

Propuesta de un mecanismo dinámico para contrarrestar el efecto de mezcla de cuatro ondas en una red de multiplexación por longitud de onda pasiva reconfigurable



Universidad
del Cauca

Anteproyecto de Trabajo de Grado
Modalidad: Trabajo de Investigación

Santiago Sánchez Echavarría
100618011101
Andrés Felipe Diago Matta
100618010965

Director: Phd. Jose Giovanni López Perafán
Co-director: Phd. Carlos Andres Martos Ojeda

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones
Programa de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones
Grupo de investigación de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT
Popayán, 6 de diciembre de 2023

Propuesta de un mecanismo dinámico que permita contrarrestar el efecto de FWM en una red MLR-PON

Santiago Sánchez Echavarría

100618011101

Andrés Felipe Diago Matta

100618010965

Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca para optar por el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Director: Phd. Jose Giovanni López Perafán

Co-director: Phd. Carlos Andres Martos Ojeda

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Programa de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Grupo de investigación de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT

Popayán, 6 de diciembre de 2023

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducion	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. METODOLOGÍA	3
2. CONCEPTOS Y TECNOLOGÍAS	4
2.0.1. Four Wave Mixing (FWM)	4
2.0.2. Redes MLR-PON	5
2.0.3. Asignación de Canales Desigualmente Espaciados	5
2.0.4. Reglas de Golomb	6
2.0.5. Algoritmos para Asignación de Canales	6
2.0.6. Simulación por Agentes	6
2.0.7. Mecanismos Dinámicos	6
2.0.8. Efectos No Lineales en Fibra Óptica	6
3. MECANISMO DINÁMICO	7
4. DISEÑO DEL PROCESO	8
4.1. REFERENCIAS	9

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

INTRODUCCIÓN

El continuo avance tecnológico en el ámbito de las comunicaciones ópticas ha posibilitado la transmisión eficiente de vastas cantidades de información a través de redes de fibra óptica. Aunque estas redes presentan numerosas ventajas, su despliegue no está exento de desafíos, especialmente derivados de fenómenos no lineales. La interacción entre la luz y el material de la fibra óptica da lugar a efectos no lineales, destacando su relevancia en sistemas de Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM), donde múltiples canales de diferentes longitudes de onda coexisten con mínima separación. La alta intensidad óptica, consecuencia de la propagación simultánea de canales de alta potencia, puede desencadenar fenómenos críticos que impactan la eficacia de la comunicación óptica. Entre estos fenómenos no lineales, destaca la Mezcla de Cuatro Ondas (*Four Wave Mixing*) (FWM), un efecto óptico no lineal de tercer orden. La FWM surge cuando dos o más señales ópticas con distintas frecuencias centrales se propagan en una misma fibra, generando armónicos que presentan frecuencias equivalentes a la suma o diferencia de las ondas originales.

En la búsqueda de soluciones para mitigar estos efectos no lineales, se han propuesto diversos enfoques, entre los cuales destacan los algoritmos de Supresión de Cruce de Señales Acústicas (USCA), los cuales han demostrado ser prometedores en la reducción de diafonía generada por señales co-propagantes. Para contrarrestar específicamente el impacto de la FWM, se torna esencial una asignación eficiente de canales en las fibras ópticas. En este contexto, las reglas de Golomb, originadas en la teoría de números y caracterizadas por definir conjuntos de enteros con la particularidad de tener todas sus sumas o diferencias distintas, emergen como una herramienta valiosa. Al garantizar distancias únicas entre las frecuencias asignadas, se puede mitigar el efecto de la FWM y mejorar la calidad de la transmisión.

Sin embargo, el empleo de reglas de Golomb para la asignación de canales no es una tarea trivial. El proceso de búsqueda y definición de estas reglas se vuelve computacionalmente desafiante, especialmente al considerar conjuntos de mayor tamaño. Ante este panorama, surge la necesidad imperante de proponer un mecanismo dinámico que, aprovechando las propiedades matemáticas de las reglas de Golomb, permita contrarrestar eficientemente el efecto de la FWM en las Redes de Multiplexación por Longitud de Onda Pasiva Reconfigurable (*Multi-Level Resilience Passive Optical Network*) (MLR-PON), adaptándose a diversas condiciones y requisitos de la red. En el contexto de canales WDM uniformemente espaciados, la generación de tér-

minos en frecuencias adyacentes provoca diafonía entre canales, afectando el rendimiento general del sistema. La supresión de la FWM, mediante la aplicación de reglas de Golomb, puede tener implicaciones prácticas significativas, como la posibilidad de utilizar canales más densamente espaciados en el espectro óptico, aumentando así la capacidad del sistema. Además, la atenuación de la FWM puede contribuir a mejorar la calidad de la señal, reducir la tasa de errores de bit y aumentar la distancia efectiva de transmisión.

Teniendo en cuenta en cuenta lo mencionado previamente, en el presente trabajo de investigación se realizará un análisis comparativo del efecto de la inclusión de un algoritmo basado en un mecanismo dinámico para contrarrestar los efectos de la mezcla de cuatro ondas, dentro de una arquitectura de red con enfoque en la asignación de canales desigualmente espaciados. A continuación, se describe el contenido de este trabajo de grado, expuesto en cuatro capítulos con base en la información obtenida en el desarrollo de la investigación.

Capítulo 1: Generalidades

En este capítulo se describen algunos aspectos generales sobre los sistemas de telecomunicaciones basados en fibra óptica.

Capítulo 2: Marco Metodológico

En este capítulo se definen la metodología y las herramientas de simulación

Capítulo 3: Diseño de la Arquitectura de Red

En este capítulo

Capítulo 4: Diseño del Algoritmo

En este capítulo

Capítulo 5: Análisis del Desempeño de la Red Implementando el Algoritmo

En este capítulo se realiza el análisis del desempeño de los modelos

Capítulo 6: Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros realizados

Palabras clave:

Mezcla de Cuadro Ondas (FWM), Multiplexación por División de Longitud de Onda, Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM).

Capítulo 1

GENERALIDADES

Una vez definido el motivo y los objetivos del trabajo y antes de dar un enfoque directamente sobre el problema, es necesario saber la situación actual del mismo. Comprender el objetivo, las tecnologías y arquitecturas utilizadas, es esencial para conocer el contexto del problema. En este capítulo hablaremos sobre los conceptos principales que se van a tratar a lo largo del proyecto.

1.1. Four Wave Mixing (FWM)

La Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, por sus siglas en inglés *Four Wave Mixing*) es un fenómeno no lineal que se manifiesta en sistemas de fibra óptica. Este efecto surge cuando dos o más señales ópticas, con frecuencias centrales diferentes, coexisten y se propagan a lo largo de una misma fibra.

En condiciones normales, estas señales ópticas deberían viajar independientemente sin interactuar significativamente entre sí. Sin embargo, debido a las no linealidades inherentes a la fibra óptica, como la no linealidad Kerr, las señales pueden influenciarse mutuamente.

El proceso de FWM implica la generación de nuevas componentes de frecuencia en la señal óptica original. Específicamente, se generan sumas y diferencias de las frecuencias originales, dando lugar a componentes espectrales adicionales. Este fenómeno puede introducir interferencias indeseadas entre los canales de comunicación en sistemas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM), afectando negativamente la calidad de la señal y, en última instancia, la integridad de la transmisión de datos.

La FWM se convierte en un desafío significativo, especialmente en entornos donde se utilizan múltiples canales con frecuencias cercanas, como en sistemas WDM con canales igualmente espaciados. La supresión efectiva de la FWM es esencial para garantizar un rendimiento óptimo en las redes ópticas y maximizar la capacidad del

sistema.

En el contexto de este trabajo, la propuesta de un mecanismo dinámico para contrarrestar la FWM en una red MLR-PON busca abordar este desafío, utilizando estrategias como la asignación de canales desigualmente espaciados y algoritmos optimizados para mitigar los efectos perjudiciales de la FWM.

1.2. Redes MLR-PON

Una Red de Acceso de Largo Alcance con Múltiples Longitudes de Onda (MLR-PON, por sus siglas en inglés *Long-Reach Multiple Wavelength Passive Optical Network*) es una variante evolucionada de la Red Óptica Pasiva (PON). A diferencia de las PON convencionales, las MLR-PON están específicamente diseñadas para proporcionar alcances extendidos, lo que las hace adecuadas para entornos donde se requiere cobertura en áreas geográficas más extensas.

Las redes MLR-PON logran este aumento en el alcance mediante el empleo de múltiples longitudes de onda en la transmisión de señales ópticas a través de la fibra. Cada longitud de onda puede considerarse como un canal independiente, lo que permite la transmisión simultánea de datos a diferentes velocidades y servicios.

Este enfoque de múltiples longitudes de onda no solo extiende el alcance de la red, sino que también proporciona una mayor flexibilidad y capacidad de ancho de banda. Además, las MLR-PON son compatibles con servicios de voz, datos y video, ofreciendo una solución integral para las demandas crecientes de conectividad en entornos residenciales y empresariales.

La implementación de MLR-PON se ha vuelto crucial para superar las limitaciones de distancia asociadas con las PON tradicionales, especialmente en áreas geográficas dispersas. En el contexto de este trabajo, la propuesta de un mecanismo dinámico para contrarrestar la Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) se enfoca en optimizar el rendimiento de las MLR-PON, abordando los desafíos específicos asociados con la interferencia no lineal en este tipo de redes.

1.3. Asignación de Canales Desigualmente Espaciados

La asignación de canales desigualmente espaciados es una estrategia de gestión del espectro en sistemas de transmisión óptica, donde las longitudes de onda utilizadas para la transmisión no siguen una separación uniforme. En contraste con la asignación de canales igualmente espaciados, donde la distancia entre las longitudes de onda adyacentes es constante, la asignación desigual implica una distribución no uniforme

de las longitudes de onda a lo largo del espectro óptico.

Esta técnica se utiliza para abordar problemas específicos relacionados con la interferencia y la diafonía en sistemas ópticos, especialmente en entornos de multiplexación por división de longitud de onda (WDM). La asignación desigual de canales puede optimizarse para minimizar la interferencia no lineal, como la Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, por sus siglas en inglés *Four Wave Mixing*), que puede ocurrir cuando las señales ópticas tienen intensidades significativas y se propagan simultáneamente en la fibra.

Esta estrategia permite adaptar la distribución de las longitudes de onda a las características específicas de la red óptica, teniendo en cuenta las propiedades de transmisión de la fibra y los efectos no lineales asociados. Al asignar desigualmente las longitudes de onda, se pueden evitar ciertos patrones que contribuyen a la interferencia no deseada, mejorando así el rendimiento del sistema.

En el contexto de este trabajo, la propuesta de un mecanismo dinámico para contrarrestar la FWM en una red MLR-PON se centra en la asignación de canales desigualmente espaciados como una estrategia clave para mitigar los efectos no lineales y mejorar la calidad de la transmisión en este tipo de arquitecturas.

1.4. Reglas de Golomb

Las reglas de Golomb y su variante generalizada, conocida como reglas g-Golomb, desempeñan un papel crucial en la asignación de canales en sistemas ópticos, especialmente en el contexto de la multiplexación por longitud de onda (WDM). Estas reglas se basan en conjuntos de enteros positivos que exhiben propiedades matemáticas particulares, lo que las hace extremadamente útiles en la resolución de problemas asociados con la interferencia de señales ópticas **Apostolos**.

En su forma más fundamental, las reglas de Golomb son conjuntos de números enteros positivos en los que las diferencias entre los elementos son distintas y están distribuidas de manera uniforme. Este comportamiento único proporciona una propiedad valiosa para la asignación de frecuencias en sistemas WDM, donde la interferencia entre canales adyacentes es una preocupación significativa.

La generalización de estas reglas, conocida como reglas g-Golomb, extiende su aplicabilidad al permitir conjuntos de enteros más grandes con distancias que pueden repetirse un número limitado de veces. Esta flexibilidad es esencial al abordar problemas prácticos en la asignación de canales, ya que se pueden crear conjuntos más grandes y complejos, lo que resulta beneficioso para contrarrestar fenómenos no lineales como la mezcla de cuatro ondas (FWM).

Al utilizar reglas de Golomb o g-Golomb en la asignación de frecuencias, se logra una distribución estratégica de los canales que ayuda a mitigar la interferencia y

optimizar el rendimiento del sistema. Además, al evitar la necesidad de búsquedas computacionales exhaustivas en conjuntos de mayor orden, como es el caso con las reglas g-Golomb, se facilita el diseño de algoritmos eficientes para la asignación de canales en sistemas ópticos avanzados.

En este contexto, explorar las propiedades y aplicaciones de las reglas de Golomb y su generalización se convierte en un componente esencial de la investigación y el desarrollo de soluciones para los desafíos asociados con la FWM en sistemas de comunicaciones ópticas.

1.5. Algoritmos para Asignación de Canales

Los algoritmos para la asignación de canales desempeñan un papel crucial en la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de comunicaciones ópticas, especialmente en entornos donde la interferencia entre canales es una consideración crítica. Estos algoritmos son esenciales para optimizar la distribución de frecuencias en sistemas de multiplexación por longitud de onda (WDM), y su diseño adecuado puede influir significativamente en la reducción de fenómenos no lineales, como la mezcla de cuatro ondas (FWM).

En el corazón de la asignación de canales se encuentra la necesidad de evitar la interferencia entre las señales ópticas transmitidas simultáneamente en una fibra. Los algoritmos dedicados a esta tarea buscan una distribución espacial y espectral eficiente de los canales, maximizando el ancho de banda disponible y minimizando la diafonía.

Estos algoritmos pueden clasificarse en diversas categorías, que incluyen métodos de asignación uniforme y métodos de asignación desigualmente espaciados. Mientras que los métodos de asignación uniforme buscan una separación constante entre las frecuencias de los canales, los métodos desigualmente espaciados, como los basados en reglas de Golomb o g-Golomb, buscan una separación no uniforme para minimizar la interferencia.

La complejidad de estos algoritmos varía según el enfoque y la naturaleza específica del sistema en cuestión. Algunos algoritmos se centran en la búsqueda exhaustiva de conjuntos óptimos, mientras que otros pueden aprovechar enfoques heurísticos para ofrecer soluciones rápidas y eficientes.

En el contexto de esta investigación, se explorarán y evaluarán algoritmos específicos, incluidos aquellos que aprovechan las propiedades de las reglas g-Golomb para la asignación de canales desigualmente espaciados. La ventaja de estos algoritmos radica en su capacidad para abordar problemas de interferencia y diafonía, proporcionando soluciones óptimas o aproximadas que mejoran el rendimiento general del sistema.

La investigación y desarrollo de algoritmos para la asignación de canales se con-

vierte así en un aspecto esencial para abordar los desafíos asociados con la FWM en redes de multiplexación por longitud de onda pasiva reconfigurable (MLR-PON).

1.6. Monitoreo de Desempeño Óptico - OPM

El monitoreo de desempeño óptico (OPM) representa una faceta crítica en la gestión de redes de comunicación óptica, desempeñando un papel clave en la evaluación y aseguramiento de la calidad de la transmisión de señales ópticas. Esta técnica proporciona una visión detallada de diversos parámetros ópticos, permitiendo una supervisión en tiempo real y una respuesta proactiva a posibles problemas que puedan afectar el rendimiento del sistema.

En el contexto de la tesis, el OPM se erige como una herramienta fundamental para evaluar la integridad de las señales ópticas en una red MLR-PON, donde la interferencia y los fenómenos no lineales, como la mezcla de cuatro ondas (FWM), pueden tener un impacto significativo.

El monitoreo de desempeño óptico implica la medición de diversas magnitudes, como la potencia óptica, la atenuación y la calidad de la señal. Estos datos son esenciales para evaluar la salud general del sistema y para anticipar cualquier degradación del rendimiento antes de que afecte la calidad de la transmisión.

La integración de herramientas de OPM en una red MLR-PON permite la identificación temprana de posibles puntos problemáticos, facilitando así la implementación de medidas correctivas. Esto resulta crucial en entornos dinámicos, donde las condiciones de la red pueden cambiar debido a factores ambientales, mantenimiento, o variaciones en la demanda del servicio.

Capítulo 2

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presentan las herramientas y procedimientos abordados en la realización del trabajo de grado. Así mismo, se describe la herramienta de software escogida para el diseño y la simulación de la red. Luego, se presenta la metodología seleccionada y su aplicación dentro del trabajo de grado.

2.1. Herramienta de Simulación

Es esencial llevar a cabo una simulación o modelado exhaustivo de un sistema de comunicaciones antes de su implementación real. En este sentido, resulta fundamental escoger una herramienta o software de simulación que permita monitorear y analizar eficazmente el comportamiento de la señal a través del canal óptico deseado. La herramienta debe posibilitar la recreación del funcionamiento de la red en un entorno lo más cercano posible a la realidad, facilitando la evaluación del rendimiento mediante la consideración de los parámetros de Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM). En la presente sección, se presenta y describe la herramienta de simulación. Así mismo, se analiza su comportamiento, la disponibilidad de licencia (en caso de ser aplicable) y la capacidad de implementar tecnologías a nivel de enlace y de red. A continuación, la descripción de la herramienta a considerar:

2.1.1. OptSim

OptSim es una herramienta desarrollada por Synopsys, basada en un entorno de simulación y modelado intuitivo destinado al diseño y la evaluación del rendimiento en el nivel de transmisión de sistemas de comunicaciones ópticas. Esta herramienta dispone de una amplia librería que incluye los componentes más comúnmente utilizados en sistemas de comunicaciones ópticas, clasificados en diversas categorías como transmisores, generadores de señales, fibras ópticas, multiplexores, demultiplexores,

receptores, entre otros.

Esta estructura permite lograr un equilibrio óptimo entre precisión y eficiencia temporal, facilitando la optimización de los diseños para mejorar el rendimiento y reducir costos. OptSim se distingue por su elevado nivel de eficiencia y precisión, mientras que su interfaz gráfica es de fácil manipulación, lo que contribuye a una experiencia de usuario intuitiva y eficaz.

Capítulo 3

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DEL ALGORITMO PROPUESTO

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse

platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Capítulo 4

CONCLUSIONES

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fer-

mentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consetetuer.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Capítulo 5

REFERENCIAS

Bibliografía

- [1] J. Toulouse, «Optical Nonlinearities in Fibers: Review, Recent Examples, and Systems Applications,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, n.º 11, págs. 3449-3465, 2005.
- [2] S. P. Singh y N. Sing, *Nonlinear effects in optical fibers: Origin, management and applications*, Department of Electronics and Communication University of Allaha-bad, 2007.
- [3] S. Bansal, «A Comparative Study of Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms in Search of Near-to-optimal Golomb Rulers for the FWM Crosstalk Elimination in WDM Systems,» Electronics y Communication Engineering Department, Punjab Engineering College, 2019.

Apéndice A

Anexo

