso dividido (Split-Step Fourier Symmetrized Method)
IEEE	El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
UIT-T	Sector de Normalización de las Telecomunicaciones (The International Telecommunication Union)
FSAN	Servicio completo de la red de acceso (Full Service Access Network)
ONU	Unidad óptica de red (optical network unit)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
2.	MARCO TEÓRICO .....	3
1.	ARQUITECTURA PON .....	5
1.1	Multiplexación por división de tiempo PON (Time Division Multiplexing PON, TDM-PON) (UIT-T G.984.1) .....	5
1.2	Multiplexación de división de longitud de onda PON (Wavelength Division Multiplexing PON, WDM-PON) (UIT-T G.989.2) .....	6
1.3	Multiplexación de división de tiempo y longitud de onda PON (Time and Wavelength Division Multiplexing PON, TWDM-PON) - (UIT-T G.989.2) .....	8
2.	EFFECTOS LINEALES Y NO LINEALES EN SISTEMAS CON ARQUITECTURA PON .....	10
2.1	Efectos lineales en fibras ópticas .....	10
2.2	Efectos no lineales en fibras ópticas.....	14
3.	METODOLOGÍA.....	18
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	29
	REFERENCIAS .....	30
	INDICE DE ILUSTRACIONES .....	31
	ANEXOS.....	32

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

# 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años en el área de las telecomunicaciones es muy frecuente escuchar sobre la capacidad de las redes y los sistemas de información todo eso debido al gran flujo de volumen de información que los usuarios demandan en la utilización de servicios interactivos como el internet de alta velocidad, el video de alta definición, la televisión digital de alta definición, los juegos en línea, los videos en tiempo real, entre otros, convirtiéndose el internet de gran ancho de banda en una necesidad para las tendencias de crecimiento, la optimización de infraestructuras, la innovación y la productividad económica en escenarios donde más usuarios pueden estar conectados.

Para satisfacer dicha necesidad la tendencia es la masificación de redes de fibra óptica posibilitando redes de acceso que soportan tasas de varios Gbps y que permiten la utilización de un solo hilo de fibra óptica para llevar los servicios a múltiples usuarios desde una central de comunicaciones.

El acceso a banda ancha de gran capacidad se convirtió en una prioridad para los proveedores de servicios de internet (internet services provided, ISP) la tecnología de red pasiva óptica (passive optical network, PON) se ha desplegado ampliamente en varios países del mundo así como en Latinoamérica tomando de ejemplo a Brasil y México; donde ofrecen capacidades de Gigabit (Gigabit-Capable PON, GPON) tecnología estandarizada por la ITU en la recomendación G.984.3 (02/2004) ofreciendo tasa de bits máxima en bajada de 2.5Gbps y en subida de 1.5Gbps compartida en una topología punto multi-punto (Point to multi-point, P2MP) entre 64 o 128 usuarios finales a través de diferentes técnicas de modulación y multiplexación.

Entre las técnicas de modulación empleadas esta la multiplexación por división de tiempo (time división muliplexed PON, TDM-PON) y la multiplexación por longitud de onda

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

(Wavelength división multiplexed PON, WDM\_PON). Sin embargo, existen efectos inherentes a los medios de transmisión que sufre una señal al ser transmitida que están relacionados con la distancia, la potencia de transmisión y la tasa de transmisión.

La coexistencia de TDM y WDM suponen viabilidad para la implementación escalable en el mediano plazo con este tipo de modelo de implantación ofrece ventajas como transporte en el protocolo, seguridad a nivel de capa física y modernización de red. Este modelo se encuentra con recomendaciones en la ITU-T G.989.2 TWDM-PON nueva generación (new generation dos, NG-PON2).

En esta investigación se presentan análisis y consideraciones de los efectos no lineales SPM y XPM en un diseño con coexistencia de redes TWDM-PON, los resultados de este trabajo aportaran una referencia de información útil para los ISP donde se involucran servicios que dependen de la escalabilidad de los diseños y las coberturas máximas en las que se pueden evitar efectos no deseados en la transmisión de la señal.

Para realizar las pruebas se escoge una fibra óptica monomodo tipo estándar (Standar single mode fiber, SSMF), una velocidad de transmisión de 622Mbps, una longitud de 40Km y 5 potencias de transmisión diferentes 0, 10, 20, 30 y 40dBm.

Este trabajo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se describe la teoría que enmarca las redes PON, las modulaciones TDM-PON, WDM-PON y los efectos no lineales SPM, XPM. En la sección 3 se describe el escenario de la simulación. En la sección 4 se realiza el análisis de los resultados. En la sección 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2. MARCO TEÓRICO

La estructura general de una red de telecomunicaciones consta de tres partes principales: El núcleo o columna vertebral (backbone), la red metropolitana y la red de acceso. Las redes Backbone se utilizan para el transporte de larga distancia, las redes metropolitanas se usan para funciones de multiplexación y administración de un gran tráfico y las redes de acceso se utilizan para dar acceso al usuario final. Una red de acceso óptico, también llamada fibra hasta "x" (Fiber to the x, FTTx) donde "x" puede ser "casa = H (Home)", "anden = C (Curb)", "premisas = P (Premises)"; dependiendo de hasta donde se instala la fibra o qué tan cerca está del usuario.

Una red óptica pasiva (passive optical network, PON) es un tipo particular de redes FTTx que optimiza la infraestructura de fibra punto multipunto (Point to multipoint, P2MP) en las que los divisores ópticos (splitter) remotos no energizados se utilizan para compartir y separar las señales que se transportan en la infraestructura, permitiendo que una única fibra óptica sirva a múltiples instalaciones sin necesidad de elementos activos (energizados) en la red. En comparación con una red óptica activa (active optical network, AON), donde se utilizan elementos de conmutación que requieren alimentación eléctrica para poder transmitir las señales.

El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) es la asociación mundial de ingenieros dedicada a la estandarización y el desarrollo en áreas técnicas y el Sector de Normalización de las Telecomunicaciones (The International Telecommunication Union, UIT-T) es el órgano permanente de la Unión Internacional de Telecomunicaciones; ambos entes han propuesto una hoja de ruta para definir el estándar para el futuro, requisito para soportar más ancho de banda manteniendo del diseño de las redes GPON.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- UIT-T bajo el grupo Servicio completo de la red de acceso (Full Service Access Network, FSAN) define: 2.5 GPON (G.984.1, 2009), 10 GPON (G.989.2, 2017)
- IEEE definir: GEAPON, 10 GEAPON

Gigabit PON (Gigabit PON, GPON) está aprobada por la ITU-T en 7 recomendaciones, la G.984.1, G.989.2, G.989.3, G.989.4, G.989.5, G.989.6 y G.989.7.

Este estándar comienza a ser definido en marzo de 2008 y la recomendación G.989.7 fue publicada en Julio de 2010. Los objetivos de esta tecnología son ofrecer un ancho de banda mucho más alto que sus predecesoras y alcanzar una mayor eficiencia para el transporte de servicios basados en IP con splitt de 1:64, con distancias de hasta 40 km.

Fuente: Elaboración propia 1 (diseño inspirado en (G.984.1, p9)).

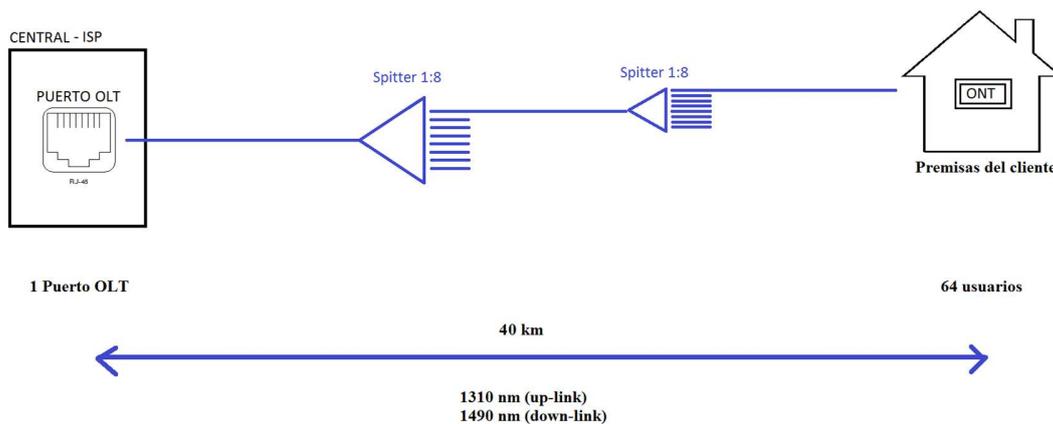


Ilustración 1: Arquitectura GPON

Los elementos de una red PON consiste en un equipo de borde llamado Línea terminal óptica (Optical Line Terminal, OLT) en el sitio del proveedor de servicios de internet, un número de Red terminal óptica (Optical Network Terminal, ONT) cerca de los usuarios finales y componentes pasivos llamados nodos de retorno (return node, RN).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- La OLT se encuentra en la central del proveedor de servicios y es el equipo de borde que realiza la conexión de las redes MPLS que dan acceso a las interconexiones mundiales e internet a los usuarios finales, toda esta información transmitida por las redes de fibra óptica monomodo utilizadas por la red óptica pasiva. Así mismo, la OLT coordina las señales de ingresos de multiplexación desde la asignación de ancho de banda ascendente de las ONTs.
- La ONT o unidad óptica de red (optical network unit, ONU) como también se conoce en la literatura, se encuentra en las premisas del cliente. Una ONT es un dispositivo que transforma las señales ópticas entrantes en electrónica en las instalaciones de un cliente con el fin de proporcionar servicios de telecomunicaciones a través de una red de fibra óptica.
- Un RN pasivo corresponde a un dispositivo óptico pasivo, que podría ser un divisor de potencia que divide la potencia óptica de una fibra entre varias fibras y viceversa, para combinar señales ópticas de múltiples fibras en una o un multiplexor óptico donde la información entrante de cualquier puerto de entrada se filtra y enruta a los puertos de salida.

## **1. ARQUITECTURA PON**

Se han analizado diferentes tipos de arquitecturas para satisfacer los requerimientos de las Redes Ópticas Pasivas.

### **1.1 Multiplexación por división de tiempo PON (Time Division Multiplexing PON, TDM-PON) (UIT-T G.984.1)**

Una arquitectura TDM-PON utiliza un divisor de potencia pasivo como el nodo remoto que divide la potencia de la señal entrante a las diferentes ONT conectadas. Aquí, todos los usuarios comparten la misma longitud de onda para transmitir la información.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En sentido descendente, la señal del OLT se multiplexa en diferentes intervalos de tiempo y se difunde a varias ONT, donde cada ONT reconoce los datos a través de las etiquetas de dirección incrustadas en la señal. El tráfico ascendente es transmitido por cada ONT en modo de ráfaga.

Fuente: Elaboración propia 2 (diseño inspirado en (G.984.1, p.21)).

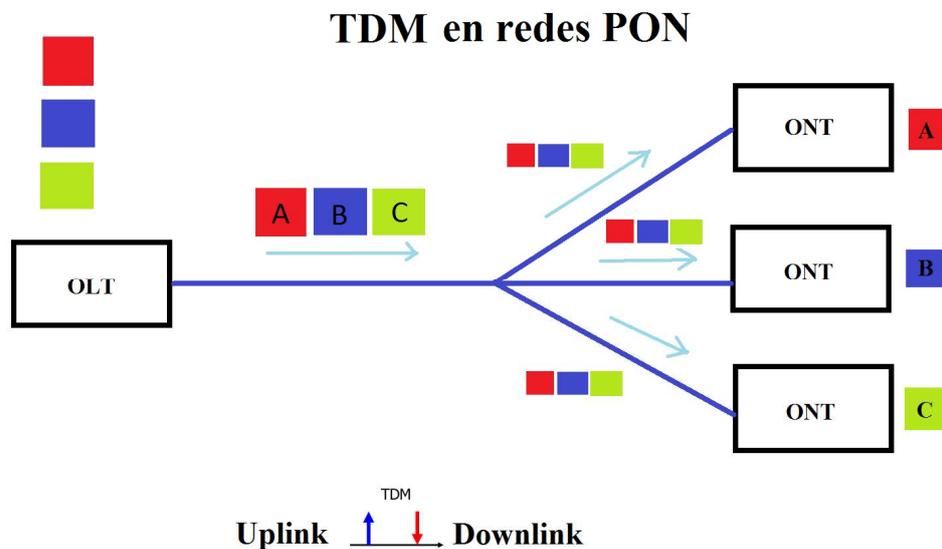


Ilustración 1: Arquitectura TDM en redes PON

## 1.2 Multiplexación de división de longitud de onda PON (Wavelength Division

### Multiplexing PON, WDM-PON) (UIT-T G.989.2)

Una arquitectura WDM-PON utiliza un acoplador WDM pasivo con nodos ópticos. Las señales para diferentes ONTs se llevan en longitudes de onda independientes y se multiplexan en una infraestructura de fibra compartida. Cada ONT sólo podría recibir su propia longitud de onda usando un filtro sintonizable seguido de un fotorreceptor para seleccionar una longitud de onda específica, creando una conexión lógica punto a punto y cada ONT puede transmitir a su propia tasa de bit

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

(bit rate) sin pérdidas por la división de potencia y ancho de banda dedicado con calidad de servicio (Quality of service, QoS).

WDM tiene mejor seguridad que TDM permitiendo la localización de averías simple. Asimismo, WDM presenta una mejor escalabilidad que resulta en una mayor capacidad de ancho de banda, sin modificación de la infraestructura TDM, y se logran alcances largos. WDM-PON aumenta la eficiencia espectral de las redes de acceso aprovechando el alto ancho de banda óptico de las fibras ópticas. Sin embargo, los dispositivos WDM son significativamente más caros y están limitados por el número de longitud de onda disponible, por lo tanto, se necesitan OLT de gran alcance. También cada ONT necesita un láser sintonizado en la longitud de onda específica para transmitir.

Fuente: Elaboración propia 3 (diseño inspirado en (G.989.2, p.9)).

### WDM en redes PON

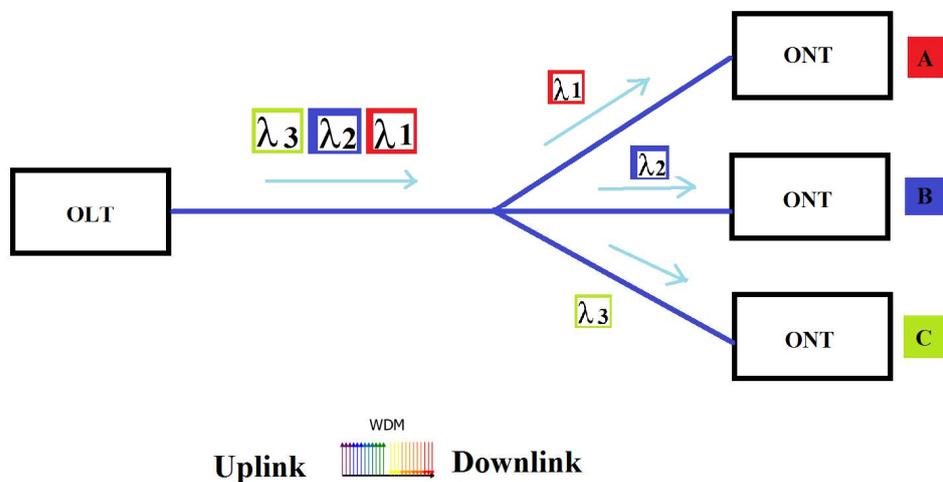


Ilustración 2: Arquitectura WDM en redes PON

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 1.3 Multiplexación de división de tiempo y longitud de onda PON (Time and Wavelength

#### Division Multiplexing PON, TWDM-PON) - (UIT-T G.989.2)

Una arquitectura TWDM-PON las longitudes de onda que viajan a través de la fibra bajo el modelo WDM se transmiten a todos los usuarios que usan un divisor de potencia con nodos ópticos y dejan los tiempos de los intervalos disponibles para las MAC (Media Access Control) como el modelo TDM; en este caso, la ONT debe establecer un túnel. Esto podría lograrse utilizando un filtro óptico RX sintonizado a una longitud de onda específica para transmitir la información.

Utiliza cuatro longitudes de onda por fibra, dotando de una capacidad total de 40 Gbps permite que se proporcione diferentes servicios sobre cada longitud de onda. Esto ayuda a poder suministrar más servicios con la misma infraestructura.

El ancho de banda logrado es mayor en el esquema WDM / TDM PON como consecuencia del mayor número de canales. El objetivo de TWDM es garantizar la compatibilidad con otras arquitecturas PON debido a que trabaja en ventanas de transmisión y recepción diferentes.

Fuente: Elaboración propia 4 *diseño inspirado en (G.989.2, p.17)*.

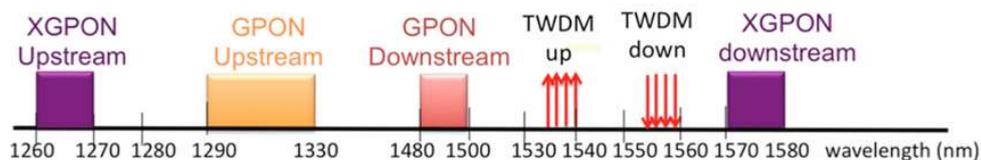


Ilustración 3: escenario de diferentes arquitecturas en el espectro electromagnético

Otra diferencia con las otras arquitecturas está en la OLT, ya que en TWDM el RN es un divisor de potencia que transmite todas las longitudes de onda a las ONTs mediante un filtro sintonizable que selecciona la longitud de onda específica; esto

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

es una ventaja de TWDM porque la ONT no requiere configuración y mantenimiento complejos.

Fuente: Elaboración propia 5 *diseño inspirado en (G.989.2, p.17)*.

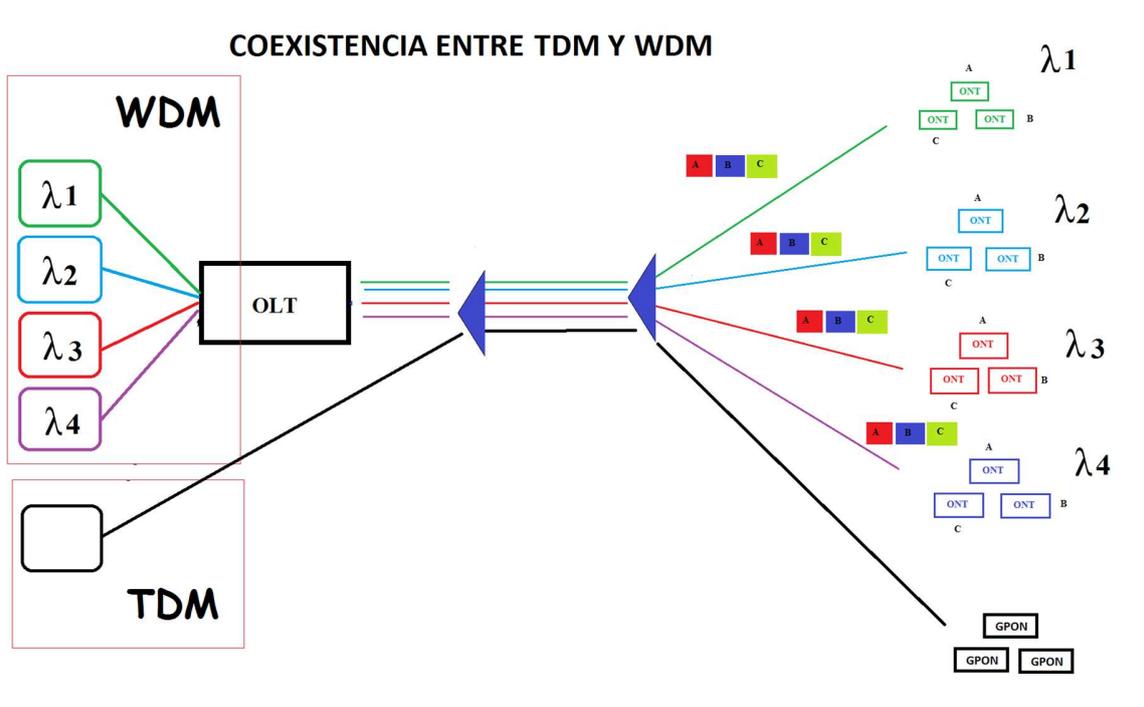


Ilustración 4: Arquitectura combinada TWDM y GPON

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

	TDM	WDM	TWDM
<b>Estandar</b>	UIT-T G.984	UIT-T G.989.2	UIT-T G.989.2
<b>Datos (Down/Up)</b>	2.5G/1.25G	1G/1G	40G/10G
<b>Longitud de onda (Down/Up)</b>	2	12	4
<b>Usuarios</b>	64	80	64
<b>Tecnología</b>	GPON	PON	Coexiste con GPON
<b>Potencia OLT</b>	Baja	Alta	Baja
<b>Potencia ONT</b>	Media	Baja	Media
<b>Alcance (km)</b>	Menor 40	20 a 40	Menor 40

Tabla 1: Tabla comparativa TDM, WDM y TWDM (*Norma ITU-T G984.1 y Norma ITU-T G989.2 [1,2]*)

## 2. EFECTOS LINEALES Y NO LINEALES EN SISTEMAS CON ARQUITECTURA PON

Las señales son afectadas por efectos lineales y no lineales en la fibra óptica en general estos efectos degradan las señales ópticas multiplexadas y condicionan el desempeño óptimo de los sistemas PON.

### 2.1 Efectos lineales en fibras ópticas

Los principales fenómenos lineales que afectan los sistemas ópticos son:

- Dispersión cromática (chromatic dispersion, DC)
- Dispersión de modo polarizado (Polarized mode dispersion, PMD)

#### 2.1.1 La dispersión cromática

Es un efecto lineal que limita el alcance y la tasa de bit y es considerada la limitación más influyente en los sistemas de comunicaciones ópticos. La dispersión cromática produce un efecto temporal en los pulsos de transmitidos, causando interferencia entre símbolos; Este fenómeno ocurre porque las fuentes ópticas moduladas no emiten solo una frecuencia por lo tanto puede haber diferencias de retardo de propagación entre los diferentes componentes espectrales de la señal transmitida.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La respuesta media, en general, depende de la frecuencia  $\omega$  óptica. Esta propiedad, conocida como dispersión cromática, se manifiesta a través de la dependencia del índice de refracción,  $\eta$ , de la frecuencia,  $\omega$ , es decir, de la relación  $\eta(\omega)$ .

La dispersión de fibra juega un papel crítico en la propagación de pulsos ópticos cortos debido a que diferentes componentes espectrales asociadas al pulso viajan a diferentes velocidades dadas por  $c/\eta(\omega)$ . Matemáticamente, los efectos de dispersión de la fibra se tienen en cuenta mediante la expansión de la constante del modo de propagación  $\beta$  en una serie de Taylor alrededor de la frecuencia  $\omega_0$ , en la que se centra el espectro del pulso:

$$\beta(\omega) = \eta(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (2.1)$$

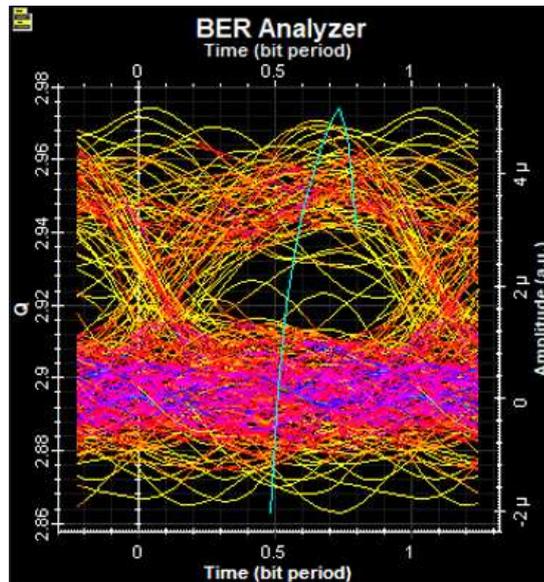
Los parámetros  $\beta_1$  y  $\beta_2$  se relacionan al índice de refracción  $\eta(\omega)$ . La velocidad de grupo puede encontrarse usando  $\beta_1 = \frac{\eta_g}{c}$ , donde  $\eta_g$  es el índice de grupo. La envolvente de un pulso óptico se propaga a la velocidad de grupo, mientras que el parámetro  $\beta_2$  representa la dispersión de velocidad de grupo y es responsable del ensanchamiento (R. Bonk, 2015) (W. Poehlmann, 2014) temporal del pulso. Este fenómeno se conoce como dispersión de velocidad de grupo (GVD), y  $\beta_2$  es el parámetro GVD. El parámetro de dispersión  $D$ , que se define como  $d\beta_1/d\lambda$ , también se utiliza en la práctica. Se relaciona con  $\beta_2$  de acuerdo a:

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.2)$$

En la siguiente imagen se aprecia un ejemplo de una simulación, efectuada con el simulador propuesto, de una señal transmitida sin compensación de la dispersión, mediante el diagrama de ojo el cual construye patrones oculares basados en medición mediante la convolución de la respuesta de impulso en el dominio del tiempo calculada (generada a

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

partir de datos de medición del dominio de la frecuencia) con un patrón sintetizado de secuencias de bits.



*Ilustración 5 - Ejemplo de diagrama de ojo de una señal NRZ de 10 Gbps a la entrada de un receptor con 40km de propagación sin compensación de Dispersión cromática.*

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 2.1.2 Dispersión de modo de polarización (PMD)

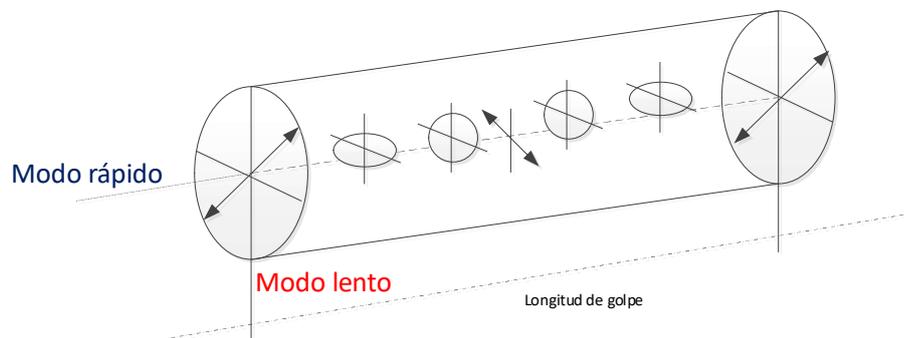
En una fibra monomodo no se tiene un único modo de propagación, ya que puede soportar dos modos degenerados que se polarizan en dos direcciones ortogonales.

En condiciones ideales (simetría cilíndrica perfecta y una fibra óptica libre de estrés), un modo excitado con su polarización en la dirección  $x$  no se acopla al modo con el estado de polarización ortogonal  $y$ . En las fibras reales, pequeñas desviaciones de la simetría cilíndrica, que se producen debido a las variaciones aleatorias en la forma del núcleo a lo largo de la longitud de la fibra, dan como resultado una mezcla de los dos estados de polarización al romper la degeneración modal. La anisotropía inducida por el estrés también puede romper esta degeneración. Matemáticamente, la constante del modo de propagación  $\beta$  pasa a ser ligeramente diferente para los modos polarizados en las direcciones  $x$  e  $y$ . Esta propiedad se conoce como birrefringencia modal. La fuerza modal de la birrefringencia se define por un parámetro adimensional

$$\beta_m = \frac{\beta_x - \beta_y}{k_0} = |\eta_x - \eta_y| \quad (2.3)$$

donde  $n_x$  y  $n_y$  son los índices de refracción modal para los dos estados ortogonales de polarización. Para un valor dado de  $\beta_m$ .

*Fuente: Elaboración propia 6 (diseño inspirado en (Agrawal, p.14)).*



*Ilustración 6 - Evolución del estado de polarización a lo largo de la fibra cuando la señal de entrada está polarizada a 45° respecto del eje lento*

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2.2 Efectos no lineales en fibras ópticas

En las redes ópticas también hay un aumento de los efectos no lineales debido a la transmisión de varias longitudes de onda por la misma fibra óptica con niveles de potencia significativos. El origen de la respuesta no lineal se relaciona con el movimiento de los electrones ligados armónicamente bajo la influencia de un campo aplicado. Como resultado, la polarización total  $P$  inducida por dipolos eléctricos no es una función lineal del campo eléctrico  $E$ , sino que satisface la relación más general. (Agrawal, 2013, p. 25)

$$P = \varepsilon_0(x^1 \cdot E + x^2 : EE + x^3 : EEE + \dots) \quad (2.4)$$

donde  $\varepsilon_0$  es la permitividad de vacío y  $x^j$  es la susceptibilidad de orden  $j$ -ésimo. En general,  $x^j$  es un tensor de rango  $j+1$ . La susceptibilidad lineal  $x^1$  representa la contribución dominante a  $P$ . Sus efectos se incluyen a través del índice de refracción  $n$  y del coeficiente de atenuación  $\alpha$  (dB/km).

Los principales fenómenos no lineales que afectan los sistemas ópticos son:

Parte real responsable de:

- Self-phase modulation (SPM)
- Cross-phase modulation (XPM)
- Self-steepening (SS)
- Four-wave mixing (FWM)

Parte Imaginaria responsable de:

- Stimulated Brillouin scattering (SBS)
- Stimulated Raman scattering (SRS)

Ambos SBS y SRS son inelastic scattering

Desorden estructural (fluctuaciones de densidad aleatorias) responsable de:

- Rayleigh scattering (RS)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 2.2.1 Auto modulación de fase (selfphase modulation, SPM)

Se produce debido a la variación de índice de refracción en función de la intensidad esto lleva al alargamiento o encogimiento de los pulsos ópticos.

El índice de refracción dependiente de la intensidad provoca un cambio de fase dependiente de la intensidad en la fibra. Si el haz óptico está modulado, la intensidad óptica depende del tiempo y, por lo tanto, también el índice de refracción del medio se vuelve dependiente del tiempo. Por lo tanto, una onda arbitraria que se propaga un medio Kerr experimenta modulación de fase autoinducida. Este fenómeno se conoce como modulación de fase de auto (SPM). (Agrawal, p.88)

En ausencia de dispersión, la ecuación generalizada asume de la siguiente forma:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A + i\gamma|A|^2 \quad (2.5)$$

Y se puede integrar con [3]:

$$A(L, t) = A(0, t) \exp[i\gamma|A(0, t)|^2 L_{eff}] = A(0, t) \exp[i\gamma P_0(t) L_{eff}] \quad (2.6)$$

donde  $P_0(t)$  es el perfil temporal de potencia de entrada y

$$L_{eff} = \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha L}) \quad (2.7)$$

es la longitud efectiva, teniendo en cuenta la descomposición del poder debida a la atenuación de la fibra. El cambio de fase máximo está dado por  $\Phi^{NL} = \gamma P_0^{max} L_{eff}$ .

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para una fibra monomodo convencional. El valor límite para  $L_{eff}$  es de aproximadamente 21 km ( $\alpha = 0.2$  dB / km), más allá de esta longitud los efectos no lineales son insignificante.

Una fase dependiente del tiempo implica un desplazamiento de frecuencia con la

magnitud  $\delta\omega(t) = -\left(\frac{d\phi_{NL}}{dt}\right)$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 2.2.2 Modulación de fase cruzada (Cross phase modulation, XPM)

Es la interferencia por la modulación de fase en canales adyacentes siempre está acompañada por la modulación SPM y se produce debido a que el índice de refracción eficaz visto por un pulso óptico en un medio no lineal y depende de la intensidad del pulso como también de la intensidad de los otros pulsos [1].

Cuando una multiplicidad de señales a diferentes longitudes de onda se propaga a una fibra no lineal, como en los sistemas WDM, la fase de cada señal se ve perturbada por las fluctuaciones de fase causadas por todos los demás. La señal está dada por:

$$\eta_{FWM} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left\{ 1 + \frac{4\exp[-\alpha L] \text{sen}^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - \exp[-\alpha L])^2} \right\} \quad (2.8)$$

Como se puede ver, debido a la estructura de la susceptibilidad no lineal de tercer orden del vidrio de sílice, la perturbación debida a XPM es dos veces más eficiente que la de SPM. Además, XPM no puede ocurrir sin SPM. El efecto final es el de provocar una ampliación espectral. El cambio de fase XPM solo es efectivo cuando dos señales se superponen en el tiempo a su pico de potencia si son distantes en frecuencia ocurre traslape por muy poco tiempo generando un efecto muy débil, mientras que para los canales vecinos viajando casi a la misma velocidad, el tiempo de superposición es mucho más largo y el efecto se acumula.

### 2.2.3 Mezcla de 4 ondas (Four wave mixing, FWM)

Este fenómeno crea nuevas frecuencias y se presenta cuando la separación de canales transmitidos es constante en sistemas WDM.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 3. METODOLOGÍA

En la siguiente parte se describen las simulaciones que se realizaron utilizando la herramienta Optisystem.

A continuación, se explicarán solo algunas partes que se consideran importantes del software Optisystem desarrollado para simular el escenario propuesto, relacionando la parte teórica con las simulaciones aquí realizadas.

Este software está disponible bajo licencia de la compañía Optiwave especialistas en el desarrollo de herramientas de software para el diseño, la simulación y la optimización de componentes a través de un convenio institucional, el Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) que adquirió y pagó los derechos de utilización ganando así una ventaja competitiva distintiva en el área de la investigación con la cual se obtiene un buen nivel de confianza de los resultados obtenidos y por ello lo utilizamos para detectar los límites operacionales en nuestro diseño con las posibles aplicaciones en la industria, por supuesto pueden surgir diferencias, nos acerca mucho a la realidad y nos motiva para realizar esta investigación.

La simulación se efectuó con el software propuesto anteriormente, las etapas se plantearon de la siguiente forma:

Diseño y modelamiento de una red bajo la arquitectura de transmisión y recepción TDM.

Diseño y modelamiento de una red bajo la arquitectura de transmisión y recepción WDM.

Diseñar el método de coexistencia de las dos tecnologías sobre el mismo medio de transmisión.

Garantizar la funcionalidad del sistema enmarcado los parámetros de operación en los estándares de la norma.

Someter el diseño a los efectos no lineales SPM hasta estresar el sistema para obtener los límites de operación sin efectos degenerativos en la señal.

Someter el diseño a los efectos no lineales XPM hasta estresar el sistema para obtener los límites de operación sin efectos degenerativos en la señal.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Se consideraron diversos métodos de análisis de los enlaces de transmisión, una de estas técnicas es la tasa de errores en transmisión (bit error rate, BER), la cual determina en cierta medida la calidad del enlace, factor de calidad (quality factor, Q) que mide la calidad del enlace, desempeño de la relación señal a ruido (signal to noise ratio, SNR) o la atenuación sufrida por una señal entre el transmisor y el receptor.

Debido a la complejidad de la transmisión es necesario el análisis de las formas de onda de los pulsos que se propagan en el enlace, para lograr observar sus formas se utiliza una técnica que analiza y relaciona todas las técnicas y características anteriores en un diagrama de origen conocido como "Diagrama de ojo" o factor de apertura de ojo (eye opening factor, EOF), método que consiste en comparar la relación medida directamente en el patrón de ojo, área determinada por regiones específicas dentro de las cuales los pulsos o las ondas no deben introducirse obteniendo como resultado ver (cualitativamente) la calidad de la señal posibilitando diagnosticar problemas, como atenuación, ruido, fluctuación de fase y dispersión que surgen o caracterizan partes específicas del sistema de comunicaciones.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los componentes con los cuales se realizó el diseño se presentan en el siguiente esquema:

Fuente: *Elaboración propia 7*

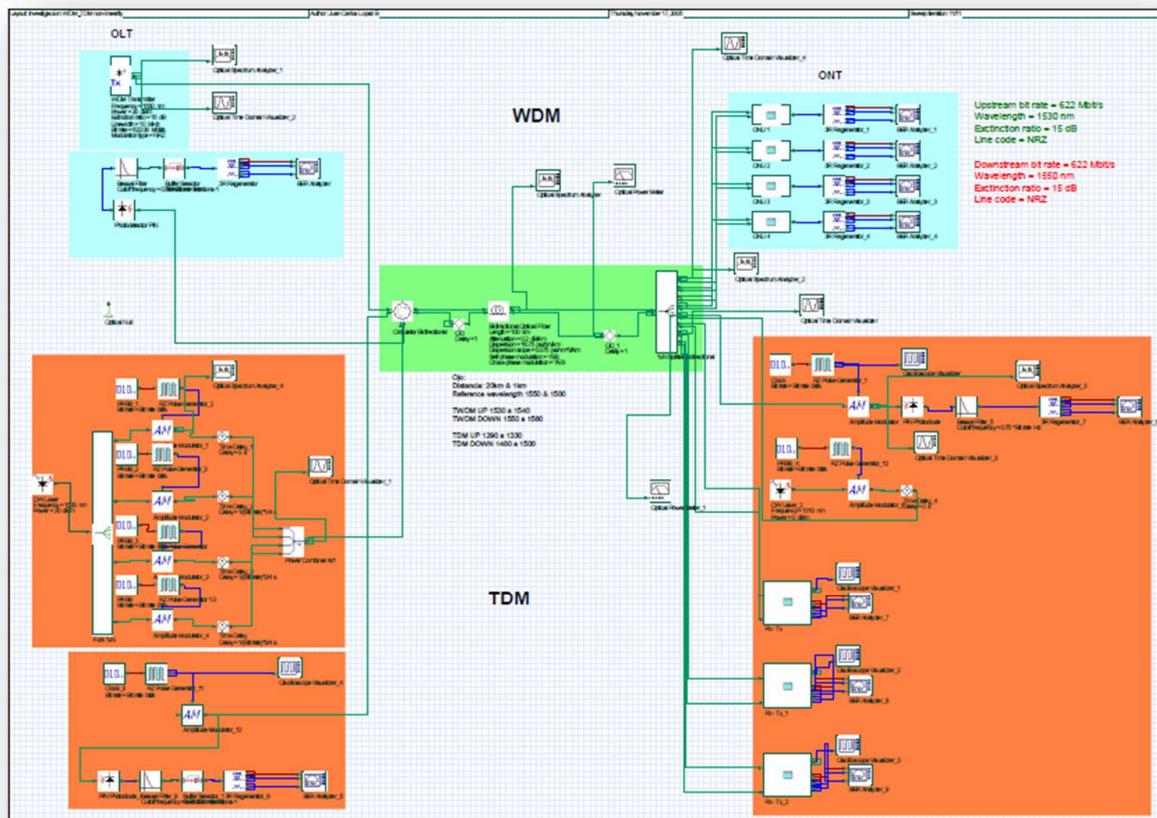


Figura 1: Esquema detallado del sistema TWDM con bidireccionalidad

Para realizar la simulación, comenzamos con el transmisor óptico formado por un láser de onda continua (continuous wave laser, CWLaser) que emite una longitud de onda entre 1480nm a 1500nm y una potencia óptica iterante de 0, 10, 20, 30 y 40dBm. Para distribuir la onda a diferentes subsistemas se utilizó un divisor de una entrada N salidas (Para 1xN, For 1xN). Se crea una simulación de la información transmitida con un generador de secuencia binaria pseudoaleatoria (Pseudo-random bit sequense generator, PRBSG) con una tasa de transmisión de 600Mbps. Se asume que la salida del PRBSG esta codificada en

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

forma diferencial. Esta información es codificada en un generador de pulso con no retorno a cero (No-retorne Zero pulse generator, NRZ Pulse Generator) y esta señal eléctrica modulada en fase se modula a una señal óptica utilizando un modulador electro-óptico Mach Zehnder (Mach Zehnder Modulator, MZM) con  $v_{\pi} = 4v$ . Toda esta información es llevada a un modular de amplitud (amplitude modulator, AM) para luego asignar un tiempo de retardo (Time delay, T) a la transmisión para obtener diferentes intervalos de tiempo. Se multiplexa las diferentes señales por medio de un combinador de potencias 4x1 (power combiner, 4x1).

Para el canal óptico se estableció un solo un tipo de fibra monomodo; fibra desplazada por dispersión (Dispersion Shifted Fiber, DSF) con el objetivo de optimizar tanto la baja dispersión como la baja atenuación ya que tiene un el índice de dispersión de 16.75 ps/nm/KM y una atenuación de 0.2 dB/Km adaptada para trabajar en las ventanas de transmisión que van desde los 1300nm hasta los 1550nm.

Se utilizó un circulador bidireccional (circulator bidirectional, CB) permitiendo el ingreso y la salida de dos tipos de técnicas de modulación (TDM y WDM) a el canal óptico principal. El canal principal utiliza una red óptica bidireccional (Bidirectional óptica, BO) con una distancia máxima recomendada [2] 40Km y dos retardos ópticos (óptica delay, CO) uno a la entrada y otro a la salida de la red BO. Se recibe la señal proveniente del canal óptico y se demultiplexa las diferentes señales por medio de un (1xN splitter bidireccional) para que se atendida la señal por cada ONT.

En la ONT tenemos un recetor óptico y un transmisor óptico que están diseñados de la siguiente forma:

Un reloj (clock, C) encargado de sincronizar la señal entrante, un generador de pulso con retorno a cero (retorne Zero pulse generator, RZ Pulse Generator) un módulo AM sincronizado con la señal entrante para ser entregada a un fotodetector PIN balanceado. Todo el diseño se ajustó un valor de responsabilidad de 1,6A/W y un ruido térmico de

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$10^{-12} A/Hz^{1/2}$ . La señal eléctrica demodulada es depurada por un filtro óptico pasa banda (Bessel filter, BF) y analizada en el tiempo, empleando un selector de almacenamiento (Buffer Selector, BS) y así se entrega una señal ordenada a un regenerador de señales (3RRegenerator) a un analizador de bit errados recibidos (Bit Error Rate, BER Analyzer).

Para el transmisor de la ONT se utiliza el mismo diseño de la OLT.

Para la modulación de WDM se aprovechan las herramientas del software utilizando un transmisor WDM que se le configuran 4 canales separados por 100GHz, este Tx-WDM tiene previamente editado los componentes necesarios para la transmisión. A este elemento se le configura un rango de longitud de onda desde 1530nm a 1550nm y una potencia óptica iterante de 0, 10, 20, 30 y 40dBm; así que se conecta al circulador bidireccional para mezclar los dos tipos de modulaciones. El receptor óptico esta formado por un fotoreceptor PIN balanceado y un filtro banda base Bessel; para analizar esta información se entrega a 3DRegenerator y a un analizador BER.

Luego del diseño y las pruebas de funcionalidad, en la red óptica bidireccional se activan los efectos no lineales como el SPM y XPM para realizar el análisis de las iteraciones creadas en los transmisores. Las pruebas se realizaron para comprobar los efectos de SPM, XPM y el desempeño BER del sistema de comunicaciones.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis de los resultados el láser se configuró con una potencia de transmisión de 0dB para minimizar los efectos no lineales y tener una referencia base.

Se propuso una potencia de transmisión hasta los 40dB, pero cuando se realizaron las pruebas se obtuvo respuesta inconsistente del simulador y esto asociado a que en la práctica no en sistemas de comunicaciones ópticas transmisores con estas características son poco usados, se consideró solo para propósito académico y no para el análisis minucioso de dicha potencia (40dB).

Las simulaciones se realizaron en dos etapas: la primera se activó el efecto no lineal SPM en el BO para calcular el deterioro del enlace.

A continuación, se utilizó la técnica de análisis EOF que muestra la superposición de las distintas combinaciones posibles con una cantidad de bit determinados previamente.

Se puede observar el porcentaje máximo de la apertura EOF de cada una de las iteraciones para ayudar a detectar la degeneración de la señal del sistema de comunicación.

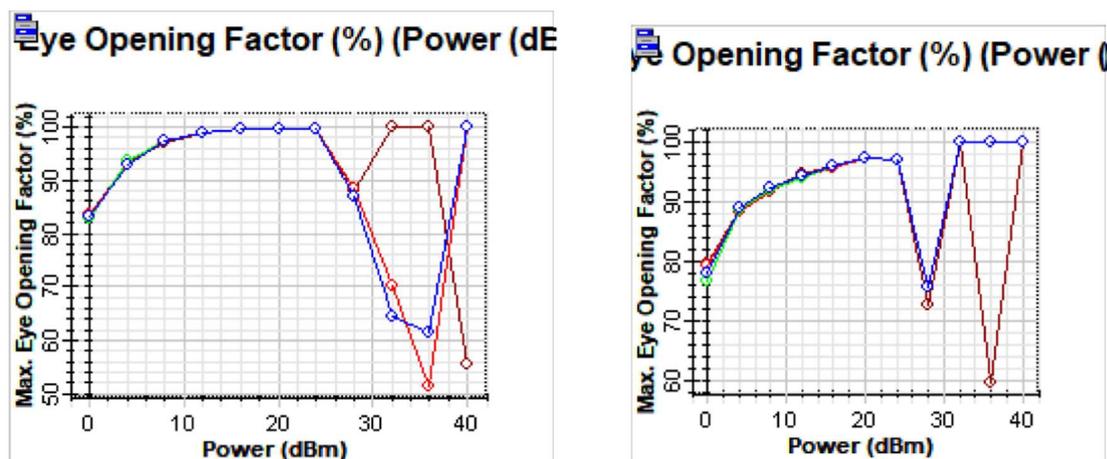


Figura 2: Resultados simulación para SPM

 <b>Institución Universitaria</b>	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

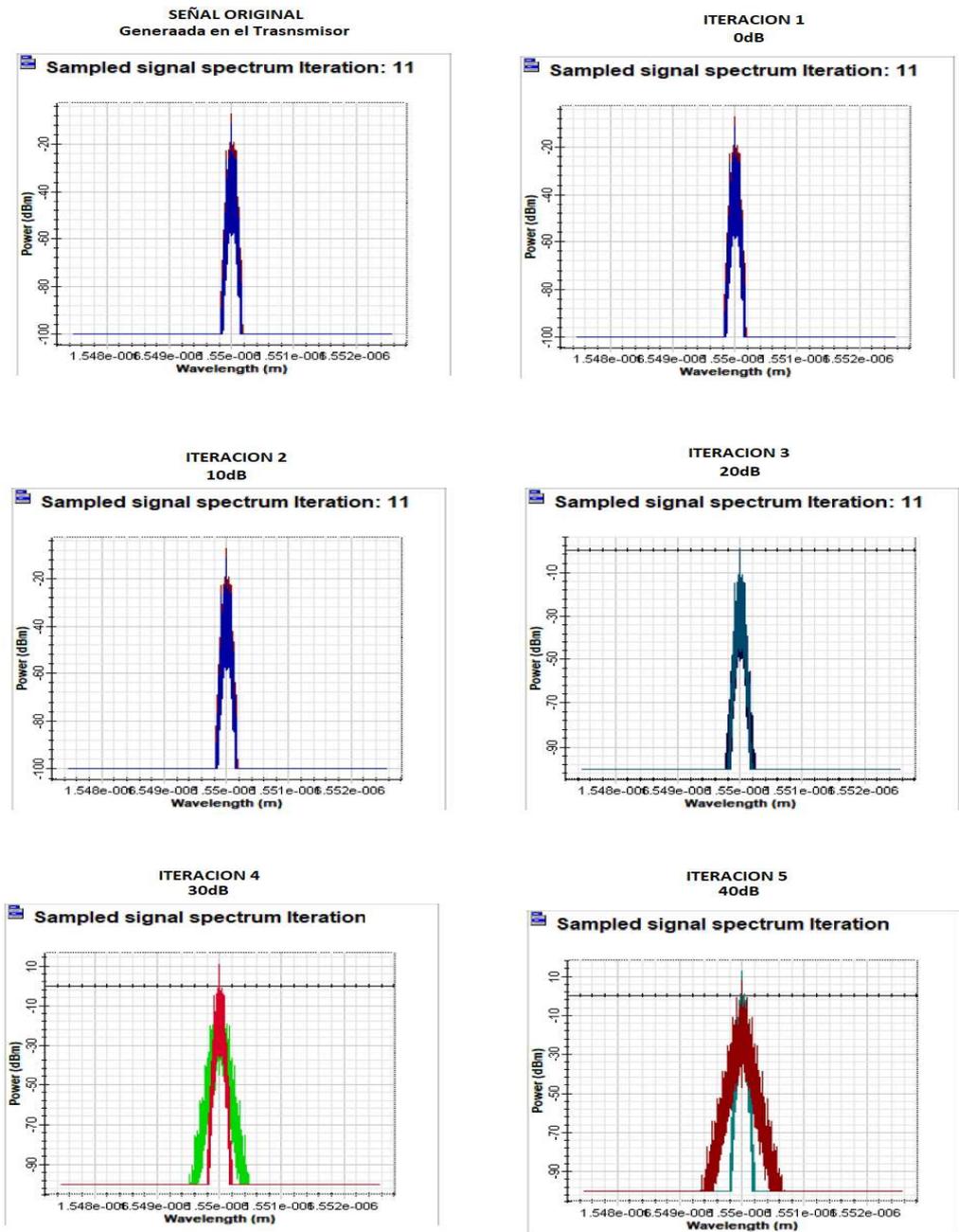


Figura 3: Cada iteración representando en el centro el espectro de la señal de salida y en la parte externa el espectro en la llagada con los efectos sufridos por el fenómeno SPM (ensanchamiento de los canales)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

A partir de allí se pueden observar variaciones de desplazamiento de fase autoinducido entre los diferentes canales dando como resultado un ensanchamiento del espectro óptico de un tren de pulsos NRZ, de 611Mbps, sometido a un fuerte efecto SPM a 40Km en la fibra de dispersión generando un ruido que afecta la totalidad de la transmisión. También se observa que para la potencia de 0dB se obtienen unos valores inferiores de calidad debido a las atenuaciones y a las pérdidas por inserción intrínsecas del diseño por la cual viaja la transmisión.

En la figura (2 y 3) se puede observar el deterioro de la calidad de la señal en el efecto SPM encontrando la máxima potencia de transmisión permitida de 22dB para garantizar el máximo valor de ancho de línea permitido de BER  $1 \times 10^{-12}$ .

Cuando supera dicha potencia (22dB) se genera un ensanchamiento de cada uno de los pulsos de la señal a los 40 Km que son transmitidos incrementado el tiempo de correspondencia y generando ensanchamiento en el dominio del tiempo de cada uno de los pulsos.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

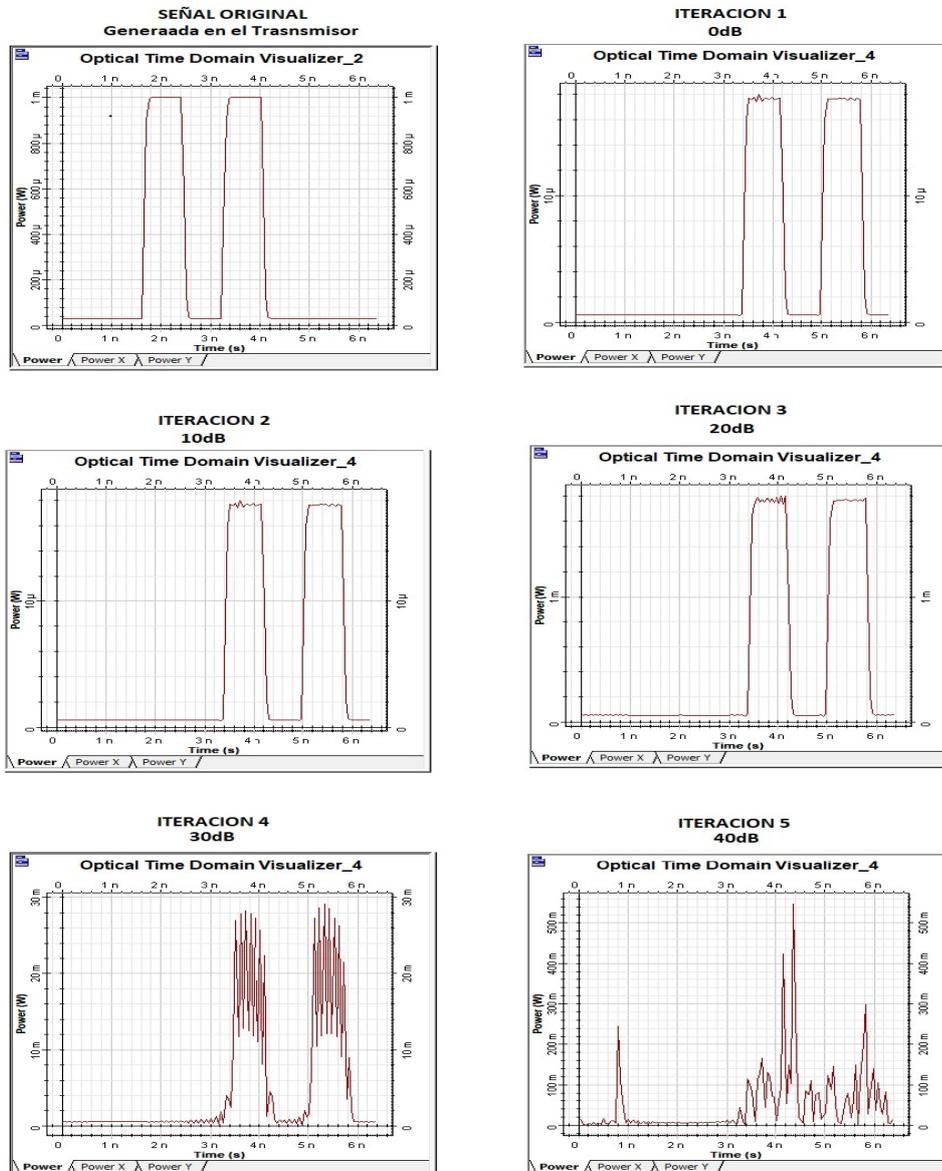


Figura 4: La salida original comparada con cada una de las iteraciones del espectro de llegada en los 2 primeros pulsos. Efectos sufridos por el fenómeno SPM en el dominio del tiempo (efectos temporales - ensanchamiento de los canales)

En los resultados (Figura 4) de las iteraciones del efecto del SPM se evidencia la aparición de la dependencia que tiene la fase de la amplitud con la intensidad.

Para valores menores o iguales a 22dB) no se afecta la forma el pulso aunque si se induce un ensanchamiento espectral que es una consecuencia de la dependencia temporal que

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

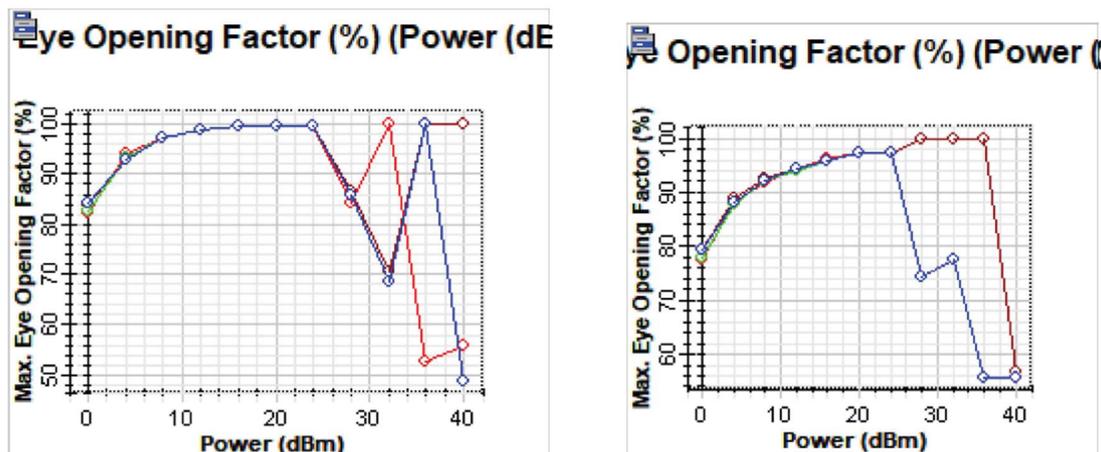
crece en magnitud a medida que se propaga, esto se puede entender como una variación de fase temporal que implica que la frecuencia óptica instantánea difiere a lo largo del pulso generando nuevas componentes de frecuencia a medida que el pulso se propaga por la fibra haciendo que el espectro del pulso se ensanche. La manera en la que el espectro se ensancha depende mucho de la forma del pulso.

Para valores grandes (superiores a 22dB) de la potencia de transmisión, como se puede apreciar en la iteración número 4 de la figura 4, la forma rectangular del pulso es irregular y la característica más notable del SPM sobre el espectro del pulso es que el ensanchamiento generado por la aparición de nuevas frecuencias, acompañado de varios picos. El número de picos depende de la potencia máxima de transmisión y crece linealmente según la intensidad inducida; cualitativamente hablando las oscilaciones representan las ondas de la misma frecuencia, pero con diferente fase que pueden interferir constructivamente o destructivamente dependiendo de su diferencia de fase.

En la iteración número 5 (figura 4) el pulso es completamente irregular, desaparece totalmente, y en su lugar se experimenta un ruido que asume el campo transmitido originalmente pero que es completamente anómalo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La segunda etapa fue agregar el efecto no lineal XPM para poder determinar la cantidad de ruido no lineal introducido en la entrada de la fibra como en la salida de esta para así detectar cualquier deterioro atribuido a los efectos no lineales.



*Figura 5: Resultados simulación para XPM*

En la figura (3) se presentan las curvas de BER en función de las potencias de transmisión de los láseres de las OLT (TDM y WDM).

Ahora activamos XPM; se puede observar un deterioro muy similar al efecto SPM cuando la potencia de transmisión supera los 22dB esto se debe al ensanchamiento de la señal en cada uno de los canales a los 40 Km que son transmitidos, a partir de allí se pueden observar variaciones aleatorias en los canales dando como resultado un ruido que afecta la totalidad de la transmisión.

Al comparar y analizar la figura 2 y la figura 3 se detecta un comportamiento similar lo que nos indica que la coexistencia de los métodos de modulación viable siempre y cuando la potencia de transmisión este entre los rangos de 0 a 22db debido que a partir de allí la información de la transmisión pierde calidad y se deteriora. La recuperación de los resultados tiene baja probabilidad de ser efectivos.

Es importante el hecho que los efectos SPM y XPM son relevantes para los sistemas de transmisión

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se presenta el impacto de los efectos no lineales SPM y XPM en una red TWDM donde los resultados obtenidos de las simulaciones indican la calidad máxima del enlace en la infraestructura diseñada, el desempeño antes de presentar deterioro de la señal está en consideración bajo el parámetro QoS BER (EoF)  $1 \times 10^{-12}$ .

Se comprueba una calidad de recepción en un 100% de los dispositivos a una distancia de 40km con potencias entre 10 y 22dB, concluyendo que el impacto de los efectos no lineales se ven reflejados con altas potencias de transmisión superiores a los 22dB en un escenario con fibra SSMF, mostrando que al incrementar la potencia de transmisión para lograr mejores coberturas se afecta la transmisión, un comportamiento que se mantiene independiente a otras variables que no se incluyeron en esta investigación.

Se proponen para trabajos futuros de objeto de investigación variables como son los formatos de modulación, anchos de banda variables y diferentes tipos de fibra óptica. Mejorar el proceso de simulación modificando variaciones en las señales en el tiempo e incluir la visualización del proceso de simulación paso a paso.

Por otra parte, cuando se consideraron un mayor número de ONT para garantizar un escenario completamente ideal no se obtuvo respuesta del software en cambio en un escenario más reducido se obtuvieron los resultados esperados.

Finalmente, los resultados de este trabajo muestran comportamientos que definen que el uso de fuentes ópticas de mayores potencias no garantiza una cobertura idónea para la información permitiendo así ahorrándole costos al IPS en la compra de transmisores.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## REFERENCIAS

---

- Agrawal, G. (2013). *Nonlinear Fiber Optics*. Kidlington: Elsevier.
- G.984.1, I.-T. (10 de 2009). G.984.1 amendment 2. USA.
- G.989.2, I.-T. (08 de 2017). G.989.2 - amendment 2. USA.
- G.989.4, I.-T. (10 de 2015). G.989. USA.
- R. Bonk, W. P. (2015). Cross-talk in TWDM-PON beyond NG-PON2. 1-5. Germany: IEEE Xplore.
- W. Poehlmann, R. B. (2014). Cross-talk Analysis & Mitigation for TWDM-PON Upstream Path. 1-4. Germany: IEEE Xplore.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## INDICE DE ILUSTRACIONES

---

Ilustración 1: Arquitectura TDM en redes PON.....	6
Ilustración 2: Arquitectura WDM en redes PON .....	7
Ilustración 3: escenario de diferentes arquitecturas en el espectro electromagnético.....	8
Ilustración 4: Arquitectura combinada TWDM y GPON.....	9
Ilustración 5 - Ejemplo de diagrama de ojo de una señal NRZ de 10 Gbps a la entrada de un receptor con 40km de propagación sin compensación de Dispersión cromática.....	12
Ilustración 6 - Evolución del estado de polarización a lo largo de la fibra cuando la señal de entrada esta polarizada a 45° respecto del eje lento .....	13

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## ANEXOS

---

- Archivo adjunto en el material digital entregado “Esquema detallado del sistema TWDM con bidireccionalidad.osd”

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

FIRMA ASESOR *Nelson Gomez*

FECHA ENTREGA: 16/08/2018

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO\_\_      ACEPTADO \_\_\_\_      ACEPTADO CON MODIFICACIONES \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

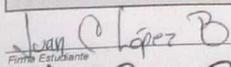
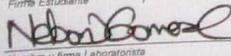
FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

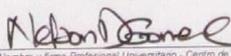
ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

 <b>Institución Universitaria</b>	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

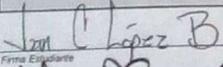
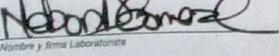
Fecha		Actividad desempeñada por el estudiante	Hora Ingreso	Hora salida	Total horas	Firma Laboratorista	Firma Estudiante
A	M						
2017	7	18	Conceptos fundamentales	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	7	25	Conceptos fundamentales	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	8	1	Conceptos fundamentales	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	8	8	Conceptos fundamentales	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	8	15	Estado del arte	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	8	22	Estado del arte	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	8	29	Estado del arte	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	9	5	Estado del arte	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	9	11	Justificación	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	9	18	Justificación	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	9	25	Justificación	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	10	3	Justificación	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	10	10	Descripción de la solución	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	10	17	Descripción de la solución	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	10	24	Descripción de la solución	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	10	31	Descripción de la solución	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	11	7	Software fundamentos, apropiación y aplicación	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	11	14	Software fundamentos, apropiación y aplicación	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	11	21	Software fundamentos, apropiación y aplicación	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2017	11	28	Software fundamentos, apropiación y aplicación	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2018	2	7	Diseño de la simulación	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
2018	2	14	Diseño de la simulación	17:00	19:00	2	Nelson Bonal / Juan C López B
<b>TOTAL HORAS</b>							

  
 Firma Estudiante  
  
 Nombre y firma Laboratorista

  
 Nombre y firma Profesional Universitario - Centro de Laboratorios

 <b>Institución Universitaria</b>	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Fecha		Actividad desempeñada por el estudiante	Hora Ingreso	Hora salida	Total horas	Firma Laboratorista	Firma Estudiante
A	M						
2018	2	21	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	2	28	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	3	6	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	3	13	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	3	20	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	3	27	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	4	3	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	4	10	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	4	17	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	4	24	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	5	8	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	5	15	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	5	22	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	5	29	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	6	5	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	6	12	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	7	23	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
2018	8	15	17:00	19:00	2	Nelson Bonal	Juan C López B
TOTAL HORAS							80

  
 Firma Estudiante  
  
 Nombre y firma Laboratorista

  
 Nombre y firma Profesional Universitario - Centro de Laboratorios