



Comparación espectral en sistemas WDM entre una fuente óptica multiportadora basada en grafeno con respecto a fuentes basadas en MZM que utilizan el mecanismo de generación de *combs*

Karen Arroyave Giraldo

Informe de trabajo de grado como requisito para optar al título de:
Ingeniera de Telecomunicaciones

Asesor

Juan Diego Zapata Caro, PhD
Profesor Facultad de Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Seleccione pregrado o posgrado UdeA (A-Z)
Medellín, Antioquia, Colombia

2021

Cita	(Arroyave Giraldo, 2021)
Referencia	Arroyave Giraldo. K. (2021). <i>Comparación espectral en sistemas WDM entre una fuente óptica multiportadora basada en grafeno con respecto a fuentes basadas en MZM que utilizan el mecanismo de generación de combs</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Grupo de Investigación Telecomunicaciones Aplicadas (GITA).



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Augusto Enrique Salazar Jiménez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Resumen

La próxima generación de redes ópticas pasivas está basada en tecnología de multiplexación por división de longitud de onda, la cual se desplegará ampliamente hasta la red de acceso. Esto hace necesario la creación y producción de fuentes ópticas adecuadas y de bajo costo para este tipo de sistemas.

En este trabajo se propuso una fuente óptica multiportadora basada en un láser de pulsos ultracortos, la cual consiste en una fibra dopada con erbio como medio de ganancia y al interior de la cavidad contiene un dispositivo pasivo no lineal, compuesto de grafeno sobre fibra D, usado como absorbedor saturable. Esta fuente se comparó con respecto a un generador de *combs* basado en moduladores Mach-Zehnder (MZM – *Mach-Zehnder Modulator*), el cual, por su naturaleza espectral, también se considera como una fuente óptica multiportadora.

Primeramente se realizó una interfaz con las medidas obtenidas experimentalmente del láser pulsado basado en grafeno, para el tratamiento de la señal de esta fuente multiportadora en el entorno del software VPIphotonics™. Luego se desarrolló la simulación de la fuente basada en el mecanismo de generación de *combs* que utiliza moduladores electroópticos MZM. Por consiguiente, se hizo una comparación del espectro generado por cada fuente, analizando y revisando sus características más relevantes, desarrollando adicionalmente un estudio del número de portadoras generadas por las fuentes multiportadoras basadas en MZM. Finalmente, se evaluó el desempeño de transmisión de las fuentes ópticas multiportadoras implementadas en un sistema WDM-PON, al hacer un análisis numérico, estimando la tasa de error de bit en función de la longitud del enlace y de la relación señal a ruido óptica. Para el enlace de transmisión se emplearon pulsos con formato de codificación retorno a cero, a una tasa de bit de 10 Gbps mediante modulación externa y a través de una fibra monomodo estándar.

Los resultados mostraron que con la fuente de pulsos ultracortos propuesta se generaron 25 líneas *comb* sin necesidad de requerir altos niveles de voltaje ni llegar a su máximo ancho espectral registrado. Mientras que las fuentes basadas en MZM el máximo posible, de forma experimental, es de 21 canales, considerando una rejilla estándar de separación entre canales de 12.5 GHz. Y con respecto al desempeño de transmisión las fuentes MZM exhiben una leve mejora en comparación con la fuente propuesta, obteniendo, para una tasa de error de bit de 1×10^{-9} , una penalidad de distancia de alrededor de 2 km para 18 dB de relación señal a ruido

óptica, y una penalidad en ganancia de aproximadamente 0.1 dB para distancias de 0 km y 20 km.

Introducción

En la actualidad plataformas de streaming, realidad virtual, telecirugía, servicios en la nube y juegos en línea; son algunas de las aplicaciones y servicios que traen consigo grandes requerimientos que exigen mayor ancho de banda en los sistemas de transmisión. La próxima generación de redes ópticas pasivas NG-PON2 (*Next Generation-Passive Optical Network*) será la que soporte dichos requerimientos, NG-PON2 se basa en técnicas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM - *Wavelength-Division-Multiplexing*) y busca aumentar la capacidad de transmisión hasta 50 Gbps de velocidad nominal proveyendo en promedio, a 64 usuarios finales, 1.25 Gbps al mismo tiempo (Zhang, 2020). Las redes WDM-PON se han considerado una estrategia muy prometedora para suplir las nuevas demandas y retos en campo de las telecomunicaciones, gracias a su gran eficiencia en el uso del medio de transmisión. Sin embargo, esta técnica, enfocada en redes de acceso, a pesar de brindar una capacidad mucho mayor frente a las actuales es más costosa y compleja. En WDM se requiere de una señal portadora óptica para cada canal que se transmite simultáneamente, cada una de estas señales se puede generar con láseres con longitud de onda diferente.

Constantemente se busca la forma de optimizar las redes de transmisión, al aumentar su capacidad y en lo posible disminuir su costo y su consumo energético. La técnica WDM no se había aplicado o desplegado fuertemente, desde décadas atrás, debido a que el costo de su implementación es elevado por la necesidad de adquirir múltiples transceivers (láseres) y realizar la instalación de cada dispositivo para cada enlace de fibra (Shin, 2006). Lo que conllevó a buscar alternativas de dispositivos ópticos que puedan generar múltiples portadoras ópticas, sustituyendo todos los láseres individuales.

Las fuentes multiportadoras o fuentes de múltiples longitudes de onda (MWS - *Multi-Wavelength Source*) se han vuelto un tema de estudio muy popular para múltiples aplicaciones como la espectroscopia, metrología, medición de distancias basado en tecnología LIDAR, sensado, procesamiento de señales y comunicaciones (Imran, 2018). En cuanto a las técnicas de generación de MWS, se han diseñado fuentes de espectro continuo con gran ancho espectral,

las cuales son posteriormente segmentadas usando filtros o arreglos de rejillas que produzcan cada señal portadora (H.-W. Hung, 2017). Por otro lado están los generadores de peines de frecuencia óptica (*OFC – Optical Frequency Comb*), son fuentes donde su forma de espectro es de un peine de frecuencias, cada componente en frecuencia puede convertirse en una portadora óptica al separarse de las demás (Imran, 2018; Sun, 2021; Gaeta, Lipson, & Kippenberg, 2019)

Entre los tipos de generadores de *combs* están los basados en moduladores electroópticos, como los moduladores Mach-Zehnder (MZM – *Mach-Zehnder Modulator*), los cuales son reconocidos por permitir una sintonización simple del espaciado entre componentes espectrales. Estos se basan en la modulación de la luz de onda continua (CW – *Continuous Wave*), donde los moduladores son manejados por osciladores de señal de RF, creando múltiples bandas laterales, lo que lleva a la generación de un OFC (Sun, 2021). Por otro lado están los generadores de *combs* basados en los láseres de bloqueo de modos (MLL – *Mode-Locked Laser*) su característica principal es que pueden generar un gran ancho espectral, estos láseres son de tipo pulsado, al ser su forma de onda temporal un tren de pulsos, el espectro consiste en líneas discretas con espaciado constante, en otras palabras, un OFC. Ambas técnicas han sido estudiadas y empleadas para producir las fuentes multiportadoras en sistemas WDM (Villarreal, 2013; Lopera J. A., 2020; Imran, 2018), explotando sus características más fuertes.

Con respecto a las técnicas de bloqueo de modos (ML – *Mode-Locking*) existe una técnica común y de bajo costo llamada bloqueo de modos pasivo, la cual emplea un dispositivo con un material no lineal para producir pulsos ultracortos, algunos con duraciones de hasta el orden de algunos femtosegundos (Zapata, 2016; D. Steinberg, 2021). Dichos dispositivos se conocen por el nombre de absorbentes saturables (SA- *Saturable Absorber*), en la actualidad, el grafeno ha ganado reconocimiento como material no lineal en la fabricación de absorbentes saturables, utilizándolo en diferentes configuraciones. La eficiencia de los SA basados en grafeno se debe a las propiedades ópticas de este nanomaterial como su gran espectro de absorción, rápido tiempo de relajación, gran profundidad de modulación y bajas pérdidas por dispersión (D. Steinberg, 2021).

En este trabajo se propone una fuente multiportadora consistente en un láser de pulsos ultracortos de cavidad tipo: láser a fibra dopada con erbio (EDFL – *Erbium-doped fiber laser*) que usa grafeno como SA. Y se busca compararla con otra fuente óptica generadora de *combs*

que es basada en MZM, analizando sus características espectrales y evaluando su desempeño en sistemas WDM.

Objetivos

Objetivo General:

Comparar un láser pulsado EDFL basado en grafeno, disponiendo de sus datos experimentales, frente a la simulación de generadores de *combs* que emplean moduladores Mach-Zehnder para su implementación como fuentes ópticas multiportadoras en redes WDM-PON, evaluando el desempeño y costo en la etapa de transmisión en el software VPIphotonics™.

Objetivos Específicos:

1. Diseñar una interfaz en el software VPIphotonics™ que permita el tratamiento de los datos experimentales del láser pulsado basado en grafeno, para la obtención de su espectro *comb* en el entorno de simulación.
2. Implementar en simulación la generación de múltiples portadoras basada en el mecanismo de generación de *combs* que utiliza moduladores electroópticos MZM.
3. Comparar los espectros *comb* generados en 1 y 2, y evaluar su desempeño como fuentes multiportadoras implementadas en sistemas WDM-PON, mediante la estimación de la tasa de error de bit en función del nivel de relación señal a ruido óptica y distancia de enlace.

Marco Teórico

1. FUENTES ÓPTICAS MULTIPORTADORAS

Las fuentes multiportadoras son dispositivos ópticos que generan luz de diferentes longitudes de onda discretas simultáneamente. Para la generación de múltiples portadoras ópticas se puede emplear técnicas de filtrado a fuentes de gran ancho espectral como lo son las generadas por Emisión Espontánea Amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*) (H.-W. Hung, 2017) o las que se generan por medio de la técnica de supercontinuo. Asimismo, se pueden utilizar técnicas de generación de *combs* ópticos, los cuales son líneas espectrales discretas

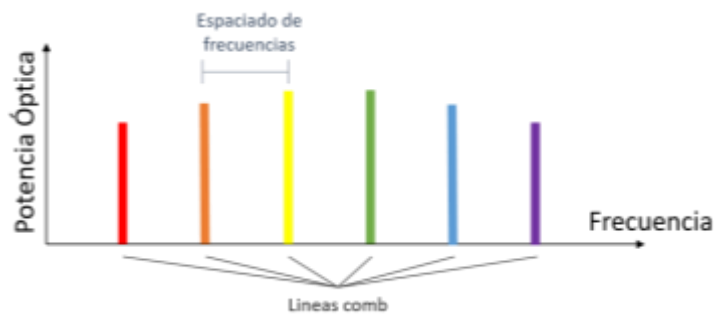


Figura 1. Espectro *Comb*.

desventajas frente a los generadores de *combs* por su baja coherencia de la luz emitida. Por ejemplo, para sistemas WDM, se busca que estas fuentes sean estables, de bajo ruido, con alta eficiencia, de bajo costo y con un espectro ancho y plano.

Hay múltiples técnicas de generación de *combs* que se aplican en la actualidad, según sean las propiedades ópticas del dispositivo y el mecanismo de generación se determinan las principales características de la fuente *comb*, como lo son: las frecuencias de las líneas del peine (líneas *comb*), el número de líneas *comb*, su espaciamiento en frecuencia, la forma espectral de cada línea y del peine completo (la envolvente del espectro *comb*), y la intensidad de ruido.

Por tanto, según sea la aplicación, se busca producir un OFC con las características deseadas. Para clasificar el tipo de generadores de *combs* hay 5 grandes categorías, los generadores de *combs* basados: en MLL, en moduladores electroópticos, en guías de ondas de niobato de litio (LiNbO_3) periódicamente polarizadas, en láseres con conmutación de ganancia y en micro-anillos resonadores (Imran, 2018). A continuación se detallan algunos de los generadores de *combs* que emplean MLL y moduladores electroópticos.

1.1. GENERADOR DE COMBS BASADOS EN LÁSERES DE PULSOS ULTRACORTOS

Los láseres pulsados, por el hecho de poseer una señal periódica temporal, su transformada tiende a un comportamiento discreto en el dominio de la frecuencia, produciendo de esa forma el OFC. Para generar el comportamiento pulsado, los láseres de pulso ultracortos (USPL – *Ultra Short Pulse Laser*) emplean técnicas de bloqueo de modos tales técnicas de generación pueden ser activas o pasivas; lo cual influye en su tasa de repetición y ancho espectral. Entre las técnicas pasivas, una de las más importante es aquella que hace uso de un material no lineal o absorbedor saturable el cual actúa como un filtro pasa alto para las potencias en la cavidad.

igualmente espaciadas en frecuencia y correlacionadas en fase, lo que produce una apariencia del espectro en forma de peine (ver Figura 1).

En algunas aplicaciones, las fuentes ASE se han vuelto muy populares por su bajo costo, pero presentan

Este tipo de generadores *comb* fueron los primeros OFC, son reconocidos por producir espectros con gran ancho de banda y en algunos caso de bajo costo, pero si se desea realizar una sintonización continua del espaciado de componentes espectrales se requiere emplear estructuras con un diseño especial.

1.1.1. LÁSERES A FIBRA EDFL BASADOS EN GRAFENO

Los láseres a fibra son aquellos donde su arquitectura principal es una cavidad en anillo formada por fibras ópticas convencionales monomodo con un acoplador de salida, lo que permite que cierto porcentaje de potencia salga, mientras el resto queda recirculando por la cavidad. El medio de ganancia consiste de una fibra dopada con tierras raras, de las cuales resalta el erbio por su amplio espectro de ganancia en el rango de longitudes de onda que componen la banda C (alrededor de los 1550 nm), conocidos como láseres EDFL (Luo,

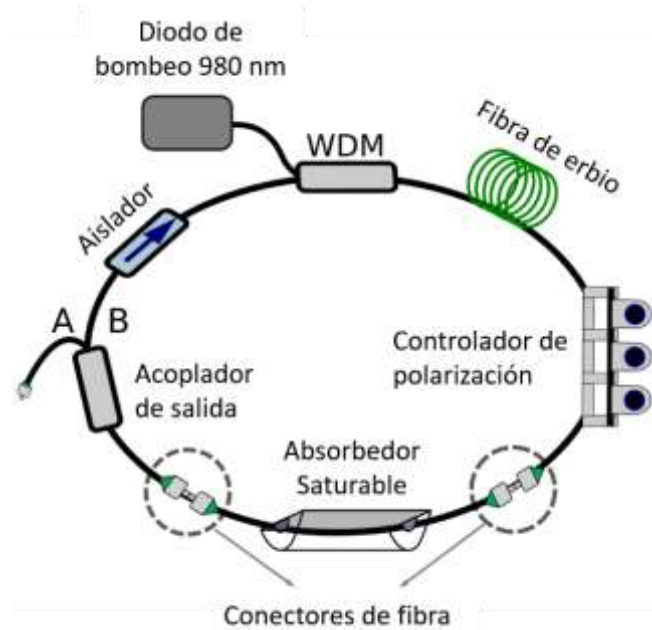


Figura 2. Láser pulsado a fibra dopado con erbio que usa grafeno sobre fibra D como absorbedor saturable.

2000). A partir de la aparición de los EDFL, estos se han integrado con diferentes dispositivos para diseñar láseres de pulsos ultracortos, para el caso de los dispositivos pasivos que producen bloqueo de modos, se cuenta con absorbedores saturables, un ejemplo de estos son los basados en grafeno, para estos tipos de láser se utiliza habitualmente dos tipos de configuraciones: 1) grafeno sobre la punta de una fibra óptica como material no lineal y 2) grafeno sobre la superficie pulida de una fibra óptica en forma D (ver Figura 2), la diferencia entre estas dos configuraciones es la forma como la luz interactúa con el grafeno, en las dos configuraciones el grafeno desempeña un papel fundamental en la formación del pulso (Zapata, 2016; D. Steinberg, 2021).

Los USPL son fuentes ópticas de banda ancha que, por matemática de Fourier, a un pulso temporal que tiene un tiempo de duración ultra-corto, por ejemplo, del orden de cientos de femtosegundos le corresponde un ancho espectral de potencia del orden de los TeraHertz. Para

una señal periódica temporal, se produce el espectro *comb*, cada línea *comb* corresponde a una componente espectral y cada una puede convertirse en una portadora óptica al separarse de las demás. Esta razón hace que estos láseres se puedan usar como fuentes ópticas multiportadoras (Hu, 2020). Además los USPLs tienen otras ventajas como alta potencia pico, alta estabilidad espectral, fácil integración en los sistemas basados en fibra y sus parámetros pueden ajustarse a conveniencia (Hu, 2020; Zapata, 2016), estas características los hace adecuadas implementarse en redes WDM-PON (Lopera J. A., 2021).

1.2. GENERADOR DE COMBS BASADOS EN MODULADORES ELECTROÓPTICOS MACH ZENHDER

Un modulador Mach-Zehnder, es un dispositivo donde un haz de luz viaja por una guía de onda y se divide en dos caminos separados para luego recombinarse en la salida. En uno, o ambos caminos hay un cristal con propiedades electroópticas, al cual se aplica un campo eléctrico y causa un cambio relativo de fase entre la luz que viaja por cada camino. Al alimentar el modulador con un láser de onda continua y aplicar en los brazos una señal de RF, de determinadas propiedades, se produce un OFC. Los generadores de *combs* basados en MZM son estables temporalmente, se puede ajustar el espaciamiento entre frecuencias y en ciertos casos tiene una buena ecualización, es decir, que todas las frecuencias ópticas tienen la misma potencia, obteniendo un espectro plano (Wang, 2014).

Algunos estudios se han enfocado en generadores de peines planos basados en MZM (FCG-MZM – *Flat Comb Generator MZM*) empleando moduladores con control doble (DD-MZM – *Dual Drive MZM*) es decir, que en ambos brazos se le aplica una señal eléctrica, tal como se muestra en la Figura 3 (Sakamoto, 2007; Wang, 2014).

El DD-MZM posee:

- *Una entrada óptica, la cual es generalmente un láser CW con cierta frecuencia (ν) y potencia.*
- *Dos entradas eléctricas de radiofrecuencia* (V_{RFa}, V_{RFb}). Son generadas por un mismo oscilador RF con determinada frecuencia (f Hz) y una de ellas pasa por un atenuador de **att** dB de pérdida.*
- *Dos entradas eléctricas bias* (V_{DCa}, V_{DCb})*

** Una entrada es para el control del brazo a y la otra es para el control del brazo b.*

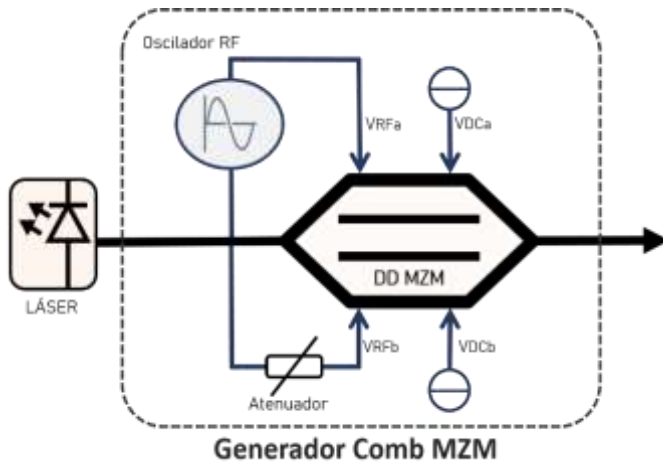


Figura 3. Generador de *combs* basado en moduladores Mach-Zehnder.

Las señales V_{RFa} , V_{RFb} , con su respectivo nivel DC V_{DCa} , V_{DCb} , produciendo múltiples bandas laterales espectrales (líneas *comb*) espaciadas de manera uniforme a ambos lados de la componente fundamental con frecuencia ν . El espaciado espectral está directamente relacionado f y el número de líneas *comb* se decide por la potencia de la señal RF. En consecuencia, el ancho de banda de la OFC lo determina f y la potencia de la señal RF.

Por otro lado, las amplitudes de cada línea *comb* se rigen por la función de Bessel, y es posible aplanarlas considerando una aproximación asintótica a dicha función, al cumplir con la condición de que:

$$\Delta A \pm \Delta \theta = \pi/2$$

Donde: ΔA es la diferencia de amplitud entre las entradas RF

Y $\Delta \theta$ es el desplazamiento de fase estatico.

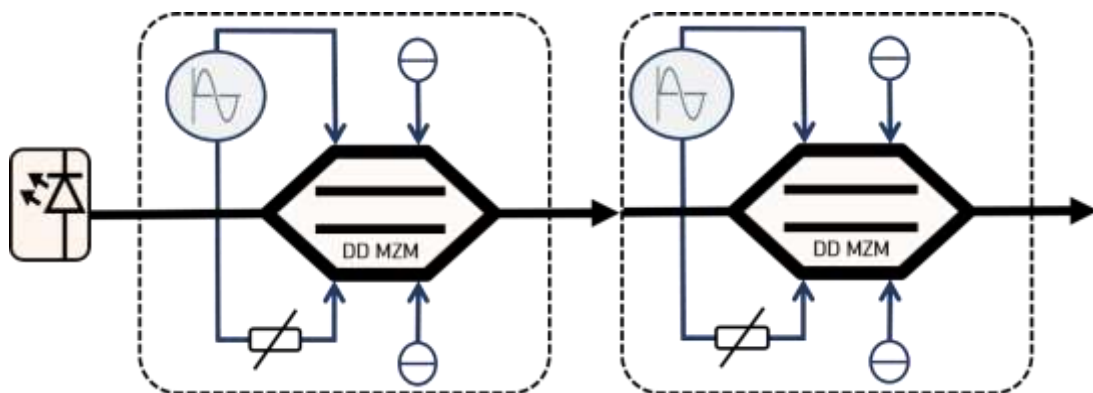


Figura 4. Configuración en cascada de generador de *combs* basado en moduladores Mach-Zehnder.

Y los parámetros internos del DD-MZM son:

- *Voltaje DC requerido para un cambio de fase de π* ($V\pi_{DC}$).
- *Voltaje pico RF requerido para un cambio de fase de π* ($V\pi_{RF}$).

Luego, el funcionamiento y configuración para generar un peine plano estaría descrito así: La luz CW ingresada al MZM es modulada por

Adicional a esto, si se busca también aumentar el ancho espectral, se han diseñado nuevas configuraciones que involucran más moduladores MZM, por ejemplo, una configuración en cascada (ver Figura 4), es decir, que la salida de un MZM es la entrada de otro (Qu, 2018). También han surgido otras configuraciones más complejas con realimentación, que involucran otros dispositivos como filtros, las cuales aumentan mucho más el ancho espectral (Morohashi, 2011).

2. IMPORTANCIA DE FUENTES MULTIPORTADORAS EN REDES WDM-PON

En las redes de acceso en los sistemas de comunicaciones constantemente surgen y se estudian nuevas tecnologías, técnicas o dispositivos, que permitan aumentar la capacidad y mejorar en todos los aspectos la eficiencia de la red, como la calidad del servicio, la reducción de costos y energía. WDM-PON es una técnica de multiplexación que aprovecha altamente el medio de transmisión incrementa la capacidad de las redes ópticas pasivas convencionales. Estas, escalan el ancho de banda entregado a cada cliente o usuario final y servirán como candidatas potenciales para la próxima generación de redes ópticas pasivas NG-PON2. WDM permite, de forma simultánea, transmitir la información de varios usuarios por medio de canales separados en frecuencia, asignando a cada canal una señal portadora de cierta longitud de onda.

Para WDM-PON y cualquier otro sistema óptico con varias longitudes de onda aparecen retos en la implementación de la red, en términos de complejidad, costo y consumo energético, y se agudiza cuando incrementa la cantidad de señales portadoras requeridas, en estos casos se hace necesario la adquisición de dispositivos que genere cada portadora. Procurando la simplificación del diseño y operación en las redes ópticas, enfrentando los retos mencionados previamente, se ha estado investigado la creación de fuentes ópticas que puedan generar múltiples longitudes de onda o canales desde un solo dispositivo.

Metodología

1. Procesamiento espectro experimental

- 1.1. En el entorno Matlab se cargaron y pre-procesaron los datos de los espectros experimentales del USPL obtenidos previamente del estudio de variación del ancho espectral en función de la longitud de la cavidad (Lopera, Arroyave, & Zapata,

2019). Se realizó un pre-procesamiento que incluía el re-muestreo y normalización para la señal con ancho espectral de 2.4 nm.

- 1.2. A la señal del espectro de 2.4 nm se le aplicó la transformada inversa para obtener la forma temporal del pulso ultracorto. Por medio del límite del producto tiempo-ancho de banda (TBP - *time-bandwidth product*) para un pulso de forma secante hiperbólica al cuadrado $sech^2$: $\Delta t \Delta \nu \leq 0.315$.
- 1.3. Se emuló la señal temporal del láser al replicar la forma de onda del pulso, generando así, múltiples pulsos para concatenarlos de manera que se establezca una tasa de repetición 12.5 GHz.

2. Desarrollo de la co-simulación

- 2.1. Se cargó la señal al bloque *co-sim* en VPI llamando la función de Matlab que tiene como salida un vector con los valores de potencia de la señal temporal emulada.
- 2.2. El vector se ingresó a un bloque básico generador de luz, permitiendo que se convierta en una señal óptica con los atributos y propiedades adecuadas para su tratamiento desde VPI.

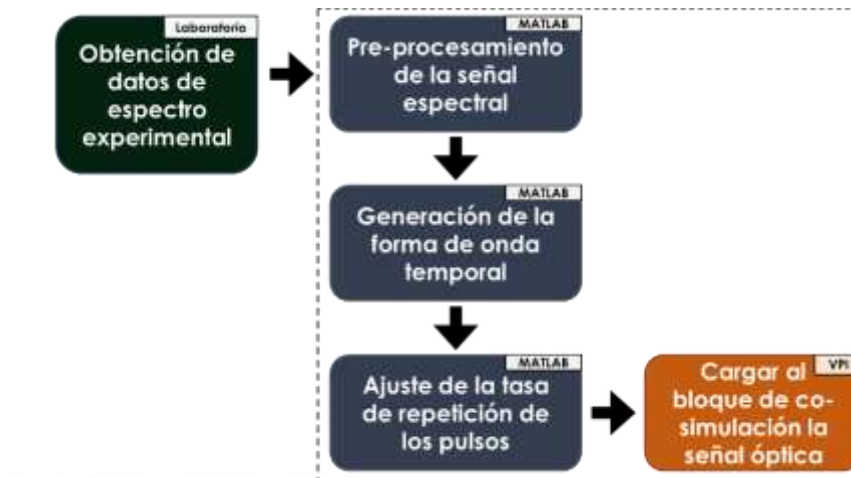


Figura 5. Diagrama de bloques Interfaz Experimental-Simulación.

En la Figura 5 se visualiza la estructura del procedimiento paso a paso de la creación de la interfaz Experimental-Simulación (subsecciones 1 y 2 de la Metodología).

3. Elaboración de montajes MZM

- 3.1. En VPI se desarrolló el esquemático haciendo uso de los bloques con los componentes respectivos para conformar el generador de *combs* basado en MZM tanto para la configuración simple (Figura 3) como para la configuración en cascada (Figura 4).

- 3.2. Se ajustaron los parámetros de las señales de entrada al MZM así como sus parámetros internos haciendo uso de la aproximación de la función de Bessel buscando generar espectros planos. Los valores se especifican en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros internos y de entrada al modulador Mach-Zenhdler.

<i>Parámetros FCG-MZM</i>	
$V_{\pi_{DC}}$	5 V
$V_{\pi_{RF}}$	3.5 V
V_{DCa}	2.5 V
V_{DCb}	0 V (GND)
att	2.1 dB
V_{RF}	8 V
ν	12.5 GHz

4. Estudio espectro comb MZM

- 4.1. Se realizó un estudio del número de líneas *comb* generadas en función del voltaje de entrada al MZM, en un rango de 3 – 10 voltios, para ambos escenarios. Se midió el ancho espectral tomando como referencia el valor de potencia desde donde el espectro era más plano (es decir, desde donde la mayoría de las líneas *comb* tenían una amplitud similar) y midiendo 3 dB por debajo. Por lo que el número de líneas *comb* generadas era el total de líneas cuya amplitud de potencia estaba en ese rango de 3 dB.

5. Comparación espectros

- 5.1. Se hizo una comparación de las características más relevantes de los OFCs ancho espectral a 3dB, número de líneas *comb* contenidas en ese ancho espectral y la planitud del espectro completo.

6. Separación de las portadoras

- 6.1. Una vez obtenidos los espectros *comb* se realizó una etapa de filtrado para separar las componentes espectrales por medio del AWG, obteniendo la señal portadora del enlace a evaluar. El filtro pasabanda se ajustó con una función de transferencia de tipo gaussiana de orden 1 y con un ancho de banda de 6.25 GHz.

7. Simulación enlace WDM-PON

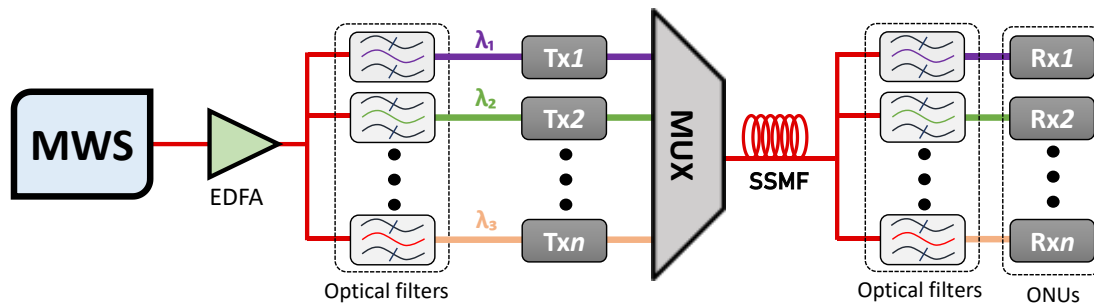


Figura 6. Configuración del sistema WDM-PON simulado.

Se realizó el esquema completo del enlace de transmisión: generar bits pseudo-aleatorios, modular, transmitir por fibra y detectar la portadora con la información (Figura 6).

- 7.1. Para la evaluación de la transmisión se fijó la tasa de bit a 10 Gbps,
- 7.2. usando modulación externa sobre cada línea *comb* filtrada usando un modulador Mach-Zehnder controlado por pulsos gaussianos en formato no retorno a cero (NRZ - Non-Return to Zero).
- 7.3. La transmisión se hizo sobre fibra estándar monomodo (SSMF – *Standard Single Mode Fiber*).
- 7.4. Se demultiplexó la señal a la salida de la fibra para obtener la portadora del canal de interés a analizar.
- 7.5. Se realizó la conversión óptica-eléctrica usando un fotodiodo pin para la recuperación de la señal de información.

8. Evaluación del desempeño de transmisión

- 8.1. Se analizó el desempeño del enlace WDM-PON para cada una de las tres fuentes MWS, estimando con método gaussiano la tasa de error de bit (BER – Bit Error Rate) para diferentes escenarios al variar la longitud del enlace de transmisión entre 0 km y 150 km y la OSNR entre 0 dB y 20 dB.

Resultados y análisis

Comparación espectral

La figura 7 muestra los diferentes espectros de cada una de las MWS, 7a) FCG-MZM único 7b) FCG-MZM cascada y 7c) USPL, obteniendo un ancho espectral de 1.4 nm, 2 nm y 2.4 nm y un número de líneas *comb* de 15, 21 y 25, respectivamente.

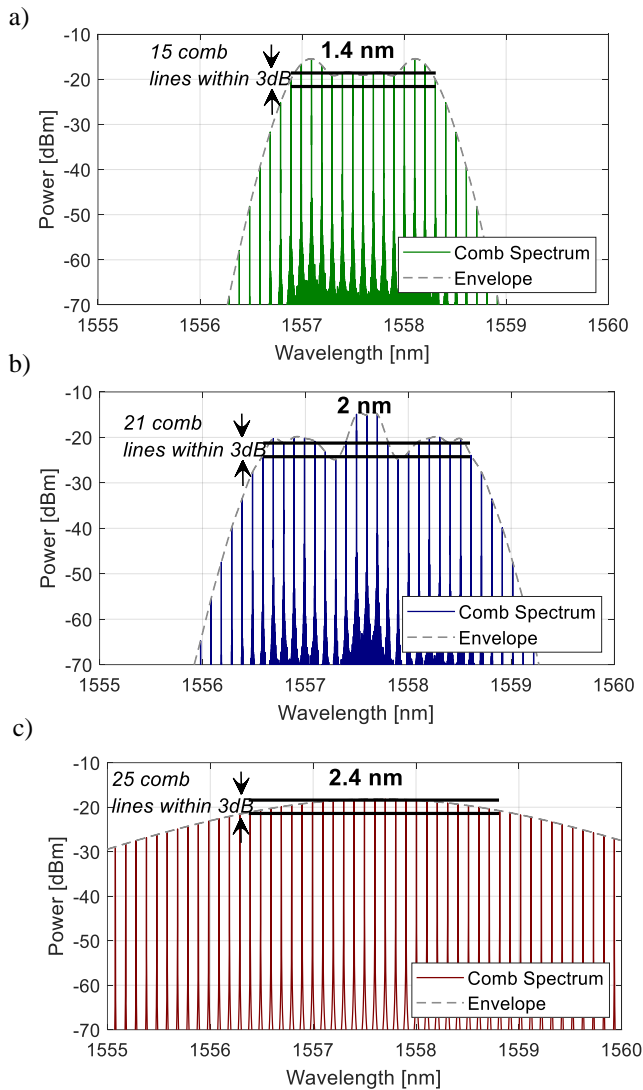


Figura 7. Espectros *comb*: a) FCG-MZM único, b) FCG-MZM cascada, c) USPL.

Es importante resaltar que para el caso del USPL se empleó una de las configuraciones espectrales posibles, la cual se obtuvo con determinada longitud de cavidad, esto con el objetivo de obtener el valor de ancho espectral más cercano al obtenido con los FCG-MZM haciendo las fuentes comparables para el análisis de algunas características espectrales. El ancho espectral máximo obtenido y registrado por el USPL propuesto es de 21 nm (Lopera J., 2020). Mientras que para el caso de los FCG-MZM el voltaje de inyección fue de 8 V, el cual es el valor máximo posible según las hojas de especificación de los MZM comerciales, corresponde al valor del voltaje de ruptura del cristal de LiNbO_3 , por tanto el ancho espectral resultante sería el máximo que se puede lograr experimentalmente con las configuraciones trabajadas.

En términos de planitud se observa que el espectro USPL es el que presenta un comportamiento más plano en el rango de interés. La configuración única MZM genera menos portadoras pero hay más variaciones de amplitud entre portadoras con respecto a la configuración en cascada. El ancho de cada portadora se ajustó en 12.5 MHz para las tres de modo que fuera comparable para la evaluación del desempeño de transmisión.

Estudio voltaje #líneas comb

En la figura 8 se presenta el estudio del número de líneas comb, y su correspondiente ancho espectral, en función del voltaje aplicado al cristal del modulador.

El FCG-MZM único muestra un comportamiento constante del ancho espectral resultante y el número de líneas *comb* al variar el voltaje aplicado. Por otra parte, la curva del FCG-MZM cascada no mantiene su pendiente igual, esto se debe porque posee mayores variaciones de amplitud entre portadoras, es decir, como se mencionó en la subsección anterior, su envolvente

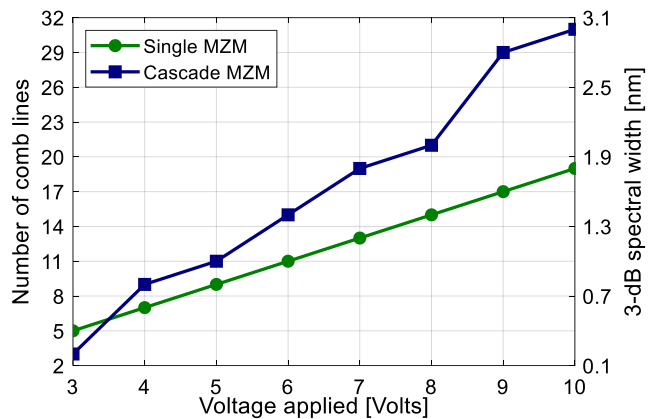


Figura 8. Número de líneas *comb* vs Voltaje aplicado para los FCG-MZM único (curva verde), cascada (curva azul).

espectral no es tan plana, con respecto a las otras dos MWS; y en algunos casos las portadoras de los extremos no quedaban contenidas en el rango de los 3 dB de ancho espectral.

Desempeño enlace WDM-PON

El desempeño de las MWS en el enlace de transmisión se presenta en las Figuras 9 y 10. Donde se muestra la estimación de la BER variando la longitud de la fibra SSMF y la relación señal a ruido óptica (OSNR – Optical Signal-Noise Ratio) de la señal a transmitir. Se hizo la evaluación fijando ciertos valores para producir algunos de los escenarios típicos o de interés en redes ópticas. En términos de la longitud de la fibra, se consideró un escenario sin fibra buscando obtener la caracterización del transmisor y receptor, y un escenario de 20 km de fibra, la cual es la distancia máxima para redes de acceso. Y en términos de OSNR se escogieron los escenarios con 12 dB y 18 dB, los cuales son valores que están dentro del rango típico y a la vez con suficiente diferencia para un análisis más general.

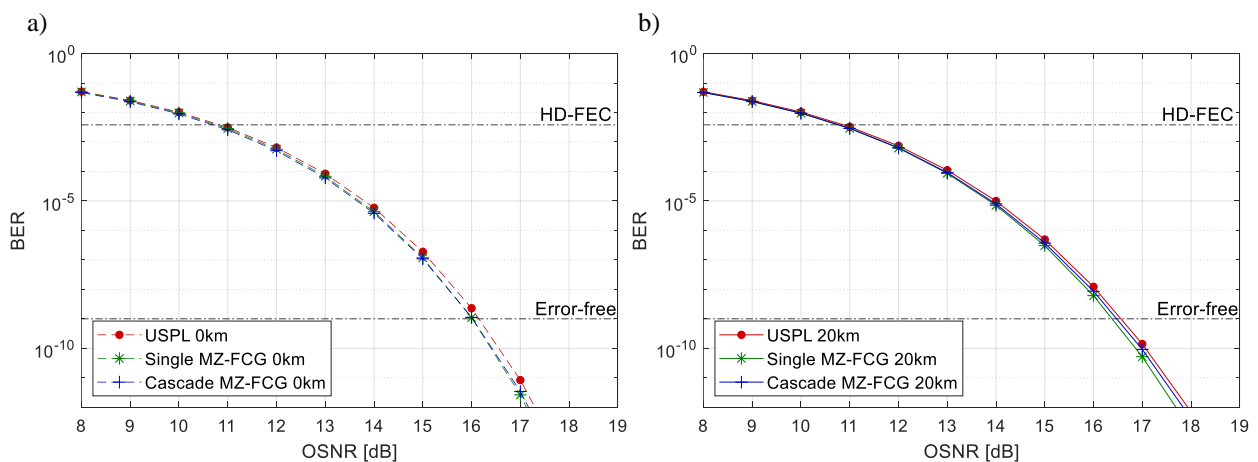


Figura 9. BER vs OSNR de cada una de las MWS para: a) 0 km de longitud de fibra (curvas de trazos) y b) 20 km de longitud de fibra (curvas continuas).

En las Figuras 9a) y 9b) se midió la BER en función de la OSNR, obteniendo para $BER=10^{-9}$ una penalidad en ganancia de aproximadamente 0.1 dB para distancias de 0 km y 20 km. El rango considerado como libre de errores (error-free) se alcanza para todas las MWS a partir de 16.2 dB de OSNR en el escenario sin fibra (0km), y para 20 km de fibra a partir de 16.6 dB. Para la Figura 10 se hizo el barrido en función de la longitud de la fibra. Se obtuvo una penalidad de distancia de alrededor de 2 km para $OSNR=18dB$ y $BER=10^{-9}$. El error-free solo se alcanza en el escenario de 18 dB cuando la longitud de la fibra es menor a 40 km.

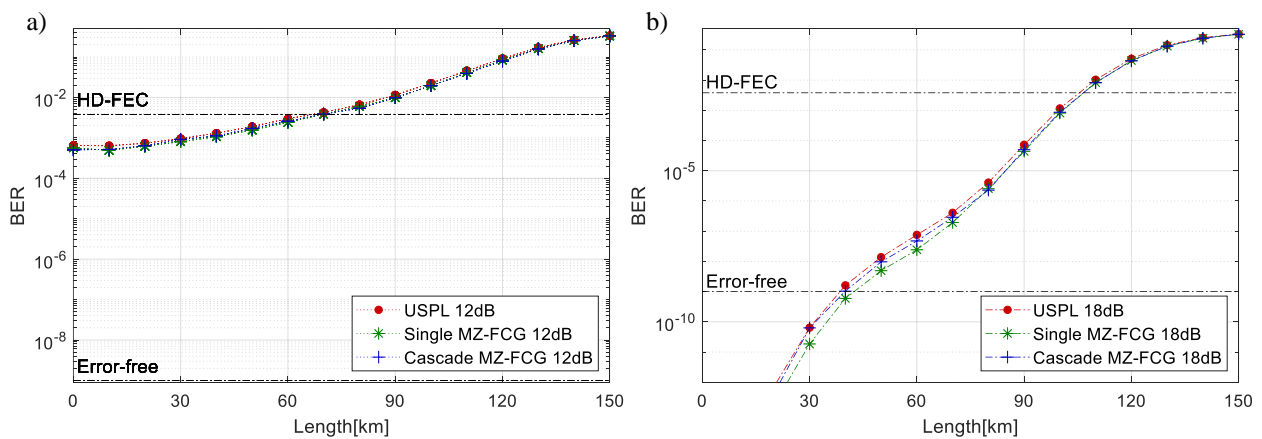


Figura 10. BER vs Longitud de enlace de cada una de las MWS para: a) OSNR de 12 dB (curvas punteadas) y b) OSNR de 18 dB (curvas de trazos y puntos).

Otro caso que es relevante analizar es cuando la BER es del valor del umbral hasta donde es posible aplicar la técnica de corrección de errores hacia adelante con decisión dura (HD-FEC – Hard Decision Forward Correction) $BER=3.8 \times 10^{-3}$. Tanto en los resultados mostrados en las Figuras 9 y 10, las diferencias son despreciables, por tanto se considera que no hay penalidades en distancia ni ganancia en dicho umbral.

Conclusiones

Se propuso una fuente multiportadora para sistemas WDM-PON, la cual consistía en un láser de pulsos ultracortos con cavidad a fibra dopada con erbio y grafeno como absorbedor saturable. Se analizó numericamente el desempeño espectral y de transmisión, en comparación con dos configuraciones (única y en cascada) de generadores de *combs* planos basados en moduladores Mach-Zehnder.

Los MWS, en la implementación en redes WDM-PON, presentan un comportamiento de desempeño similar en términos de la tasa de error de bit, los FCG-MZM exhiben una leve

mejora en el desempeño de transmisión en comparación con el USPL, obteniendo, para BER de 10^{-9} , una penalidad de distancia de alrededor de 2 km para 18 dB de OSNR, y una penalidad en ganancia de aproximadamente 0.1 dB para distancias de 0 km y 20 km. Sin embargo, las fuentes FCG-MZM tienen limitaciones, no fue posible, siquiera para la configuración en cascada, obtener más de 21 canales (considerando un espaciado de 12.5 GHz y para valores experimentalmente posibles). Mientras que para la fuente USPL propuesta se generaron 25 líneas *comb* sin necesidad de requerir altos niveles de voltaje ni llegar a su máximo ancho espectral registrado. De modo que, para la implementación de una red de acceso WDM-PON, el USPL propuesto como fuente multiportadora es una opción apropiada en términos de número de canales y rentabilidad.

Referencias

- D. Steinberg, J. D. (2021). Study of Pulse Formation in an EDFL Under a Large Dispersion Variation Hybridly Mode-Locked by Graphene and Nonlinear Polarization Rotation. *IEEE Photonics Journal*, 13(2), 1-14.
- Gaeta, A. L., Lipson, M., & Kippenberg, T. J. (2019). Photonic-chip-based frequency combs. *nature photonics*, 13(3), 158-169.
- H.-W. Hung, Y.-L. L.-W. (2017). 10-gb/s bidirectional wdm-pon transmission using spectrum-sliced ase light sources. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 40(1), 93-99.
- Hu, X. L. (2020). Multi-wavelength output based on gold nanoparticles in erbium-doped fiber lasers. *Applied Optics*, 59(10), 3196-3202.
- Imran, M. e. (2018). A Survey of Optical Carrier Generation Techniques for Terabit Capacity Elastic Optical Networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20(1), 211-263.
- Lopera, J. A. (2020). Graphene-based multi-wavelength source for WDM-PON. *Laser Science. Optical Society of America*, JTh4B-4.
- Lopera, J. A. (2021). "Wavelength division multiplexing-passive optical network using a graphene-based ultrashort pulsed fiber laser. *Optical Engineering*, 60(9), 096104.
- Lopera, J. A., Arroyave, K., & Zapata, J. D. (2019). Repetition rate and spectral performance for short EDFL cavities using a D-shaped fiber/graphene saturable absorber. *IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 1-3.
- Luo, L. G. (2000). 1-GHz optical communication system using chaos in erbium-doped fiber lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 12(3), 269-271.
- Morohashi, I. S. (2011). 1 THz-bandwidth optical comb generation using Mach-Zehnder-modulator-based flat comb generator with optical feedback loop. *National Fiber Optic Engineers Conference. Optical Society of America*, 29.
- Qu, K. Z. (2018). Ultraflat and broadband optical frequency comb generator based on cascaded two dual-electrode mach-zehnder modulators. *Optical Review*, 25(2), 264-270.
- Sakamoto, T. a. (2007). Widely wavelength-tunable ultra-flat frequency comb generation using conventional dual-drive Mach-Zehnder modulator. *Electronics Letters*, 43(19), 1039-1040.
- Shin, D. J. (2006). Low-cost WDM-PON with colorless bidirectional transceivers. *Lightwave Technology*, 24, 158-165.
- Steinberg, D. e. (2021). Study of Pulse Formation in an EDFL Under a Large Dispersion Variation Hybridly Mode-Locked by Graphene and Nonlinear Polarization Rotation. *IEEE Photonics Journal*, 13(2), 1-14.
- Sun, H. e. (2021). Recent progress in integrated electro-optic frequency comb generation. *Journal of Semiconductors*, 42(4), 041301.
- Villarreal, G. D. (2013). Performance of WDM-PON system based on optical frequency comb generation. *2013 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 1-6.
- Wang, Q. e. (2014). Ultra-flat optical frequency comb generator using a single-driven dual-parallel MachZehnder modulator. *Optical Letters*, 39(10), 3050-3053.
- Zapata, J. D. (2016). Sub-150 fs mode-locked Erbium doped fiber laser based on monolayer graphene on a D-shaped optical fiber. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). Optical Society of America*, 1-2.
- Zhang, D. e. (2020). Progress of ITU-T higher speed passive optical network (50G-PON) standardization. *Journal of Optical Communications and Networking*, 12(10), D99-D108.