



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

ANÁLISIS DE EFECTOS NO LINEALES EN LA TRANSMISIÓN DE CANALES WDM
SOBRE LA DELTA METROPOLITANA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. JORGE ALBERTO GARCÍA NUÑEZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. DANIEL ENRIQUE CEBALLOS HERRERA
INSTITUTO INGENIERÍA,
UNAM

Ciudad Universitaria, Ciudad de México. Noviembre 2020.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“Un hombre puede imaginar cosas que son falsas, pero sólo puede entender cosas que son ciertas.”.

Isaac Newton

Agradecimientos

A los mejores padres del mundo, los míos.

A mi hermanita linda.

A mi esposa hermosa que emprendió este viaje de superación junto conmigo hace ya más de 2 años.

A toda mi familia.

A todos mis amigos, los de toda la vida, los de la universidad, los que hice en México...

A mi tutor Dr. Daniel Enrique Ceballos por transmitir sus conocimientos y guiarme siempre hacia la superación personal y profesional.

Al colectivo de profesores del campo telecomunicaciones por brindarme la oportunidad de crecer como profesional en tan prestigiosa institución como es la UNAM.

Al Conacyt por la ayuda económica brindada para la realización de mis estudios de posgrado.

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Ing. Jorge Alberto García Nuñez. Ciudad de México, de octubre de 2020.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Rangel Licea Víctor

Secretario: Dr. Gutiérrez Castrejón Ramón

1^{er.} Vocal: Dr. Ceballos Herrera Daniel Enrique

2^{do.} Vocal: Dra. Moumtadi Fátima

3^{er.} Vocal: Dr. Martynyuk Oleksandr

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO.

TUTOR DE TESIS:

DR. DANIEL ENRIQUE CEBALLOS HERRERA

FIRMA

Resumen

La presente investigación realiza el análisis de los efectos no lineales asociados a la transmisión de canales WDM sobre la “Delta Metropolitana”. Se realiza un profundo estudio sobre los fundamentos y los alcances del uso de la multiplexación por división de longitudes de onda en el diseño de sistemas de comunicación ópticas para la transmisión masiva de datos. Se definen cuáles son las características principales de los sistemas WDM y se identifican las no linealidades que afectan el desempeño de estas redes. En un segundo capítulo se caracteriza el medio óptico Delta Metropolitana, se realiza una descripción de la topología de la red de fibra óptica y se identifican parámetros principales del medio de comunicación como atenuación y dispersión cromática. El capítulo 3 expone la confección de forma experimental de la fuente WDM caracterizando las partes que la conforman, así como su sintonización y equalización. En una etapa posterior se describen los resultados experimentales de la inserción de esta fuente WDM en un carrete de fibra SMF 28 de 2.3km de longitud. Estos resultados y la caracterización del medio óptico son empleados para ajustar la simulación de la inserción de la fuente WDM en la Delta Metropolitana en una última etapa de la investigación. Las conclusiones de la investigación incluyen los regímenes de trabajo principales para la transmisión de canales WDM en la Delta Metropolitana.

Abstract

This research performs the analysis of the non-linear effects associated with the transmission of WDM channels on the “Delta Metropolitana”. A deep study is carried out on the fundamentals and scope of the use of wavelength division multiplexing in the design of optical communication systems for massive data transmission. The main characteristics of WDM systems are defined and the non-linearities that affect the performance of these networks are identified. In a second chapter, the optical medium (“Delta Metropolitana”) is characterized, a description of the topology of the fiber optic network is made and main parameters of the communication medium are identified, such as attenuation and chromatic dispersion. Chapter 3 exposes the experimental creation of the WDM source, characterizing the parts that make it up, as well as their tuning and equalization. In a later stage, the experimental results of inserting this WDM source into a 2.3km-long SMF 28 fiber reel are described. These results and the characterization of the optical medium are used to adjust the simulation of the insertion of the WDM source in the Metropolitan Delta in a last stage of the investigation. The research findings include the main working regimes for the transmission of WDM channels in the “Delta Metropolitana”.

Introducción

El incremento exponencial en los últimos años del ancho de banda requerido por las redes ha generado una búsqueda continua del aumento de la capacidad de los sistemas de comunicación óptica a través de técnicas de multiplexación más eficientes, como la Multiplexación por Longitud de Onda (WDM). Estos sistemas han demostrado ser muy eficientes en la transmisión de grandes cantidades de información ya que pueden multiplicar la cantidad de información transmitida de acuerdo al número de canales WDM considerados, pero al sobrepasar velocidades de transmisión de 10 Gb/s por canal y trabajar con altas potencias, el medio de transmisión ya no puede ser considerado un medio lineal, y es ahí donde comienzan a aparecer efectos no lineales que contribuyen a degradar la transmisión de los canales WDM. Este tipo de efectos ha suscitado que en la actualidad se realicen estudios acerca de este tipo de degradaciones en las redes de comunicaciones ópticas WDM; sin embargo, los estudios y análisis realizados son limitados. Uno de los principales factores para mejorar el desempeño de una red WDM es identificar los parámetros de transmisión que hacen incrementar los efectos no lineales, para así evitarlos y minimizar las degradaciones causadas por las no linealidades en el desempeño de la red.

En el presente proyecto de investigación se plantea realizar un análisis de los efectos no lineales asociados a la transmisión de canales WDM sobre una red de fibra óptica actualmente instalada en la Ciudad de México denominada Delta Metropolitana. En el ámbito académico en México no existe un antecedente de investigación teórica o experimental para determinar cuáles regímenes de operación son los adecuados para evitar los efectos no lineales presentes en redes WDM. Realizar la investigación de forma numérica y experimental permitiría definir y proponer mejores diseños de redes WDM con mayores capacidades de transmisión. Además, serviría para crear una plataforma de capacitación a los profesionales vinculados a las comunicaciones por fibra óptica.

Para la realización de la investigación se proponen los siguientes objetivos:

Objetivo General:

Analizar de forma numérica y experimental las no linealidades asociadas a la transmisión de canales WDM sobre una red de fibra óptica real.

Objetivos Específicos:

- I. Estudiar la técnica de multiplexado por división de longitud de onda (WDM) en fibras ópticas.
- II. Identificar y caracterizar efectos no lineales en sistemas WDM.
- III. Proponer un esquema de transmisión WDM.
- IV. Analizar numérica y experimentalmente el esquema de transmisión WDM empleando como medio de transmisión un carrete de 2.3 km de fibra óptica.

- V. Analizar numéricamente a través de un método matemático programado en Matlab el sistema de transmisión WDM empleando como medio de transmisión la Delta Metropolitana.

Los resultados de la presente tesis de investigación se presentarán en un documento estructurado en cinco capítulos. El primero de ellos describe los conceptos básicos requeridos para realizar el correcto análisis de las características, componentes de los sistemas de comunicaciones ópticas WDM y los fenómenos lineales y no lineales que degradan el rendimiento de sistemas WDM.

El segundo capítulo abarca una caracterización de los principales parámetros del medio de transmisión que se utiliza para el desarrollo de la investigación, que corresponde a una red de fibra óptica previamente instalada en la Ciudad de México, denominada “Delta Metropolitana”.

El tercero de los capítulos integra una caracterización de la fuente de transmisión que se empleó para implementar el sistema WDM, el cual consiste en una fuente comercial con 3 láseres emitiendo a diferentes longitudes de onda.

Posteriormente en el cuarto capítulo se aborda la realización del experimento que consiste en implementar un sistema de transmisión WDM, primero empleando como medio de transmisión un carrete de fibra óptica de 2.3 km de longitud y posteriormente empleando la red de fibra Delta Metropolitana, y mediante un analizador de espectro óptico, analizar en ambos casos el efecto de las no linealidades asociadas a la transmisión y propagación de canales WDM sobre el medio de transmisión óptico.

Finalmente, el capítulo 5 incluye el análisis de los resultados obtenidos al determinar de forma experimental los regímenes de operación apropiados para lograr un mejor desempeño de sistemas WDM.

Índice

<i>Capítulo I: “Sistemas WDM y no linealidades asociadas”</i>	11
1.1 Fundamentos de los sistemas WDM.....	11
1.2 Componentes de un sistema WDM	12
1.2.1 Filtros Ópticos Sintonizables	13
1.2.2 Multiplexores y Demultiplexores	14
1.2.3 Conversores de Longitudes de Onda	18
1.2.4 Transmisores y receptores WDM	19
1.3 Problemas de rendimiento de los sistemas WDM.....	20
1.3.1 Efectos lineales asociados a la transmisión de canales WDM.....	20
1.3.2 Efectos no lineales asociados a la transmisión de canales WDM	20
<i>Capítulo II: “Delta Metropolitana”</i>	26
2.1 Topología de la red de transporte por fibra óptica	26
2.1.1 Enlace Sur-Norte de la Ciudad de México (UNAM- CINEVESTAV)	29
2.1.2 Enlace Norte-Oriente de la Ciudad de México (CINEVESTAV-UAMI).....	30
2.1.3 Enlace Oriente-Sur de la Ciudad de México (UAMI-UNAM)	31
2.3 Caracterización de atenuación del enlace	33
2.4 Caracterización de la dispersión cromática del enlace	37
<i>Capítulo III: “Descripción de la fuente WDM”</i>	39
3.1 Caracterización de la fuente láser comercial DFB-4-B-20S	39
3.2 Descripción del multiplexor óptico	40
3.3 Ecuación y sintonización de la fuente WDM	41
<i>Capítulo IV: “Inserción de la fuente WDM en la Delta Metropolitana”</i>	45
4.1 Inserción de la fuente WDM DFB-4-B en una fibra de 2.3 km	45
4.2 Software de simulación y su calibración utilizando el experimento real a 2.3km	50
4.3 Inserción de la fuente WDM DFB-4-B en la Delta Metropolitana.....	52
4.4 Análisis de la transmisión de canales WDM a diferentes potencias y espaciamento intercanal constante	53
4.5 Análisis de la transmisión de canales WDM a diferente espaciamento intercanal y a potencia constante	58
4.7 Análisis de la desecualización en la transmisión de canales WDM a diferentes potencias y espaciamento intercanal constante	66
<i>Capítulo V: “Conclusiones”</i>	70

<i>Anexo 1: “Propagacion_canales_WDM_2300m”</i>	72
<i>Anexo 2: “Propagacion_canales_WDM_103km”</i>	76
<i>Referencias Bibliográficas</i>	80

Capítulo I: “Sistemas WDM y no linealidades asociadas”

La demanda de más y mejores aplicaciones para redes de telecomunicaciones siempre ha impulsado la necesidad de más ancho de banda de estas redes. Al mismo tiempo, a medida que el ancho de banda ha aumentado constantemente en las últimas décadas, más aplicaciones han surgido para utilizar este ancho de banda. Y así el ciclo continúa. Las redes de fibra óptica han estado a la vanguardia para proporcionar a los usuarios más ancho de banda, permitiéndoles ejecutar una serie de nuevas aplicaciones que abarcan todo el espectro de la interacción humana, incluidas las actividades cotidianas, el entretenimiento y negocios.

Los sistemas y redes ópticas han experimentado una evolución increíblemente rápida. Solo unas pocas décadas separan la invención del láser y la fibra de baja pérdida del amplio uso del multiplexado por división de longitud de onda (WDM) en sistemas de comunicación de fibra óptica en las redes de telecomunicaciones actuales. Estos sistemas ahora están en cada parte de la infraestructura de telecomunicaciones, incluyendo submarino, *backbone*, área metropolitana, así como redes de acceso, llegando a nuestros hogares y negocios. [1]

1.1 Fundamentos de los sistemas WDM

WDM corresponde al esquema en el que se modulan múltiples portadores ópticos a diferentes longitudes de onda mediante el uso de flujos de bits eléctricos independientes (que pueden usar técnicas TDM y FDM en el dominio eléctrico) y luego se transmiten sobre la misma fibra. La señal óptica en el receptor se demultiplexa y se separa en canales individuales mediante el uso de una técnica óptica. WDM tiene la facilidad de utilizar el gran ancho de banda que tienen las fibras ópticas. Para los enlaces de fibra de larga distancia que forman la red troncal o el núcleo de una red de telecomunicaciones. La función de WDM es simplemente aumentar la tasa de bits total. Por ejemplo 40 canales ópticos cada uno a una tasa de bits de 10 Gb/s se pueden transmitir sobre la misma fibra óptica mientras el espaciamiento entre canales adyacentes mínimo sea de 100 GHz, este sistema de comunicaciones puede entonces alcanzar 400 Gb/s de tasa de datos total.

La figura 1.1 muestra esquemáticamente un enlace WDM punto a punto de alta capacidad. La salida de varios transmisores, cada uno operando a su propia frecuencia portadora (o longitud de onda), se multiplexa entre sí. La señal multiplexada se lanza a la fibra óptica para su transmisión al otro extremo, donde un demultiplexor envía cada canal a su propio receptor [2].

Cuando se tiene N canales a tasas de bits B_1, B_2, \dots, B_N se transmiten simultáneamente a través de una fibra de longitud L, el producto de velocidad de bits total-distancia, BL, se convierte en:

$$BL = (B_1 + B_2 + \dots + B_N)L$$

Para tasas de bits iguales, la capacidad del sistema se incrementa por un factor de N.

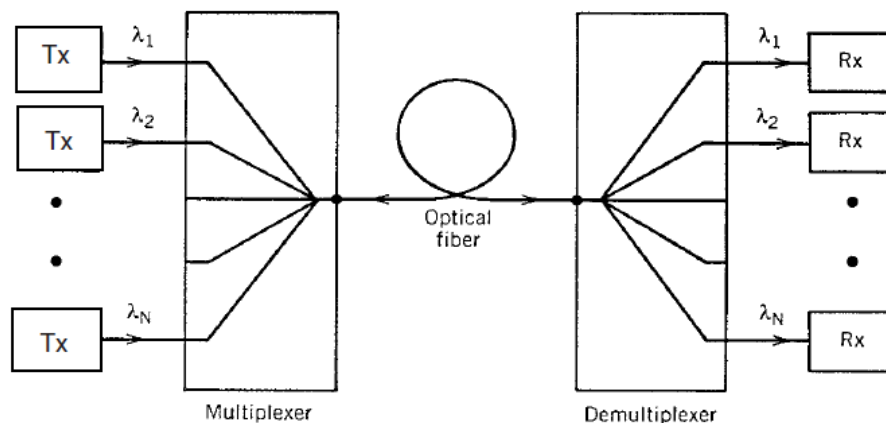


Figura 1.1: Enlace de fibra punto a punto multicanal. Se utilizan pares de transmisor-receptor separados para enviar y recibir la señal en diferentes longitudes de onda [2].

La capacidad máxima de los enlaces de fibra WDM depende de qué tan cerca se puedan empaquetar los canales en el dominio de longitud de onda. El espaciamiento mínimo entre canales está limitado por el *crosstalk* intercanal. Típicamente, el espacio entre canales adyacentes $\Delta\nu_{ch}$ debe exceder $2B$ a la tasa de bits B . Este requisito desperdicia un ancho de banda considerable. Es común introducir una medida de la eficiencia espectral de un sistema WDM como $\eta_s = B/\Delta\nu_{ch}$. Lo que se pretende lograr es una η_s lo más grande posible.

Las frecuencias de los canales (o longitudes de onda) de los sistemas WDM están estandarizados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (*ITU, por sus siglas en inglés*) en el rango de frecuencias 186-196 THz [3]. Por esa razón, el espaciamiento entre canales para muchos sistemas WDM comerciales es de 100 GHz. Este valor conduce solamente a un 10% de eficiencia espectral a una razón de bits de 10 Gb/s. Recientemente, ITU ha especificado canales WDM con espaciamiento de 50 GHz. El uso de este espaciamiento entre canales en combinación con una tasa de bit de 40 Gb/s ha significado un incremento de la eficiencia espectral hasta un 80%.

1.2 Componentes de un sistema WDM

La implementación de la tecnología WDM para sistemas de comunicación de fibra óptica requiere varios componentes ópticos. Entre ellos hay multiplexores, que combinan la salida de varios transmisores y las envían a una única fibra óptica; demultiplexores que dividen la señal multicanal recibida en canales individuales destinados a diferentes receptores, acopladores en estrella que mezclan la salida de varios transmisores y transmiten la señal mixta a múltiples receptores, filtros ópticos sintonizables que filtran un canal a una longitud de onda específica que se puede cambiar ajustando la banda de paso del filtro óptico, transmisores ópticos de longitud de onda múltiple cuya longitud de onda se puede sintonizar en unos pocos nanómetros, multiplexores *add-drop* que pueden distribuir la señal WDM a diferentes puertos; y desplazadores de longitud de onda que cambian la longitud de onda del canal [2].

1.2.1 Filtros Ópticos Sintonizables

La función de un filtro sintonizable en un sistema WDM es seleccionar el canal deseado para el receptor. El ancho de banda del filtro debe ser lo suficientemente grande para transmitir el canal deseado, pero, al mismo tiempo, lo suficientemente pequeño para bloquear los canales vecinos. Todos los filtros ópticos requieren un mecanismo selectivo de longitud de onda y pueden clasificarse en dos amplias categorías dependiendo de si la interferencia óptica o difracción es el mecanismo físico subyacente.

Las propiedades deseables de un filtro óptico sintonizable incluyen: amplio rango de sintonización para maximizar el número de canales que se pueden seleccionar, diafonía insignificante para evitar interferencias de canales adyacentes, velocidad de sintonización rápida para minimizar el tiempo de acceso, pequeña pérdida de inserción, insensibilidad a la polarización, estabilidad frente a cambios ambientales (humedad, temperatura, vibraciones) y bajo costo [2]. A continuación, se describen algunos tipos de filtros ópticos sintonizables.

Interferómetro Fabry-Perot (FP): consiste en una sola cavidad formada por dos espejos paralelos (Figura 1.2). La luz de una fibra de entrada ingresa a la cavidad y se refleja varias veces entre los espejos. Al ajustar la distancia entre los espejos, se puede elegir una sola longitud de onda para propagarse dentro de la cavidad mientras que las longitudes de onda restantes interfieren destructivamente. La distancia entre los espejos puede ajustarse mecánicamente moviendo físicamente los espejos o cambiando el índice del material dentro de la cavidad [4]. Puede actuar como un filtro óptico sintonizable si su longitud se controla electrónicamente mediante el uso de un transductor piezoeléctrico.

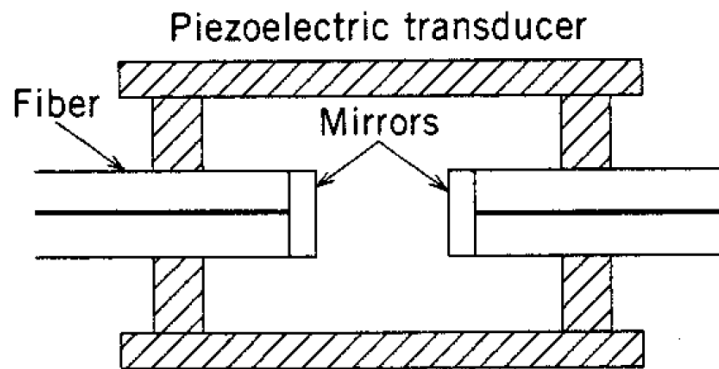


Figura 1.2: Filtro Fabry-Perot [2].

La ventaja de los filtros de fibra FP es que pueden integrarse dentro del sistema sin incurrir en pérdidas de acoplamiento. El número de canales generalmente está limitado a menos de 100 pero se puede aumentar usando dos filtros FP en tándem. Aunque la sintonización es relativamente lenta debido a la naturaleza mecánica del mecanismo de sintonización, es suficiente para algunas aplicaciones.

Interferómetro Mach-Zender (MZ): Se puede construir un interferómetro MZ simplemente conectando los dos puertos de salida de un acoplador de 3 dB a los dos puertos de entrada de otro acoplador de 3 dB (Figura 1.3).

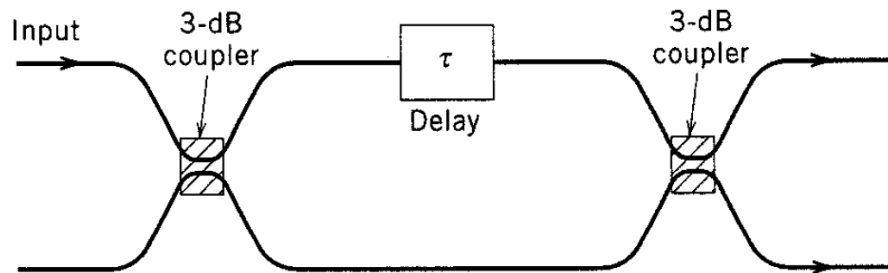


Figura 1.3: Filtro Mach-Zender [2].

Un elemento de retardo ajustable controla la longitud del camino óptico en una de las guías de onda, lo que resulta en una diferencia de fase entre las dos señales cuando son nuevamente juntadas. Las longitudes de onda para las cuales la diferencia de fase es 180 se filtran. Al construir una cadena de estos elementos, se puede seleccionar una única longitud de onda óptica deseada.

1.2.2 Multiplexores y Demultiplexores

Debido a que los sistemas WDM envían señales desde varias fuentes a través de una sola fibra, deben incluir algunos medios para combinar las señales entrantes. Esto se hace con un multiplexor. El multiplexor toma las señales de diferentes longitudes de onda ópticas de múltiples fibras y las converge en un solo haz. En el extremo receptor, el sistema debe ser capaz de separar los componentes de la luz para que puedan ser detectados discretamente. Los demultiplexores realizan esta función separando la señal luminosa recibida en sus componentes de longitud de onda y acoplándolas a fibras individuales. La demultiplexación debe realizarse antes de que se detecte la luz, porque los fotodetectores son dispositivos de banda ancha inherentes que no pueden detectar selectivamente una sola longitud de onda.

Los multiplexores y demultiplexores pueden ser pasivos o activos en diseño. Los diseños pasivos se basan en prismas, rejillas de difracción o filtros, mientras que los diseños activos combinan dispositivos pasivos con filtros sintonizables. Los principales desafíos en estos dispositivos es minimizar el *cross-talk* o interferencia entre canales conforme se reduce la separación espectral entre estos para así obtener una mayor densidad de canales WDM transmitidos sin degradaciones [5].

1.2.2.1 Tecnologías de Multiplexación y Demultiplexación

Los multiplexores y demultiplexores requieren un mecanismo selectivo de longitud de onda y se puede clasificar en dos amplias categorías. Los demultiplexores basados en difracción utilizan un elemento angularmente dispersivo, como una rejilla de difracción que dispersa la luz incidente espacialmente en varias componentes de longitud de onda. Los demultiplexores

basados en interferencias utilizan dispositivos como filtros ópticos y acopladores direccionales. En ambos casos, el mismo dispositivo puede usarse como multiplexor o demultiplexor, dependiendo de la dirección de propagación, debido a la reciprocidad inherente de las ondas ópticas en los medios dieléctricos [2].

Se puede hacer una forma simple de multiplexación o demultiplexación de luz usando un prisma. La Figura 1.4 demuestra el caso de la demultiplexación. Un haz paralelo de luz policromática incide en la superficie de un prisma; cada componente de longitud de onda se refracta de manera diferente. En la luz de salida, cada longitud de onda está separada de la siguiente por un ángulo. Luego, una lente enfoca cada longitud de onda hasta el punto donde necesita ingresar a una fibra [5].

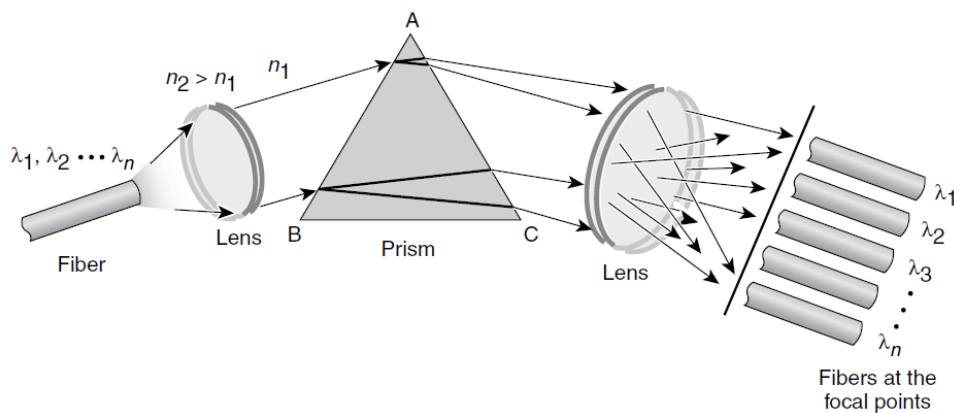


Figura 1.4: Demultiplexación por refracción del prisma [5].

Otra tecnología se basa en los principios de difracción y de interferencia óptica. Cuando una fuente de luz policromática incide en una rejilla de difracción (ver Figura 1.5), cada longitud de onda se difracta en un ángulo diferente y, por lo tanto, en un punto diferente en el espacio. Usando una lente, estas longitudes de onda pueden enfocarse en diferentes fibras individuales [5].

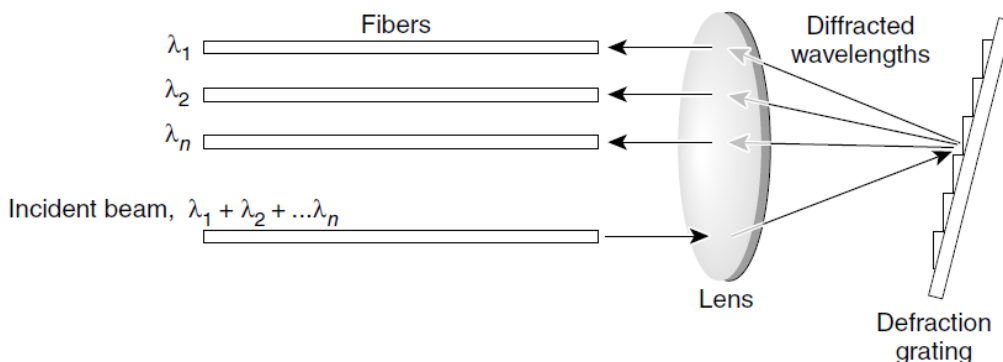


Figura 1.5: Difracción de rejilla de guía de onda [5].

Un problema con los demultiplexores de rejilla es que sus características de pasa banda dependen de las dimensiones de las fibras de entrada y salida. En particular, el tamaño del núcleo de las fibras de salida debe ser grande para asegurar una banda plana y bajas pérdidas de inserción. Por esta razón, la mayoría de los primeros diseños de multiplexores usaban fibras multimodo.

Los demultiplexores basados en filtros utilizan el fenómeno de interferencia óptica para seleccionar la longitud de onda. Los demultiplexores basados en el filtro MZ han atraído más atención. Similar al caso de un filtro óptico sintonizable, varios interferómetros MZ se combinan para formar un demultiplexor WDM. La figura 1.6 ilustra el concepto básico mostrando el diseño de un multiplexor de cuatro canales. Se compone de tres interferómetros MZ. Un brazo de cada interferómetro MZ se hace más largo que el otro para proporcionar un cambio de fase dependiente de la longitud de onda entre los dos brazos. La diferencia de longitud de ruta se elige de modo que la potencia de entrada total de dos puertos de entrada a diferentes longitudes de onda aparezca en un solo puerto de salida. Toda la estructura se puede fabricar sobre un sustrato de silicón utilizando guías de onda de SiO₂ en forma de circuito de onda de luz plana [2].

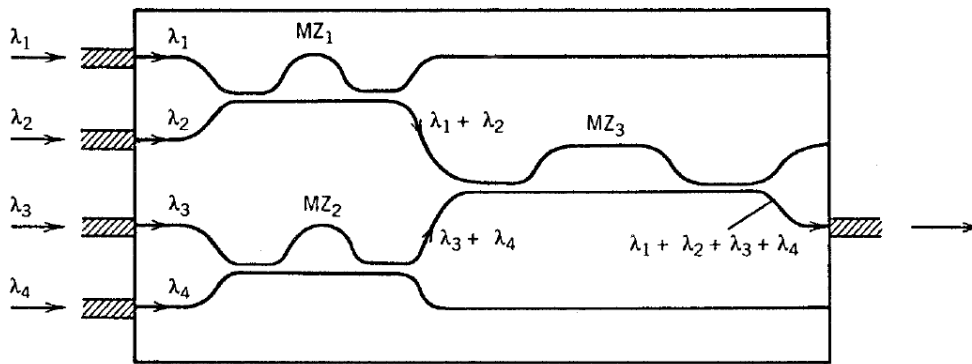


Figura 1.6: Multiplexor de cuatro canales basado en interferómetros Mach-Zehnder [2].

Desde el punto de vista del diseño del sistema, se prefieren demultiplexores integrados con bajas pérdidas de inserción. Un enfoque interesante utiliza un arreglo de fases de guías de ondas ópticas que actúa como una rejilla. Estas rejillas se denominan arreglos de rejillas de guía de onda (AWG) y han atraído una atención considerable porque pueden fabricarse utilizando la tecnología de silicio, InP o LiNbO₃ [2].

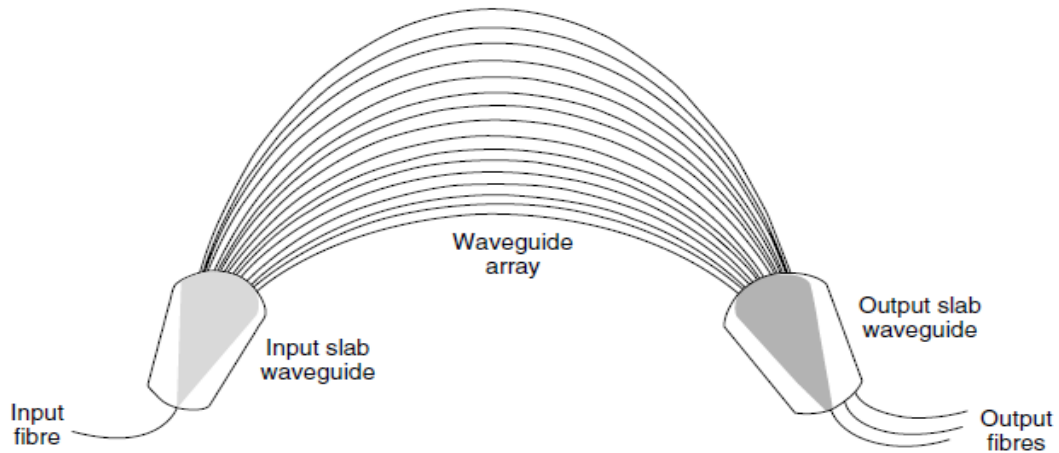


Figura 1.7: Rejilla de Arreglo de Guía de Onda (AWG)[6].

La figura 1.7 muestra el diseño de un demultiplexor hecho con un arreglo de guías de onda. La señal WDM entrante se acopla a un arreglo de guías de onda planas después de pasar a través de una región de propagación libre en forma de lente. En cada guía de onda, la señal WDM experimenta un cambio de fase diferente debido a las diferentes longitudes de las guías de onda. Además, los cambios de fase dependen de la longitud de onda debido a la dependencia de la frecuencia de la constante de modo de propagación. Como resultado, diferentes canales se enfocan en diferentes guías de onda de salida cuando la luz que sale de la matriz difracta en otra región de propagación libre. El resultado neto es que la señal WDM se demultiplexa en canales individuales [2].

1.2.2.2 Multiplexores Add/Drop Ópticos

Entre los puntos de multiplexación y demultiplexación en un sistema DWDM, como se muestra en la Figura 1.8, hay un área en la que existen múltiples longitudes de onda. A menudo es deseable poder extraer o insertar una o más longitudes de onda en algún punto a lo largo de este lapso. Un multiplexor óptico *add/drop* (OADM) realiza esta función. En lugar de combinar o separar todas las longitudes de onda, el OADM puede extraer algunas mientras inserta otras. Los OADM son una parte clave para avanzar hacia el objetivo de las redes totalmente ópticas [5].

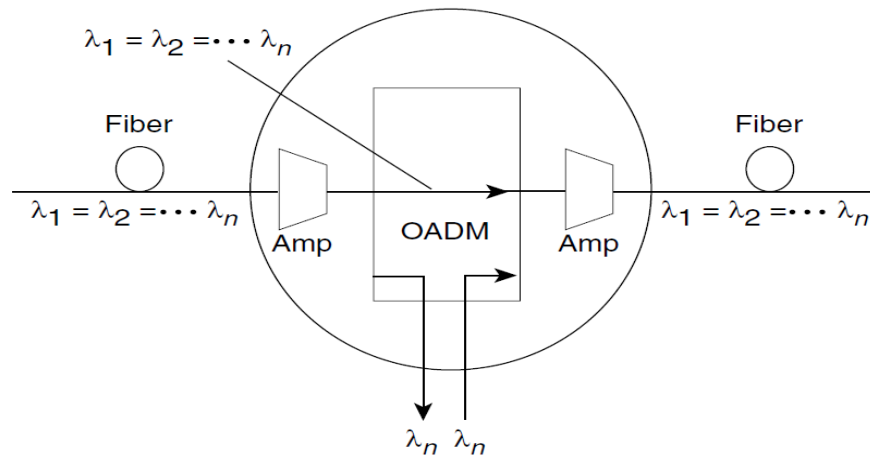


Figura 1.8: Multiplexor Add/Drop Óptico [5].

Se han propuesto varias arquitecturas para construir OADM. Estas arquitecturas generalmente usan uno o más de los multiplexores/filtros tratados en los epígrafes anteriores. Los OADM más prácticos usan rejillas de Bragg, filtros dieléctricos de película delgada o AWG. La reconfigurabilidad es un atributo muy deseable en un OADM. La reconfigurabilidad se refiere a la capacidad de seleccionar las longitudes de onda deseadas para extraer e insertar sobre la marcha, en lugar de tener que planificar con anticipación y desplegar el equipo apropiado. Esto permite a los operadores ser flexibles al planificar su red y permite configurar y eliminar dinámicamente rutas de luz según sea necesario en la red [7].

1.2.3 Conversores de Longitudes de Onda

Un convertidor de longitud de onda es un dispositivo que convierte datos de una longitud de onda entrante a otra longitud de onda saliente diferente. Los convertidores de longitud de onda son componentes útiles en redes WDM por tres razones principales. Primero, los datos pueden ingresar a la red a una longitud de onda que no es adecuada para usar dentro de la red. En segundo lugar, los convertidores de longitud de onda pueden ser necesarios dentro de la red para mejorar la utilización de las longitudes de onda disponibles en los enlaces de red. Finalmente, los convertidores de longitud de onda pueden ser necesarios en los límites entre diferentes redes si las diferentes redes son administradas por diferentes entidades y estas entidades no coordinan la asignación de longitudes de onda en sus redes.

Los convertidores de longitud de onda se pueden clasificar en función del rango de longitudes de onda que pueden manejar en sus entradas y salidas. Un dispositivo de entrada y salida fijas siempre toma una longitud de onda de entrada fija y la convierte en una longitud de onda de salida fija. Un dispositivo de entrada variable y salida fija toma una variedad de longitudes de onda, pero siempre convierte la señal de entrada a una longitud de onda de salida fija. Finalmente, un dispositivo de entrada y salida variables puede convertir cualquier longitud de onda de entrada a cualquier longitud de onda de salida.

Además del rango de longitudes de onda en la entrada y salida, también debemos considerar el rango de potencias ópticas de entrada que el convertidor puede manejar, si el convertidor

es transparente a la velocidad de bits y al formato de modulación de las señales de entrada, y si introduce ruido adicional o *jitter* de fase a la señal. Veremos que las dos últimas características dependen del tipo de regeneración utilizada en el convertidor. Para convertidores de longitud de onda totalmente ópticos, la pérdida dependiente de la polarización también debe mantenerse al mínimo.

Hay cuatro formas fundamentales de lograr la conversión de longitud de onda: (1) optoelectrónica, (2) activación óptica, (3) interferometría y (4) mezcla de ondas. Los últimos tres enfoques son totalmente ópticos, pero aún no son lo suficientemente maduros para uso comercial. Los convertidores optoelectrónicos de hoy ofrecen un rendimiento sustancialmente mejor a menor costo que los convertidores de longitud de onda totalmente ópticos comparables [7].

1.2.4 Transmisores y receptores WDM

Para la construcción de un transmisor WDM el elemento más importante es el láser, del cual existen muchos tipos diferentes. Cuando se utiliza un láser como fuente de luz para sistemas WDM, debemos tener en cuenta las siguientes características importantes: (1) Los láseres deben producir una potencia de salida razonablemente alta. Para los sistemas WDM, las potencias de salida láser típicas están en el rango de 0-10 dBm. Los parámetros relacionados son la corriente umbral y la eficiencia de la pendiente. Ambos gobiernan la eficiencia de convertir la energía eléctrica en energía óptica. La corriente umbral es la corriente de accionamiento a la que el láser comienza a emitir potencia óptica, y la eficiencia de la pendiente es la relación entre la potencia óptica de salida y la corriente de accionamiento. (2) El láser debe tener un ancho espectral estrecho a una longitud de onda de funcionamiento específica para que la señal pueda pasar a través de filtros intermedios y se puedan colocar múltiples canales juntos. En el caso de un láser sintonizable, la longitud de onda operativa puede variar. (3) La estabilidad de la longitud de onda es un criterio importante. Cuando se mantiene a temperatura constante, las variaciones de la longitud de onda a lo largo de la vida útil del láser deben ser pequeñas en relación con el espacio de longitud de onda entre canales adyacentes. (4) Para los láseres modulados, la dispersión cromática puede ser un factor limitante importante que afecta la longitud del enlace.



Figura 1.9: Diagrama de bloques de un receptor en un sistema de comunicación digital [7].

El receptor por otra parte convierte una señal óptica en una señal eléctrica utilizable. La figura 1.9 muestra el esquema general de un receptor óptico. El fotodetector genera una corriente eléctrica proporcional a la potencia óptica incidente. El amplificador frontal aumenta la potencia de la señal eléctrica generada a un nivel utilizable. En los sistemas de comunicación digital, el amplificador frontal es seguido por un circuito de decisión que estima los datos de

la salida del amplificador frontal. El diseño de este circuito de decisión depende del esquema de modulación utilizado para transmitir los datos [7].

1.3 Problemas de rendimiento de los sistemas WDM

En la fibra óptica se presentan efectos que perjudican la transmisión de las señales, ya que degradan la calidad de la señal óptica, limitando el desempeño de las redes. Estos efectos se clasifican, de forma general, como lineales o no lineales.

1.3.1 Efectos lineales asociados a la transmisión de canales WDM

Un problema importante en el diseño de los sistemas WDM es la diafonía entre canales. El rendimiento del sistema se degrada cada vez que la diafonía conduce a la transferencia de potencia de un canal a otro. La diafonía lineal se puede clasificar en dos categorías según su origen. Los filtros ópticos y demultiplexores a menudo dejan escapar una fracción de la potencia de la señal de los canales vecinos hacia el canal que se está midiendo, lo cual hace que haya interferencia en el proceso de detección. Tal diafonía se llama diafonía o crosstalk fuera de banda lineal. Consideremos el caso en el que se usa un filtro óptico sintonizable para seleccionar un solo canal entre los N canales que inciden en él. Si el filtro óptico está configurado para pasar el canal número m , la potencia óptica que llega al fotodetector se puede escribir como: $P = P_m + \sum_{n \neq m}^N T_{mn} P_n$ donde P_m es la potencia del canal número m y T_{mn} es la transmisividad del filtro para el canal n cuando el canal m es seleccionado. La diafonía o *crosstalk* ocurre si $T_{mn} \neq 0$ para $n \neq m$. Se llama diafonía fuera de banda porque pertenece a los canales que se encuentran fuera de la banda espectral ocupada por el canal detectado. Para evaluar el impacto de dicha diafonía en el rendimiento del sistema, se debe considerar la penalización de potencia, definida como la potencia adicional requerida en el receptor para contrarrestar el efecto de la diafonía [2].

1.3.2 Efectos no lineales asociados a la transmisión de canales WDM

Uno de los principales factores para mejorar el desempeño de una red WDM es identificar los efectos no lineales asociados y los parámetros de transmisión que impactan en estos efectos, y, dependiendo de su variación, minimizar las degradaciones que estos tipos de efectos no lineales generan en el desempeño de la red. Los efectos no lineales, a diferencia de los lineales, dependen de la intensidad de la señal. La presencia de los efectos no lineales en la fibra óptica tiene dos causas principales:

- ✓ Dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo aplicado (Efecto Kerr); los efectos a través de los cuales se manifiesta son: Auto Modulación de Fase Inducida (SPM, *Self Phase Modulation*), Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*), y Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, *Four Wave Mixing*) [8].
- ✓ Para altos niveles de potencia, el fenómeno de dispersión inelástica puede inducir efectos estimulados, como Dispersión Estimulada de Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*) y Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS, *Stimulated Brillouin*

Scattering). La dispersión de la intensidad de la luz crece exponencialmente si la potencia incidente excede un cierto valor umbral.

A continuación, se describirán de manera general cada uno de estos efectos no lineales:

1.3.2.1 Self-Phase Modulation

Este fenómeno no lineal se presenta debido a que el índice de refracción de la fibra tiene una componente que depende de la intensidad de la señal; este índice de refracción no lineal induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso. Es por esto que las diferentes partes del pulso se ven sometidas a diferentes cambios de fase, lo que da lugar a que se produzca un *chirp* en el pulso, lo que también modificará los efectos de la dispersión cromática [9]. Este efecto es proporcional a la intensidad de la señal de transmisión; es por tal motivo que los efectos del SPM son más pronunciados en los sistemas que utilizan altas potencias de transmisión. El ensanchamiento del pulso generado por SPM en el dominio de la frecuencia, como consecuencia del efecto Kerr, está dado por:

$$\Delta\omega = \gamma L_{eff} \frac{dP(t)}{dt},$$

donde γ es el parámetro de no linealidad, $P(t)$ la potencia del pulso óptico, y L_{eff} la longitud efectiva de la fibra definida como: $L_{eff} = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha$, este parámetro define la distancia máxima para la cual los efectos no lineales son considerables, donde α es la atenuación de la fibra y L , la longitud del enlace. El parámetro de no linealidad combina el índice de refracción no lineal y la longitud efectiva en un solo coeficiente, y está dado por:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda L_{eff}},$$

Donde n_2 es el índice de refracción no lineal y λ la longitud de onda. SPM modifica los efectos de la dispersión cromática, por lo tanto, es importante considerarlo para sistemas con alta tasa de transmisión de bits (sistemas operando a 10 Gb/s o más, o sistemas operando a velocidades más bajas, pero con potencias de transmisión elevadas), ya que estos tienen unas limitaciones significativas debido a la dispersión cromática.

En particular, si un canal WDM es transmitido a alta potencia, los pulsos ópticos transmitidos por este canal se ensanchan no solamente por la dispersión cromática de la fibra, sino también por causa de la propia intensidad del canal debido al efecto no lineal SPM. SPM modifica los efectos de la dispersión cromática, por lo tanto, es importante considerarlo para sistemas con alta tasa de transmisión de bits (sistemas operando a 10 Gb/s o más, o sistemas operando a velocidades más bajas, pero con potencias de transmisión elevadas), ya que estos tienen unas limitaciones significativas debido a la dispersión cromática [8].

1.3.2.2 Cross-Phase Modulation

Cuando dos o más canales WDM que tienen diferentes longitudes de onda se propagan simultáneamente en una fibra óptica, interactúan entre sí a través de la no linealidad XPM de

la fibra. XPM se genera cuando dos o más canales ópticos son transmitidos simultáneamente a través de la fibra óptica. En particular, el índice de refracción efectivo para una onda incidente no solo depende de la intensidad de esa misma onda, sino también de la intensidad de cualquier otra onda que se co-propague junto a ese canal. Debido a que la fase de los canales WDM vecinos son afectados, los pulsos que se propagan en esos canales WDM también se ensanchan considerablemente no solo por causa de su propia intensidad, sino también por causa de la intensidad de luz de los canales vecinos [10]. Cuando dos o más señales se propagan simultáneamente, el impacto de XPM es mayor a SPM.

1.3.2.3 Four-Wave Mixing

Cuando dos o más señales ópticas de frecuencias centrales diferentes (diferentes canales WDM) se propagan en una fibra, se puede dar una mezcla de señales que puede generar nuevas componentes de interferencia de la señal óptica; esto debido a la dependencia del índice de refracción de la fibra con la potencia de la señal, lo que causa un medio no lineal de propagación y crea las condiciones para la mezcla de la señal. Para que el fenómeno FWM ocurra es necesaria la condición de *phase-matching*. El efecto FWM depende de la potencia de la señal, dispersión y del espaciado de los canales WDM. FWM se convierte en una fuente importante de diafonía no lineal ya que genera una transferencia de potencia entre los canales WDM el cual se maximiza siempre que el espacio entre canales WDM y la dispersión de la fibra sean lo suficientemente pequeños como para satisfacer la condición de *phase matching* o coincidencia de fase.

El origen físico de la diafonía inducida por FWM y la degradación del sistema resultante se puede entender al observar que FWM genera una nueva onda a la frecuencia $\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k$, cada vez que tres ondas en las frecuencias ω_i , ω_j y ω_k se propagan dentro de una fibra óptica. Para un sistema de N canales, i, j y k pueden variar de 1 a N, lo que resulta en una gran combinación de nuevas frecuencias generadas por FWM. En el caso de canales igualmente espaciados, las nuevas frecuencias coinciden con las frecuencias existentes, lo que lleva a una diafonía coherente. Para un sistema de N canales, i, j y k pueden variar de 1 a N, lo que resulta en una gran combinación de nuevas frecuencias generadas por FWM [2].

En el caso de canales igualmente espaciados, las nuevas frecuencias coinciden con las frecuencias existentes, lo que lleva a una diafonía coherente. Cuando los canales no están igualmente espaciados, la mayoría de los componentes de FWM caen entre los canales y conducen a una diafonía incoherente. En ambos casos, el rendimiento del sistema se degrada debido a una pérdida en la potencia del canal, pero la diafonía coherente degrada el rendimiento del sistema mucho más severamente.

Podemos observar de la figura 1.10 que los canales centrales C1, C2, y C3 con frecuencias f_1 , f_2 y f_3 respectivamente se mezclan para generar nuevos canales C4, C5, C6 y C7. Por ejemplo, el canal C4 se originó con la mezcla de las frecuencias de los canales C2, C3 y C1 formando la nueva frecuencia $f_4 = f_{321} = f_3 + f_2 - f_1$, o bien $f_4 = f_{332} = f_3 + f_3 - f_2$, en este caso, se observa que diferentes combinaciones de 3 canales pueden dar origen al canal C4. Por otro lado, en el caso de canales WDM igualmente espaciados, las nuevas frecuencias coinciden

con las frecuencias existentes, lo que conduce a un *crosstalk*. Cuando los canales no están igualmente espaciados, la mayoría de las componentes de FWM caen entre los canales originales y conducen a una reducción del *crosstalk*, pero no lo evita. En ambos casos el rendimiento del sistema se degrada.

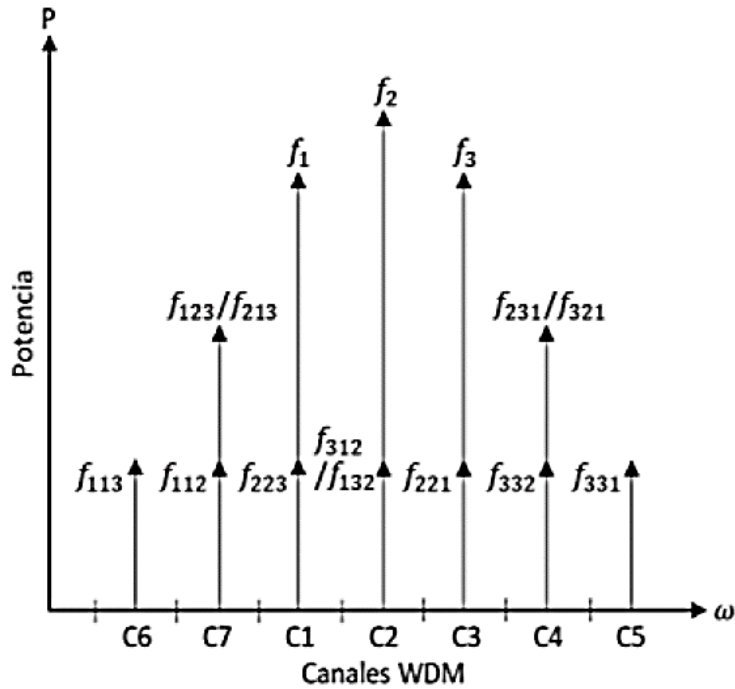


Figura 1.10: Efecto del Mezclado de Cuatro Ondas [8].

Otro efecto perjudicial que trae acarreado el FWM es la desecualización de los canales originales a lo largo del medio óptico. En la figura 1.10 se puede observar como la potencia del canal C2 es mayor que la de los canales laterales originales C1 y C3, este también es una consecuencia del fenómeno no lineal de mezclado de cuatro ondas.

Un esquema simple para reducir la degradación inducida por FWM consiste en diseñar sistemas WDM con espaciamientos de canal desiguales, donde el principal impacto de FWM en este caso es que reduce la potencia del canal. La importancia de FWM radica en que no sólo se generan señales indeseadas en bandas adyacentes a las señales que transportan la información, sino que las señales en las bandas laterales contendrán información de amplitud y fase de las señales originales, convirtiendo este proceso en una importante fuente de ruido en sistemas de comunicación WDM.

1.3.2.4 Stimulated Raman Scattering

La dispersión espontánea de Raman ocurre en las fibras ópticas cuando una onda denominada de bombeo es dispersada por las moléculas de sílice. Algunos fotones de la fuente de bombeo abandonan su energía para crear otros fotones de energía reducida a una frecuencia más baja;

La energía restante es absorbida por las moléculas de sílice, que terminan en un estado vibratorio excitado.

Un aspecto de este tipo de dispersión no lineal es que los niveles de energía vibracional de sílice determinan el valor del cambio Raman: $\Omega_R = \omega_p - \omega_s$. Como una onda acústica no está involucrada, la dispersión espontánea de Raman es un proceso isotrópico. El proceso de dispersión Raman se estimula si la potencia del bombeo excede un valor umbral. SRS puede ocurrir tanto en la dirección hacia adelante como hacia atrás en fibras ópticas.

Desde una perspectiva práctica, la luz incidente actúa como un bombeo y genera la radiación desplazada en frecuencia, la llamada onda de Stokes, que sirve como herramienta espectroscópica. Para campos de bombeo intensos, puede ocurrir el fenómeno no lineal de SRS en el que la onda de Stokes crece rápidamente dentro del medio de tal manera que la mayor parte de la energía del bombeo se transfiere a él [10].

La dispersión estimulada de Raman (SRS) es un proceso no lineal importante que puede convertir las fibras ópticas en amplificadores Raman de banda ancha y láseres Raman sintonizables. También puede limitar severamente el rendimiento de los sistemas WDM al transferir energía de un canal a los canales vecinos que poseen una longitud de onda más grande, tal como se observa en la figura 1.11.

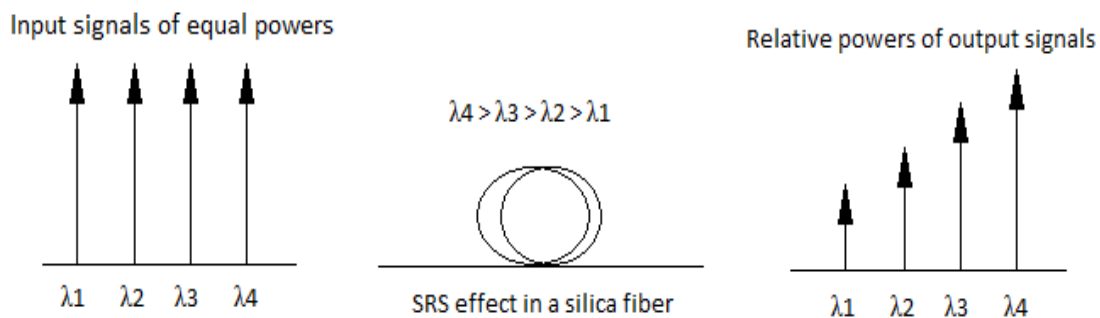


Figura 1.11: Efectos de la Dispersión Estimulada de Raman sobre canales WDM.

1.3.2.5 Stimulated Brillouin Scattering

La dispersión estimulada de Brillouin es un efecto no lineal que puede ocurrir a menores niveles de potencia de entrada que los necesarios para que se presente la dispersión estimulada de Raman. Ese efecto no lineal, al igual que la SRS, se presenta por la generación de una onda llamada onda de Stokes, que se propaga en dirección opuesta a la dirección de propagación de la onda incidente y tiene una frecuencia menor a la de la luz incidente [10].

La onda de Stokes se propaga hacia atrás cuando SBS ocurre en una fibra óptica monomodo, en contraste con SRS que puede ocurrir en ambas direcciones. Debido a la SBS se presenta un cambio en frecuencia de la onda de Stokes de 11 GHz, aproximadamente, el cual es más pequeño por tres órdenes de magnitud, comparado con el cambio en frecuencia que genera SRS, que es, de aproximadamente 13 THz. La dispersión estimulada de Brillouin (SBS)

también puede transferir energía de un canal de alta frecuencia a uno de baja frecuencia cuando la separación entre canales es igual al desplazamiento de frecuencia de Brillouin. Sin embargo, en contraste con el caso de SRS, dicha transferencia de energía se evita fácilmente con el diseño adecuado de los sistemas de comunicación multicanal. La razón es que el ancho de banda de ganancia de Brillouin es extremadamente estrecho (~ 20 MHz) en comparación con el ancho de banda de ganancia de Raman (~ 5 THz). Por lo tanto, el espacio entre canales debe coincidir casi exactamente con el desplazamiento de Brillouin (aproximadamente 10 GHz en la región de $1,55 \mu\text{m}$) para que ocurra SBS; tal coincidencia exacta se evita fácilmente.

Aunque SBS no induce la diafonía entre canales cuando todos los canales se propagan en la dirección hacia adelante, sí limita las potencias del canal. La razón es que una parte de la potencia del canal se puede transferir a una onda de Stokes de propagación hacia atrás generada por el ruido cuando se cumple la condición de umbral.

Capítulo II: “Delta Metropolitana”

La Red Delta Metropolitana consiste en la infraestructura de fibra óptica instalada en el año 2010 que mantiene interconectados a los centros de súper cómputo de las Instituciones Educativas Públicas más importantes de la Ciudad de México; la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) y la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I).

Para disminuir los costos de despliegue de fibra, la interconexión de las instituciones antes mencionadas se realizó a través de los túneles que forman parte del Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC), o sistema de metro de la Ciudad de México. Afortunadamente, las tres instituciones están ubicadas cerca de una estación STC, pero aún se requiere una conexión de última milla [11].

En particular, la red de fibra Delta Metropolitana servirá como medio de transmisión óptico para analizar la propagación de canales WDM a estudiar en este trabajo. Estos canales al propagarse a través de la Delta podrían degradarse por efectos no lineales presentes en la fibra. A continuación, se describen la topología de la red Delta Metropolitana y un estudio de las atenuaciones que se presentan a lo largo de esta red causadas por curvaturas, empalmes y conectores mecánicos.

2.1 Topología de la red de transporte por fibra óptica

La capacidad de la Delta Metropolitana es de 72 hilos de fibra óptica, que están instalados en los túneles del Sistema de Transporte Colectivo (STC) metro de la Ciudad de México. La fibra óptica está instalada a lo largo de las líneas 3, 4, 5, 8 y 9 del STC. Cada una de las instituciones antes mencionadas tiene instalados dos paneles de distribución de fibra óptica con el objetivo de que cada una se mantenga comunicada con las otras dos. De esta manera la infraestructura instalada tiene forma de “delta”, de ahí el nombre que recibe.



Figura 2.1: Panel de distribución de Fibra Óptica.

El tipo de fibra óptica instalada en la Delta Metropolitana es la SMF 28. La tabla I muestra los parámetros principales de las fibras ópticas que pertenecen a este estándar [12].

Tabla I - UIT-T G.652.D atributos.

Fibre attributes			
Attribute	Detail	Value	Unit
Mode field diameter	Wavelength	1310	nm
	Range of nominal values	8.6-9.2	μm
	Tolerance	± 0.4	μm
Cladding diameter	Nominal	125.0	μm
	Tolerance	± 0.7	μm
Core concentricity error	Maximum	0.6	μm
Cladding noncircularity	Maximum	1.0	%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260	nm
Macrobending loss	Radius	30	mm
	Number of turns	100	
	Maximum at 1625 nm	0.1	dB
Proof stress	Minimum	0.69	GPa
Chromatic dispersion parameter	$\lambda_{0\text{min}}$	1300	nm
	$\lambda_{0\text{max}}$	1324	nm
3-term Sellmeier fitting (1260 nm to 1460 nm)	$S_{0\text{min}}$	0.073	$\text{ps}/(\text{nm}^2 \times \text{km})$
	$S_{0\text{max}}$	0.092	$\text{ps}/(\text{nm}^2 \times \text{km})$
Linear fitting (1460 nm to 1625 nm)	Minimum at 1550 nm	13.3	$\text{ps}/(\text{nm} \times \text{km})$
	Maximum at 1550 nm	18.6	$\text{ps}/(\text{nm} \times \text{km})$
	Minimum at 1625 nm	17.2	$\text{ps}/(\text{nm} \times \text{km})$
	Maximum at 1625 nm	23.7	$\text{ps}/(\text{nm} \times \text{km})$
Cable attributes			
Attribute	Detail	Value	Unit
Attenuation coefficient (Note 1)	Maximum from 1310 nm to 1625 nm (Note 2)	0.40	dB/km
	Maximum at 1383 nm ± 3 nm after hydrogen ageing (Note 3)	0.40	dB/km
	Maximum at 1530-1565 nm	0.30	dB/km
PMD coefficient (Note 4,5)	M	20	cables
	Q	0.01	%
	Maximum PMD _Q	0.20	$\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$

A partir de la información obtenida sobre la instalación de la infraestructura para esta red, se sabe la distancia aproximada de cada enlace, así como el número de empalmes requeridos en cada uno, información que se proporciona a continuación. La figura 2.2 muestra un mapa con el despliegue de la Red Delta Metropolitana a través de los túneles del STC.



Figura 2.2: Mapa Delta Metropolitana y su distribución en el STC [13].

2.1.1 Enlace Sur-Norte de la Ciudad de México (UNAM- CINVESTAV)

La instalación de este enlace va a través de las estaciones Universidad, Copilco, Miguel Ángel de Quevedo, Viveros, Coyoacán, Zapata, División del Norte, Eugenia, Etiopia, Centro Médico, Hospital General, Niños Héroes, Balderas, Juárez, Hidalgo, Guerrero, Tlatelolco y La Raza de la línea 3, y Autobuses del Norte, Instituto del Petróleo y Politécnico de la línea 5 del STC.

El fragmento de última milla entre el CINVESTAV a la estación Politécnico tiene una distancia total de 4.6 km y sigue la ruta que se muestra en la figura 2.3.

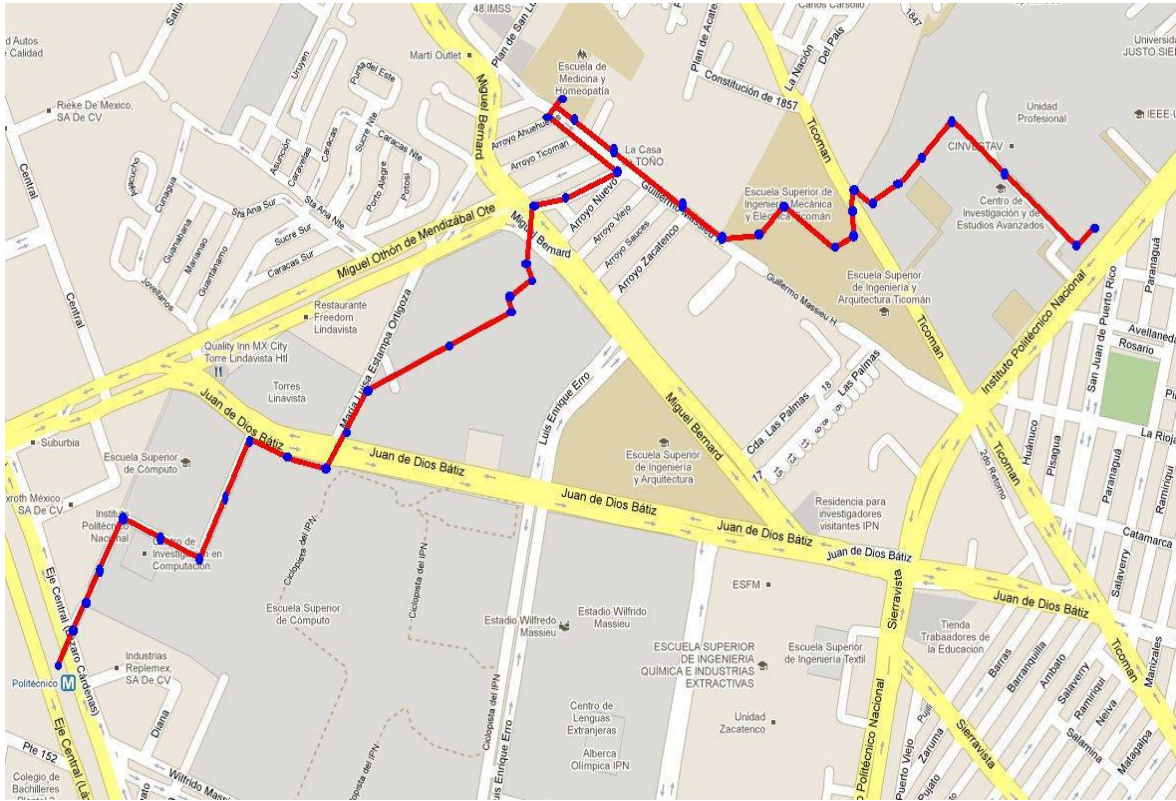


Figura 2.3: Mapa última milla CINEVESTAV- Estación Politécnico [13].

Tabla II- Distancia parcial de enlace UNAM-CINEVESTAV [14].

	Distancia (sin tramos de última milla) [km]	Número de empalmes por fusión
UNAM-CINEVESTAV	27.544	20

2.1.2 Enlace Norte-Oriente de la Ciudad de México (CINEVESTAV-UAMI)

La instalación de este enlace va a través de las estaciones Politécnico, Instituto del Petróleo, Autobuses del Norte, La raza, Misterios, Valle de Gómez y Consulado de la línea 5, Canal del Norte, Morelos, Candelaria, Fray Servando, Jamaica, Santa Anita, de la línea 4, y Coyuya, Iztacalco, Apatlaco, Aculco, Escuadrón 201, Atlalilco, Iztapalapa, Cerro de la Estrella y UAM-I de la línea 8 del STC.

El tramo de última milla que va de UAM-I a la estación de metro UAM-I tiene una longitud total aproximada de 1.2 Km y sigue la trayectoria de la figura 2.4.

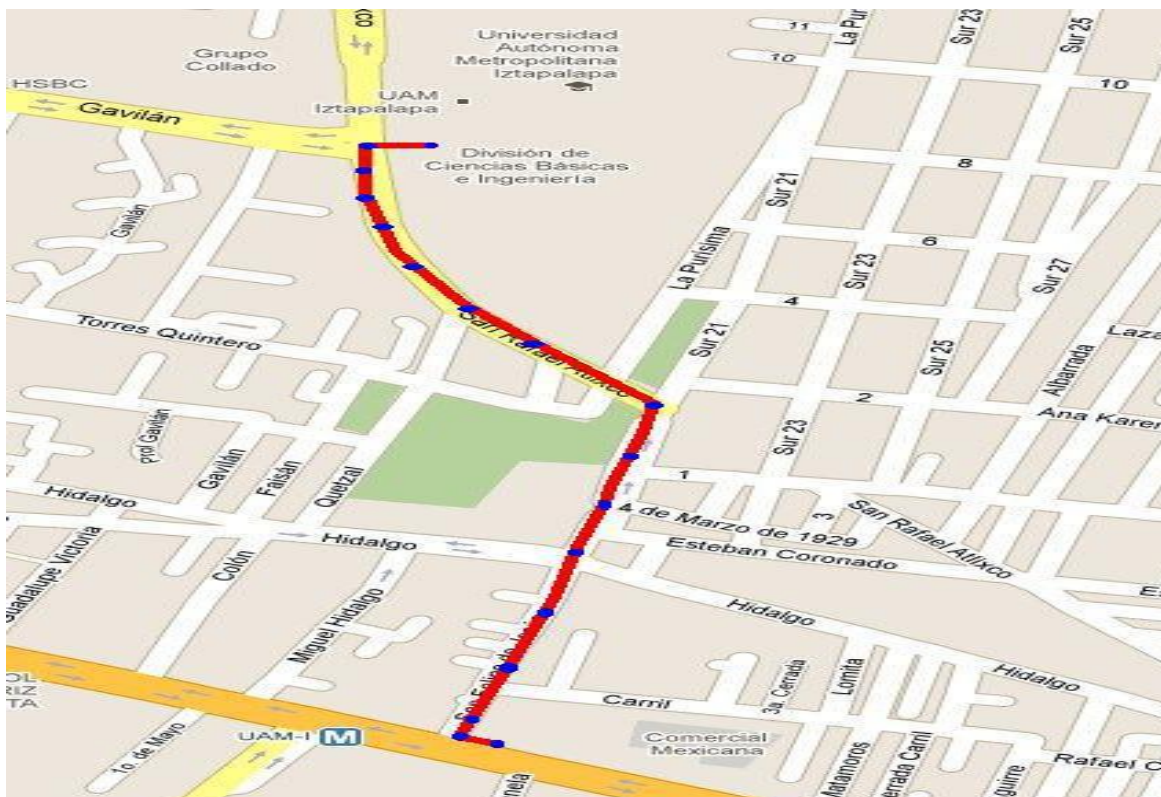


Figura 2.4: Mapa última milla UAM-I - Estación UAM-I [13].

Tabla III- Distancia parcial de enlace CINVESTAV – UAM-I [14].

	Distancia (sin tramos de última milla) [km]	Número de empalmes por fusión
CINVESTAV- UAM-I	31.588	20

2.1.3 Enlace Oriente-Sur de la Ciudad de México (UAMI-UNAM)

La instalación de este enlace va a través de las estaciones UAM-I, Cerro de la Estrella, Iztapalapa, Atlalilco, Escuadrón 201, Apatlaco, Aculco, Apatlaco, Iztacalco, Coyuya, Santa Anita, La Viga y Chabacano de la línea 8, Lázaro Cárdenas y Centro Médico de la línea 9, y Etiopía, Eugenia, División del Norte, Zapata, Coyoacán, Viveros, Miguel Ángel de Quevedo, Copilco y Universidad de la línea 3 del STC.

El tramo de última milla que va del edificio de la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación (DGTIC, localizado dentro de Ciudad Universitaria) a Metro Universidad tiene una longitud total aproximada de 1.3 Km y sigue la trayectoria de la Figura 2.5.

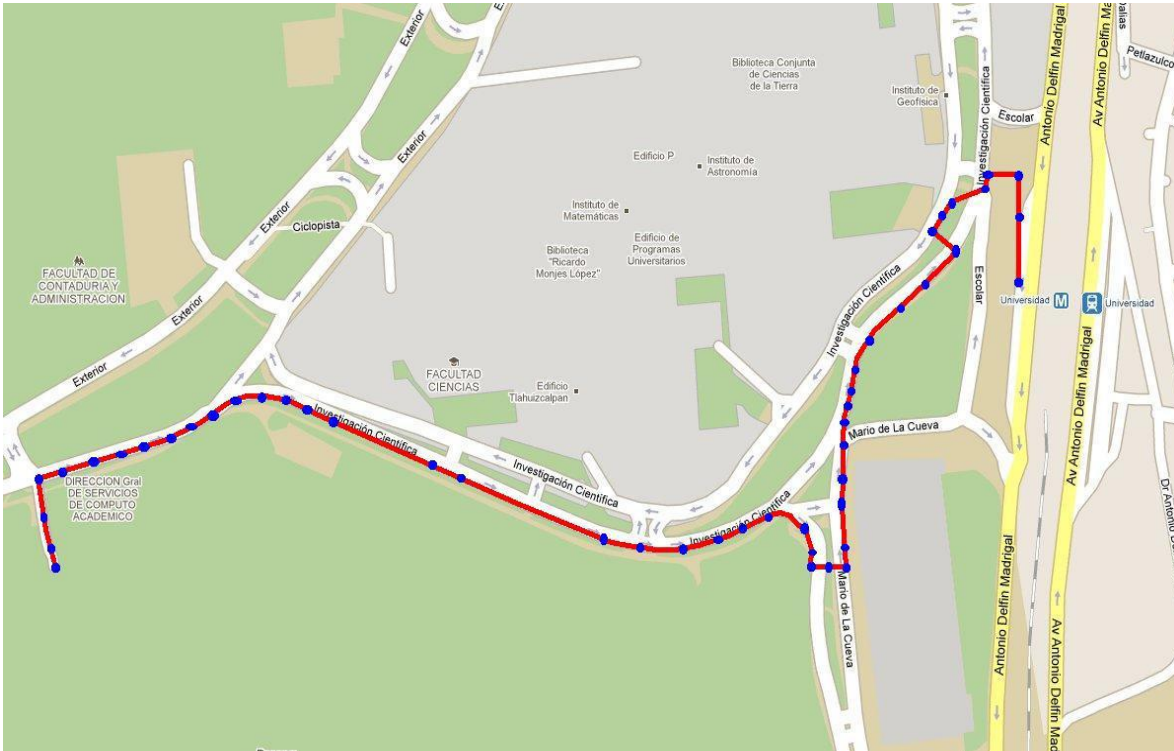


Figura 2.5: Mapa última milla DGTIC - Estación Universidad [13]

Tabla IV- Distancia parcial de enlace UAM-I - UNAM [14].

	Distancia (sin tramos de última milla) [km]	Número de empalmes por fusión
UAM-I - UNAM	31.588	20

2.2 Conexiones físicas para la ruta de monitoreo

Para lograr el monitoreo de las atenuaciones que presenta la “Red Delta Metropolitana” por completo, se tuvieron que realizar conexiones adicionales entre los paneles de distribución de cada una de las Instituciones. En particular de los 72 hilos de fibra óptica con que consta la red Delta, solo se consideraron estudiar los hilos 69, 71 y 72.

La figura 2.6 muestra un diagrama de las conexiones realizadas en los paneles de cada institución para realizar el monitoreo de los hilos 69, 71 y 72. En particular, el hilo 71 es el que se escogió para realizar nuestro análisis debido a que es el que presenta menos atenuaciones tal como se mostrará más adelante.

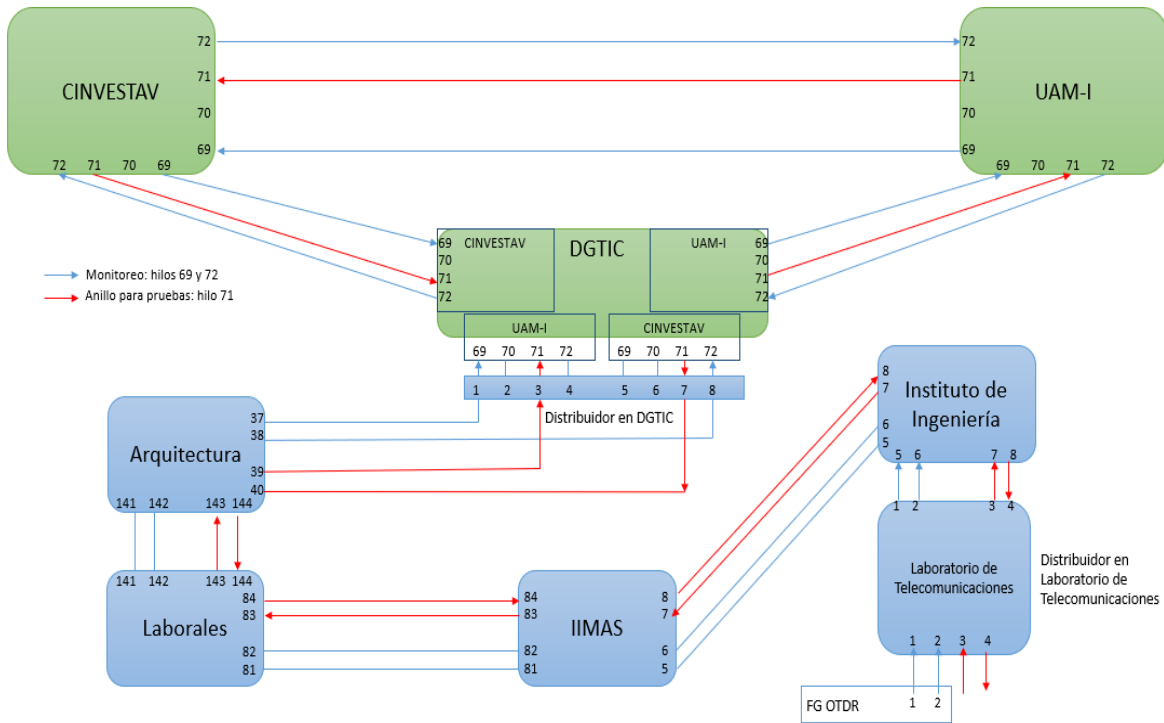


Figura 2.6: Diagrama de conexiones para monitoreo de la Delta Metropolitana.

2.3 Caracterización de atenuación del enlace

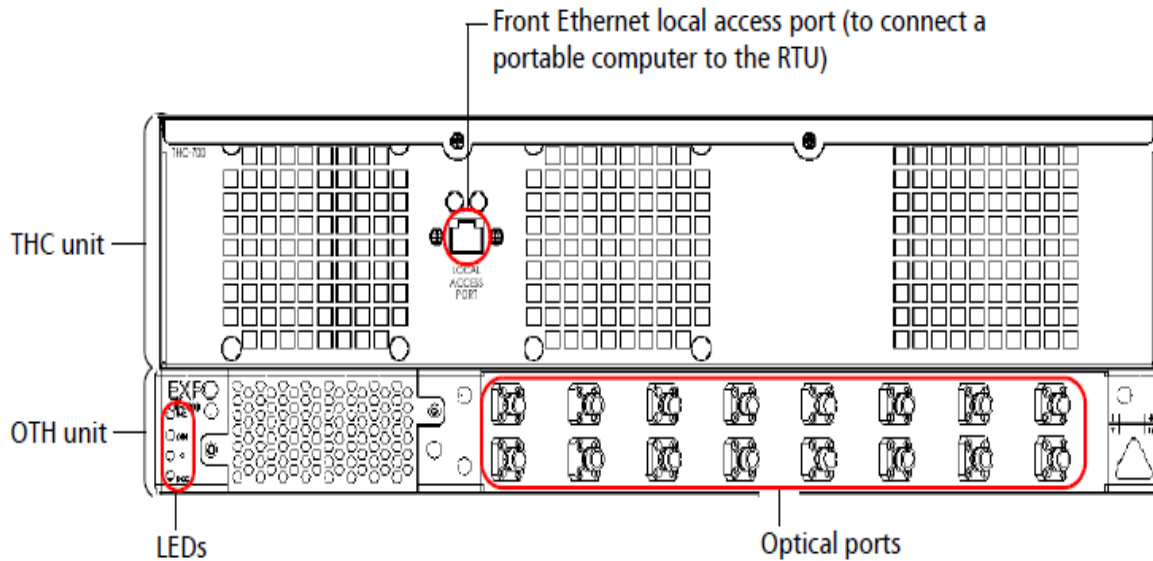
Las mediciones de atenuación sobre la “Delta Metropolitana” se realizaron utilizando el OTDR RTU-720 que se encuentra situado en el Laboratorio de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería. El RTU – 720 es una unidad de pruebas remotas independiente, que permite administrar una red de fibra óptica. El equipo OTDR nos permite medir las atenuaciones que puede tener toda la longitud de la fibra por empalmes mal hechos a lo largo de la fibra, o atenuaciones causadas por conectores mecánicos y curvaturas.

Respecto al hardware, el OTDR-RTU está compuesto por dos unidades: THC (Test head controller) y OTH (Optical test head.) como se muestra en la figura 2.7. La unidad THC es la que tiene el control del sistema, tiene un puerto Ethernet para acceso local en el panel frontal y puertos en el panel posterior para conectar a la unidad OTH, LAN, línea telefónica y un conmutador óptico externo opcional. La unidad OTH contiene el módulo de OTDR y un conmutador óptico. En este caso el OTH cuenta con 16 puertos disponibles, lo que significa que se pueden conectar 16 hilos de fibra óptica y monitorearlos todos consecutivamente. Tiene cuatro LEDs en el panel frontal los cuales supervisan el estado del THC, OTH, el láser de OTDR y la comunicación con el servidor EMS (Enterprise Management Server), este último no se utiliza para las unidades autónomas [15].

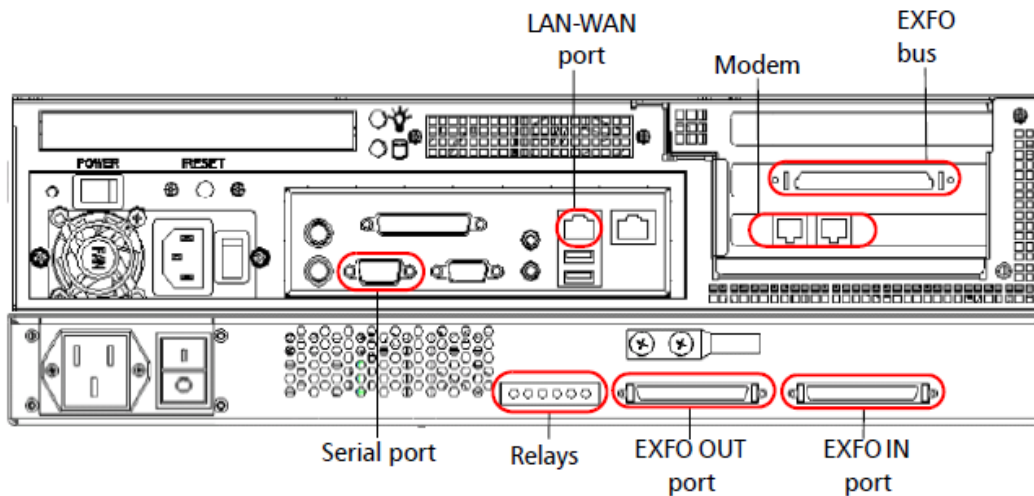
Después de la instalación física del equipo, acceder al sistema para poder configurarlo vía web se puede hacer de dos formas distintas:

1. A través del puerto de acceso local mediante el uso de un ordenador portátil.

2. Remotamente mediante la conexión a una red LAN/WAN. El equipo con el que se planea acceder remotamente debe estar conectado a la misma red, se accede a la interfaz del equipo utilizando cualquier navegador Web, introduciendo en la barra de búsqueda la dirección IP asignada al RTU.



a)



b)

Figura 2.7: RTU- 720. a) Panel frontal. b) Panel trasero [15].

La función del RTU es mantener un monitoreo constante sobre los hilos de fibra óptica del enlace que estén conectados al OTH, realizará pruebas a nivel capa física constantemente mediante un módulo de OTDR, las cuales serán comparadas con un trazo de referencia. Las características principales de este dispositivo se encuentran en la Tabla V.

Tabla V – RTU -720 principales características.

Módulo OTDR	Core
Tipo de fibra óptica	Monomodo
Longitud de onda (nm)	1550/1625
Rango dinámico	45/45

El RTU cuenta con tres tipos diferentes de prueba programables [16]:

1. Monitoreo. Esta prueba se programa para vigilar de manera constante el enlace, las 24 horas del día los 7 días de la semana, principalmente para detectar cortes de fibra o degradación de la potencia que pueda afectar drásticamente la calidad de servicio. La configuración automática de esta prueba tiene un tiempo de duración de 15 segundos por puerto, sin embargo, este valor puede ser modificado. Los resultados de estas pruebas solo se almacenarán si contienen información de falla o evento.

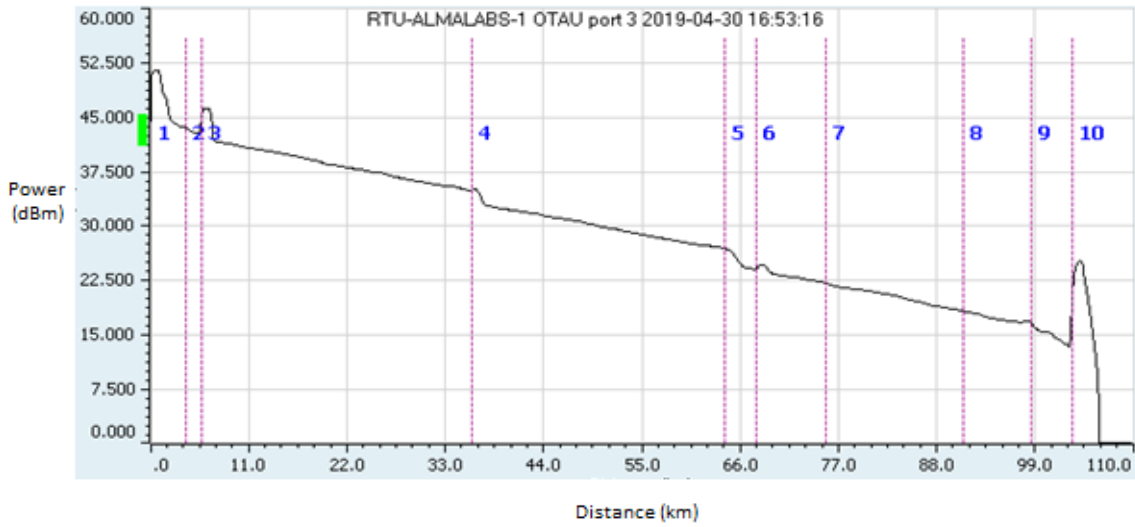
2. Mantenimiento Proactivo. Prueba que se puede realizar diaria o semanalmente en una ruta específica para poder detectar degradaciones que no afectan la calidad de servicio. Esta prueba detecta fallas y alertas cuando el nivel de degradación está por encima de un conjunto de umbrales de detección de fallos. El tiempo de prueba automático es de 45 segundos y puede ser modificado. Este tipo de prueba se recomienda principalmente para realizar un análisis a largo plazo de la red, es decir, construir resultados de tendencias históricas. Los resultados de estas pruebas siempre se almacenan.

3. Prueba bajo demanda. Este tipo de prueba se realiza para verificar el correcto funcionamiento de la red cuando sea necesario. Está prueba a diferencia de las dos anteriores no se crea automáticamente, el usuario administrador es quien debe programarla.

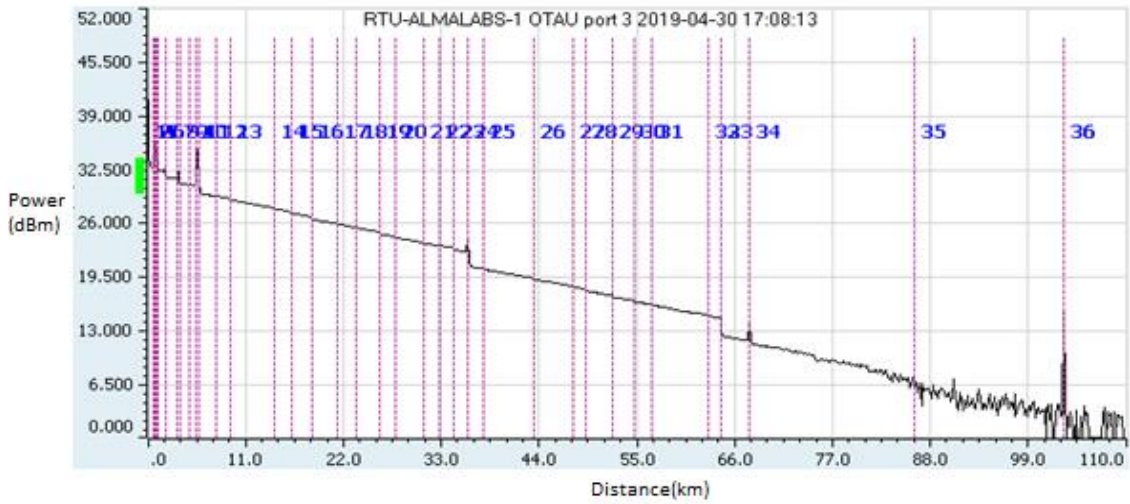
Para la obtención de datos sobre la atenuación de la fibra en la “Delta Metropolitana” en el hilo 71 se realizaron mediciones del tipo prueba bajo demanda, donde se configuraron los parámetros siguientes en el RTU:

- Longitud de onda: 1550 nm
- Resolución: Normal
- Rango: 110 km
- Duración de prueba: 120 s

Se realizaron varias mediciones variando el ancho del pulso, con el objetivo de tener un acercamiento al comportamiento del hilo 71 de la delta en una primera instancia y ya luego de una traza más detallada con mayor resolución. Los resultados de la medición, utilizando un ancho del pulso de 10 μ s y luego un ancho del pulso de 1 μ s se muestran en la figura 2.8. La Tabla VI contiene los datos principales del medio de transmisión óptico en cuestión.



a)



b)

Figura 2.8: Traza OTDR Fibra 71 Delta Metropolitana. a) Longitud de onda 1550nm y ancho del pulso 10 μ s. b) Longitud de onda 1550nm y ancho del pulso 1 μ s.

Tabla VI: Atenuación y nivel de potencia óptica con respecto a la distancia, hilo 71 Delta Metropolitana.

Evento	Tipo	Posición Inicial (m)	Longitud (m)	Potencia óptica (dBm)	Pérdida Actual (dB)	Pérdida Total (dB)
1	3	0	3042.2309	44.46568974		0
	0	0	3899.77249		0.695402323	0.695402323
2	2	3899.77249	1383.29626	43.77028741	0.709009316	1.404411639

	0	3899.77249	1791.6494		0.322341558	1.726753197
3	3	5691.421894	1607.89049	42.85947704	0.763380041	2.36959274
	0	5691.421894	30335.5339		7.337952101	9.707544841
4	3	36026.95581	1623.20373	34.96422753	1.824383339	11.32584555
	0	36026.95581	28237.6197		6.485050538	17.81089608
5	2	64264.57547	1939.67742	26.97854397	2.054565828	19.5417116
	0	64264.57547	3527.15025		0.834252506	20.3759641
6	3	67791.72572	2501.16298	24.03253184	0.115552577	20.54871047
	0	67791.72572	7794.44057		1.599430822	22.14814129
7	2	75586.16628	1250.58149	22.22188674	0.317819277	22.56162227
	0	75586.16628	15374.4957		3.859125134	26.42074741
8	2	90960.66202	2787.01018	18.29103239	0.487028121	26.66168547
	0	90960.66202	7559.63751		0.929316282	27.59100175
9	2	98520.29953	3409.74872	16.69620558	1.600984233	29.37046839
	0	98520.29953	4593.97283		1.686771837	31.05724022
10	3	103114.2724	3159.63242	13.22470051		31.24098923

Se puede comprobar gráficamente y a través de los resultados de la tabla VI que la longitud total del enlace del hilo 71 de la Delta Metropolitana es aproximadamente 103 km, la pérdida total asociada por atenuaciones es de 31.24 dB y existe un empalme de fusión crítico a 64.26 Km con pérdida de 2.05 dB.

2.4 Caracterización de la dispersión cromática del enlace

La dispersión cromática es la variación en la velocidad de propagación de la luz en un medio (fibra óptica) en función de su longitud de onda. Esta diferencia en la velocidad de propagación da como resultado un ensanchamiento de los pulsos de luz a medida que viajan a través de una fibra, provocando interferencia entre símbolos, incrementando el BER y reduciendo el ancho de banda de la fibra. La dispersión cromática en una fibra monomodo es el resultado de la combinación de la dispersión intrínseca del material de la fibra y de la geometría de la fibra como guía de onda.

La medición de dispersión cromática se realizó utilizando un analizador de dispersión cromática FTB-5800 como el que se muestra en la figura 2.9. El método de medición que emplea este dispositivo es “Corrimiento de fase” [17]. La tabla VII refleja los resultados de la medición para longitudes de onda cercanas a los 1550 nm.

Tabla VII. Dispersión cromática en ps/nm*km para longitudes de ondas cercanas a los 1550 nm, fibra óptica 71 “Delta Metropolitana” [18].

Longitud de Onda (nm)	Coefficiente de Dispersión Cromática (ps/nm*km)	Dispersión Cromática Total (ps/nm)
1530	15.421	1588.358
1540	16.018	1649.876
1550	16.606	1710.414
1560	17.184	1770.003

1570	17.754	1828.491
------	--------	----------



Figura 2.9: Módulo Analizador de Dispersión Cromática FTB-5800 [19].

Como observaciones generales de la medición de dispersión cromática del hilo de fibra óptica número 71 de la “Delta Metropolitana” se pueden añadir las siguientes observaciones: los valores de dispersión cromática son los esperados y son valores aproximados a las especificaciones del fabricante y en caso de que se necesiten hacer empalmes, solo se modificará la atenuación del propio empalme, sin afectar las mediciones de dispersión cromática.

Capítulo III: “Descripción de la fuente WDM”

La multiplexación por división de onda involucra señales luminosas transmitidas a través de canales de fibra óptica. En el siguiente capítulo se hace una descripción de la fuente láser que se utilizó para generar señales a diferentes longitudes de onda. Se hace una caracterización del multiplexor óptico utilizado para mezclar las señales en una sola fibra y se aborda el proceso de ecualización y sintonización de la fuente láser utilizando un analizador de espectros óptico (OSA).

3.1 Caracterización de la fuente láser comercial DFB-4-B-20S

El Optilab DFB-4-B-20-S (figura 3.1) es una fuente láser de Retroalimentación Distribuida (DFB) en una unidad de mesa diseñada para aplicaciones generales de laboratorio y es una fuente láser DFB confiable y rentable para proporcionar hasta 4 longitudes de onda DFB. La temperatura de funcionamiento del láser DFB y la corriente de accionamiento se controlan con precisión mediante un microcontrolador para garantizar una potencia de salida constante y una estabilidad de la longitud de onda de emisión. Utilizando su intuitiva pantalla LCD táctil o una interfaz USB opcional, el usuario puede controlar el nivel de potencia de salida del DFB ajustando la corriente de accionamiento del láser y la longitud de onda de emisión [20].



Figura 3.1: Fuente láser DFB4-B-20S.

Esta fuente WDM posee 4 canales caracterizados en la Tabla VIII. Para la investigación se utilizaron los canales 2,3,4 que se encuentran en la banda C y son los canales 38, 36 y 34 de la ITU.

Tabla VIII: Rendimiento Óptico de la fuente DFB-4-B-20S [21].

No. Canal	Temperatura Láser (C ⁰)	Corriente de ajuste (mA)	Potencia de Salida (mW)	Longitud de Onda Central (nm)
1	5.0	110	20.14	1309.77
2	20.3	190	21.93	1550.10
3	21.2	175	20.04	1548.50
4	13.6	160	20.51	1546.90

3.2 Descripción del multiplexor óptico

Los canales ópticos a la salida de la fuente se encuentran aislados por lo que para introducirlos en la fibra necesitan ser multiplexados, para esto se utilizó un Mux/Demux de 8 canales mostrado en la figura 3.2. Este módulo WDM posee un espaciado entre canales de 200GHz y se pueden utilizar para combinar o separar canales de longitud de onda en una cuadrícula de ITU estándar. El módulo adquirido en el Laboratorio de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM contiene los canales 38, 36 y 34 de la ITU que concuerdan con las longitudes de ondas de salida de la fuente láser para poder realizar correctamente la multiplexación por longitud de onda de las señales.



Figura 3.2: Mux/Demux óptico DWDM 200GHz 8 canales.

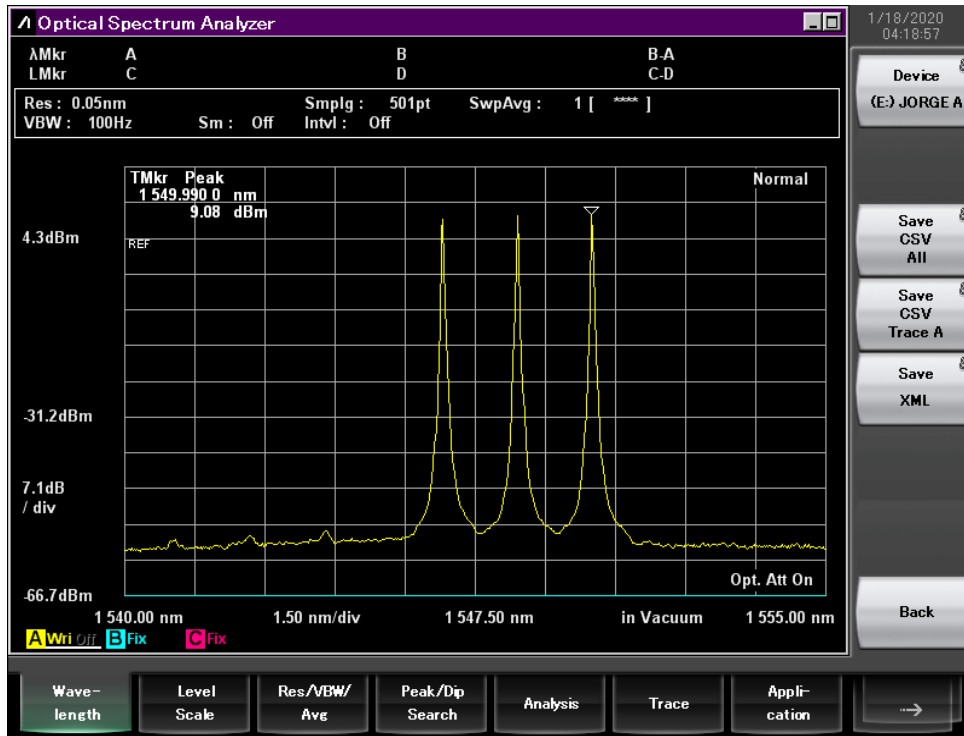
En la Tabla IX se muestran las características del multiplexor óptico.

Tabla IX. DWDM Module – 200GHz 8 Channels, Demux Module [22].

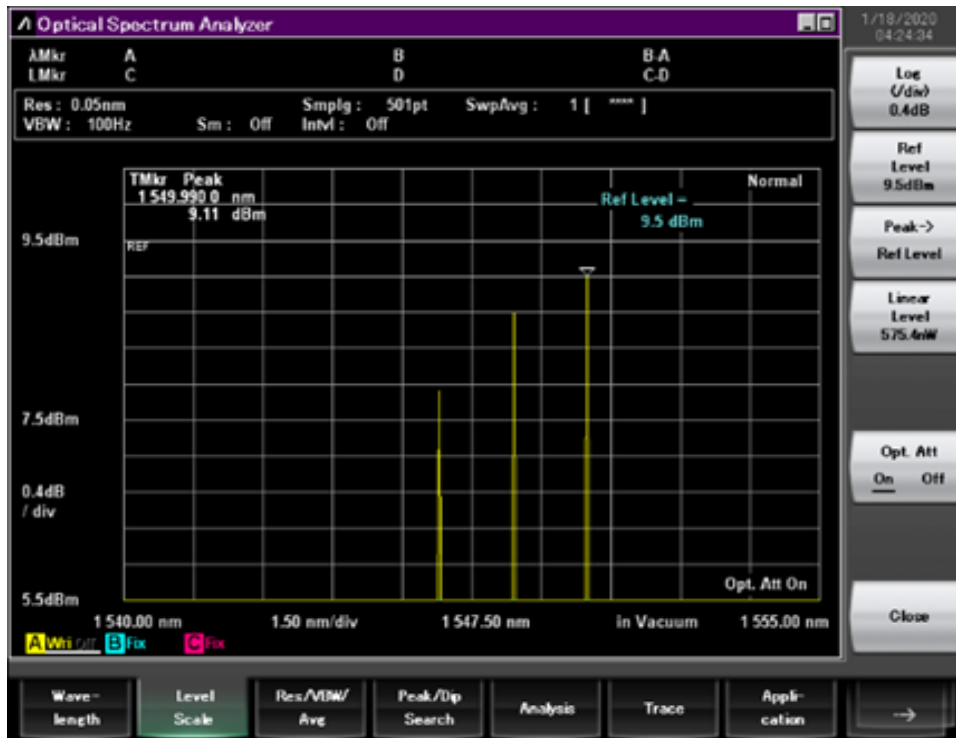
Parameters	Data
Channel Spacing (GHz)	200
Channel Numbers	26/28/30/32/34/36//38/40
Insertion Loss (dB), COM to Ch26	1.85
Insertion Loss (dB), COM to Ch28	1.74
Insertion Loss (dB), COM to Ch30	1.62
Insertion Loss (dB), COM to Ch32	1.53
Insertion Loss (dB), COM to Ch34	1.24
Insertion Loss (dB), COM to Ch36	0.93
Insertion Loss (dB), COM to Ch38	0.89
Insertion Loss (dB), COM to Ch40	0.66
Channel Passband (-0.5dB Bandwidth) (nm)	>0.5
Channel Ripple (dB)	<0.5
PDL (dB)	<0.2
Isolation (dB) Adjacent Channel	>30
Isolation (dB) Non-Adjacent Channel	>40
Directivity (dB)	>50
Return Loss (dB)	>40
PMD (ps)	<0.1
Fiber Length (m)	1.00
Fiber Type	SMF-28e 0.9mm loose tube
Connector Type	FC/APC
Power Handling (mW)	500
Operating Temperature (°C)	-0~+70
Storage Temperature (°C)	-40~+85
Package Dimension (mm)	100x80x10

3.3 Ecualización y sintonización de la fuente WDM

Una vez multiplexados los canales, se introduce la fuente WDM en el Analizador de Espectros Óptico (OSA) (Figura 3.3). Se puede evidenciar en la gráfica inicial que los canales no se encuentran ecualizados en potencia y la distancia entre canales no es igual. Para lograr que la diferencia de potencia no sea notable y que los canales ópticos tengan una misma potencia se variaron los parámetros de corriente de ajuste y la temperatura de cada uno de los canales de la fuente de prueba.



a)



b)

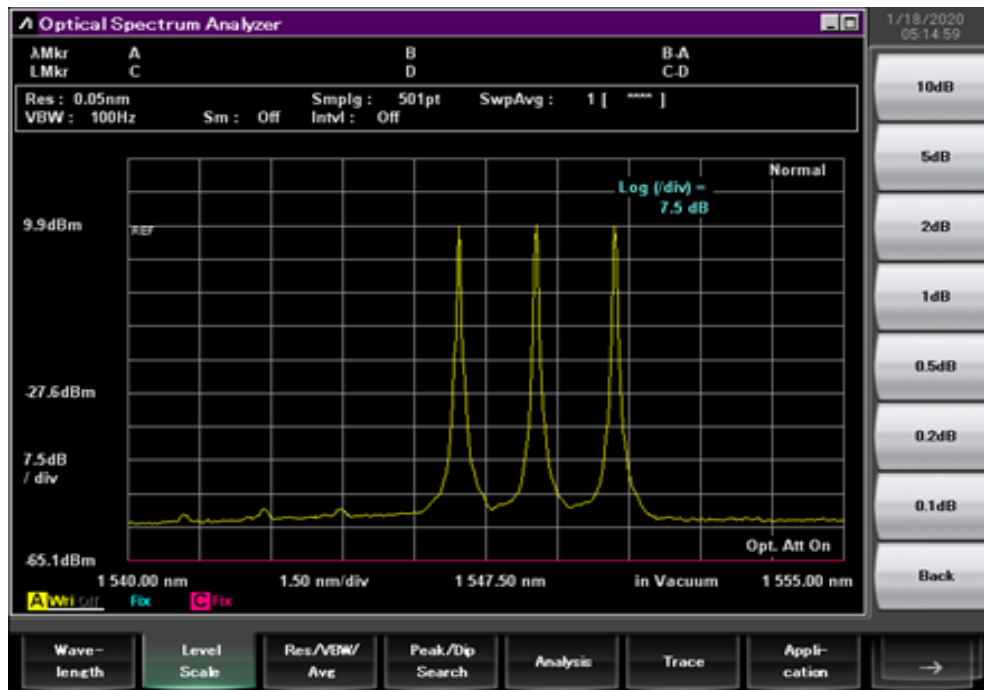
Figura 3.3: Imagen Analizador de Espectro Óptico a) Canales Multiplexados b) Des-equalización de los canales.

Se realizaron las configuraciones en la fuente láser de corriente de ajuste y temperatura que se muestran en la Tabla X.

Tabla X. Parámetros de ecualización de la fuente WDM.

Corriente de Ajuste (mA)	Temperatura (°C)	Longitud de Onda Obtenida (nm)
168	13.4	1546.94
194	19.4	1548.55
200	20.3	1550.17

Al realizar el ajuste de los parámetros se obtiene una diferencia de potencia entre el canal de mayor potencia y el de menor potencia de 0.238 dB como se muestra en la figura 3.4. Además, se logra una separación entre los canales 38 y 36 de 201.62 GHz y una separación entre los canales 36 y 34 de 202.45GHz. De esta forma se tiene una fuente WDM de potencia aproximada a los 10 dBm compuesta de 3 canales lista para su inserción en un medio de transmisión óptico.



a)



b)

Figura 3.4: Canales WDM Ecuilizados.

Capítulo IV: “Inserción de la fuente WDM en la Delta Metropolitana”

En el presente capítulo se describe el experimento de inserción de la fuente WDM en un medio óptico. Primero se realiza el experimento insertando la fuente WDM en un carrete de fibra SMF 28 de aproximadamente 2.3 km de longitud y luego se repite el experimento sobre los 103 km de fibra de la Delta Metropolitana.

4.1 Inserción de la fuente WDM DFB-4-B en una fibra de 2.3 km

Antes de insertar la fuente WDM a la Delta Metropolitana, se insertó en un carrete de fibra óptica SMF 28 de 2.3 km de distancia. En el diagrama en bloques de la figura 4.1 se identifican las partes esenciales del experimento, nótese que para este experimento inicial no se utilizó etapa de amplificación, por la potencia de la fuente y la poca atenuación de la señal que presenta a lo largo de 2.3 km de fibra óptica. Al final del carrete de fibra óptica se colocó un medidor de potencia óptica para detectar si hay presencia de señal a longitudes de ondas cercanas a los 1550 nm. Una vez que se comprueba que hay señal óptica se sustituye el medidor de potencia por el analizador de espectros ópticos.

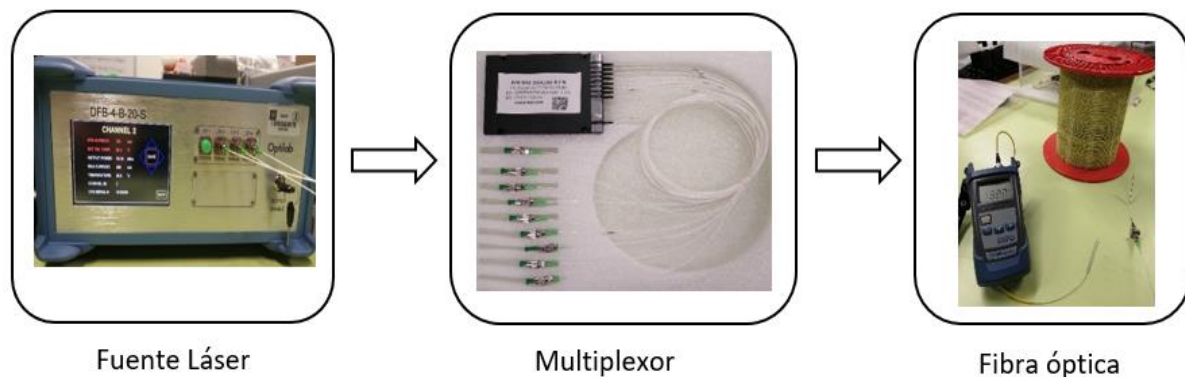
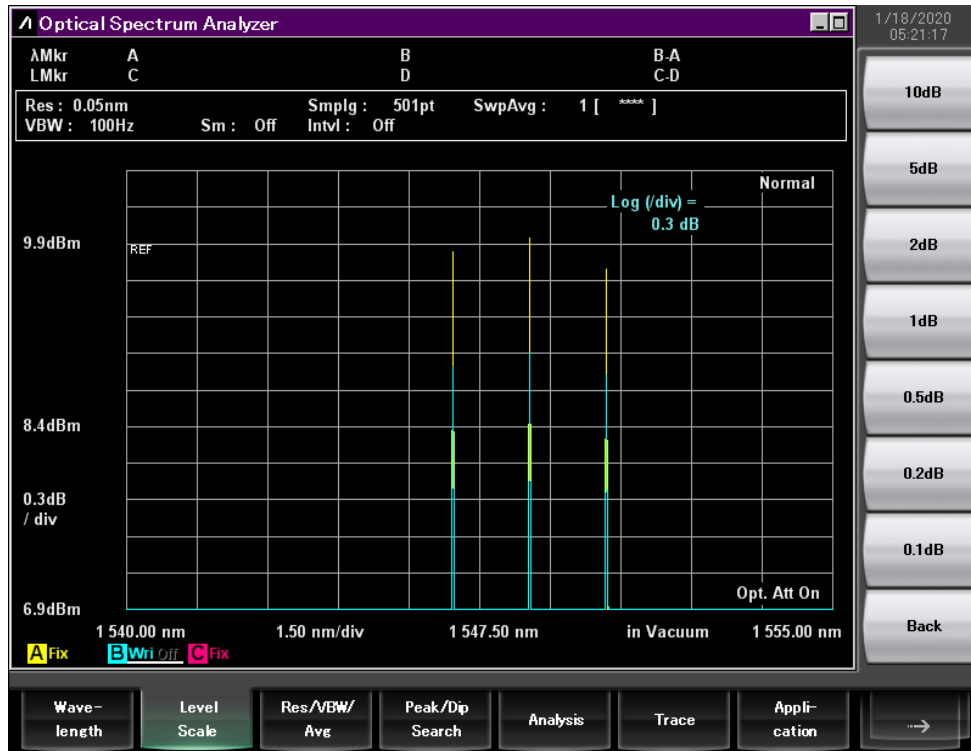


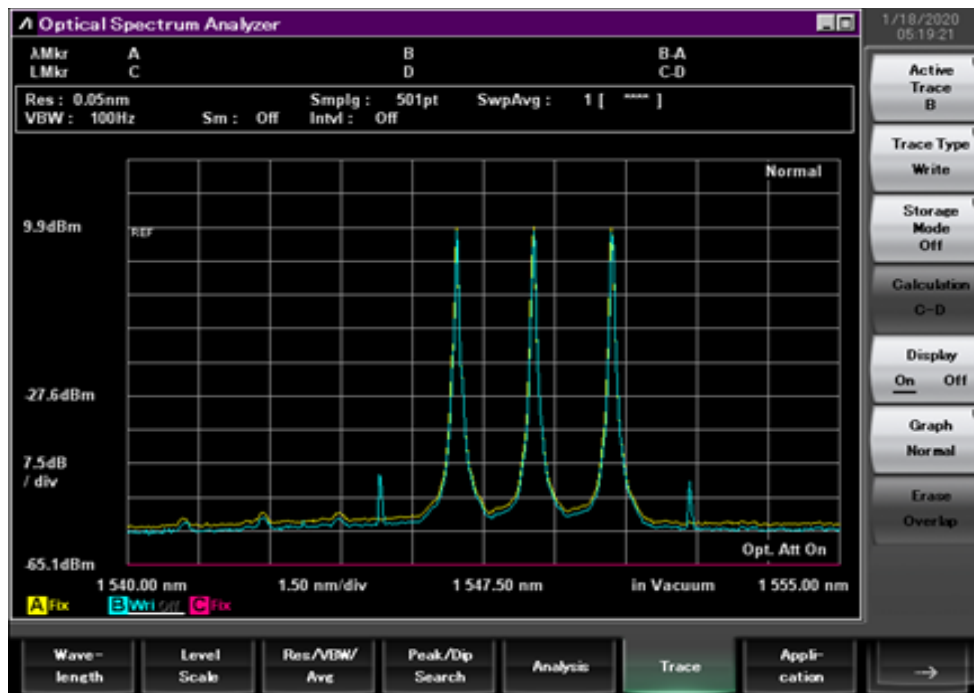
Figura 4.1: Diagrama de bloques inserción de la fuente WDM en un carrete de fibra óptica de 2.3 km.

El primer efecto que se puede notar es la atenuación en 0.96 dB de la señal óptica en la Figura 4.2 a). Esta atenuación es debido a la atenuación intrínseca de la fibra de 0.2dB/km más las pérdidas por conectores mecánicos.

En la figura 4.2 b) se puede apreciar la aparición de dos frecuencias adyacentes, producto del Mezclado de Cuatro Ondas, el cual es un efecto no lineal que aporta la sección de 2.3km de fibra. En dicha figura, la curva amarilla representa los canales WDM a la entrada de la fibra y la curva azul representa los canales WDM a la salida de la fibra.



a)



b)

Figura 4.2: Inserción de la fuente WDM en 2.3 km de fibra SMF28. a) Atenuación de la fibra. b) Aparición del efecto no lineal Mezclado de Cuatro Ondas.

Comprobada la no linealidad de la fibra óptica, se procedió a analizar cómo afecta el Mezclado de Cuatro Ondas en las características espectrales de los canales WDM con mayor detalle, primero realizando pruebas con solo dos canales y reduciendo su espaciamento espectral. Primero se realizaron pruebas apagando en la fuente el canal central con longitud de onda 1548.55 nm y se dejaron activos los canales 38 y 34 como se muestra en la figura 4.3 en donde ahora se muestra en amarillo los canales a la salida de la fibra. La distancia espectral entre estos canales es aproximadamente 400 GHz y no aparecen señales adyacentes causadas por el Mezclado de Cuatro Ondas.

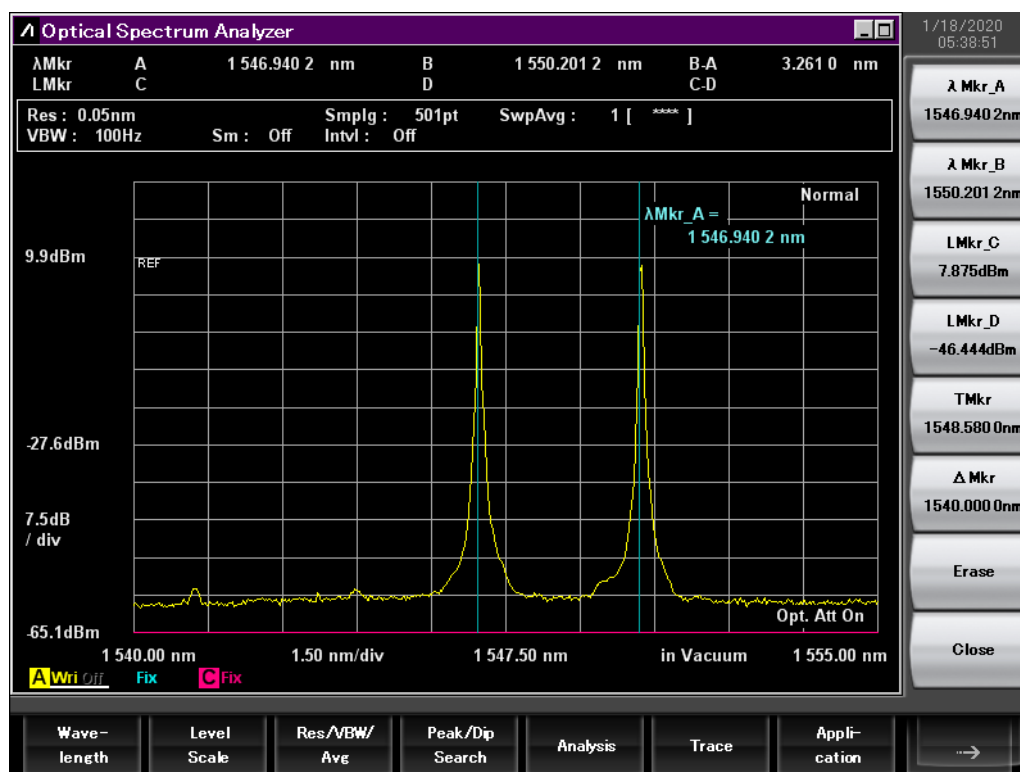


Figura 4.3: Apagando en la fuente el canal central (1548.55 nm)

Se procede a apagar el láser correspondiente al canal 38, y activar el canal 36 central, para ahora tener dos canales WDM, el 36 y 34, espaciados 200GHz. De acuerdo con la figura 4.4 se comprueba nuevamente la presencia del efecto no lineal de Mezclado de Cuatro ondas. Recordar que en estos experimentos se está empleando un carrete de 2.3km de fibra óptica estándar SMF28.

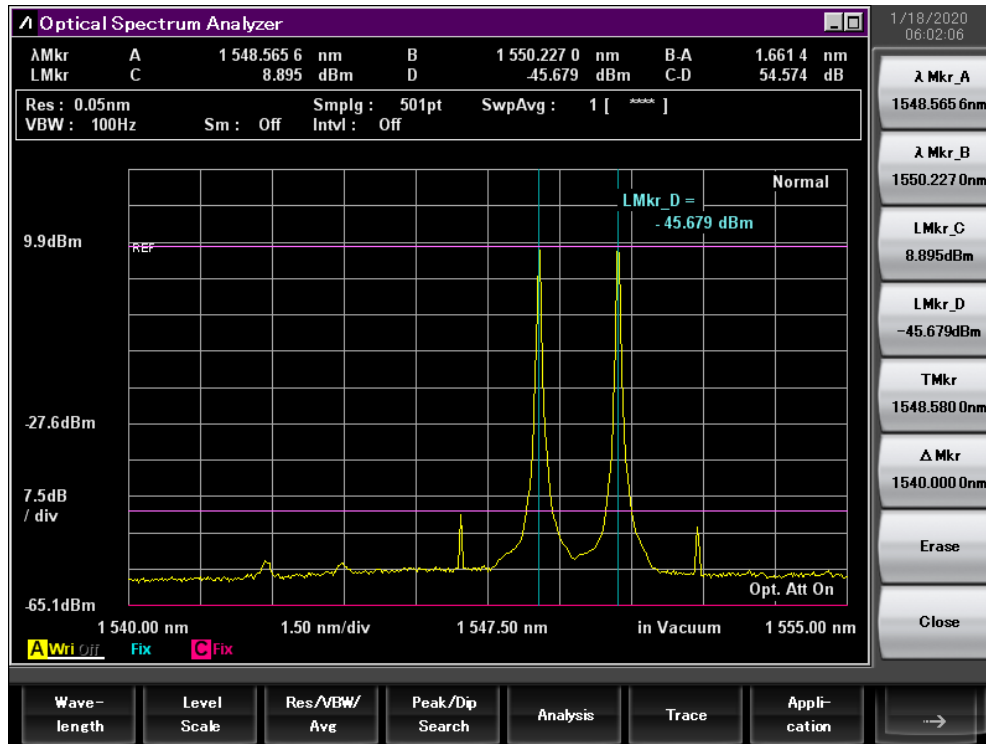


Figura 4.4: Aparición del efecto no lineal Mezclado de Cuatro Ondas entre los canales 36 y 34.

Variando los parámetros de la fuente láser, corriente de ajuste y temperatura se logra disminuir o aumentar la longitud de onda central a la que operan, con el objetivo de comprobar el comportamiento de la no linealidad FWM con respecto a la separación entre canales WDM. La figura 4.5 muestra un corrimiento hacia longitudes de onda menores del canal que se encontraba centrado en 1550.17 nm, mientras que el canal centrado en 1548.55 nm se mantiene fijo.

Se puede observar que la potencia de los canales adyacentes aumentó como resultado de ese efecto, (se ilustra con la curva de color azul en la gráfica). Luego se procede a realizar el mismo experimento, pero esta vez ajustando a longitud de onda superior al canal que se encuentra en 1548.55 nm como se observa en la figura 4.6. Con la comparación en la figura 4.6 de las tres gráficas, amarilla, azul y rosada se puede comprobar como las frecuencias adyacentes resultados de la Mezcla de Cuatro Ondas aumentan su potencia a medida que la separación espectral entre canales se reduce.

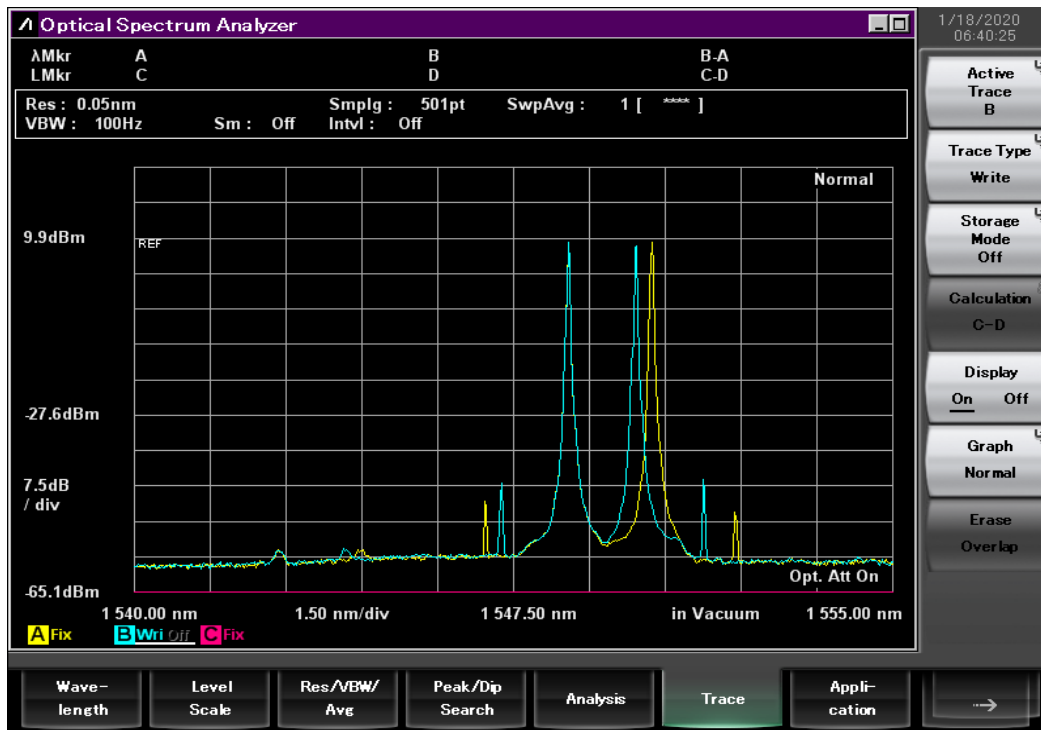


Figura 4.5: Ajuste a longitud de onda inferior del canal con frecuencia central de 1550.17 nm.

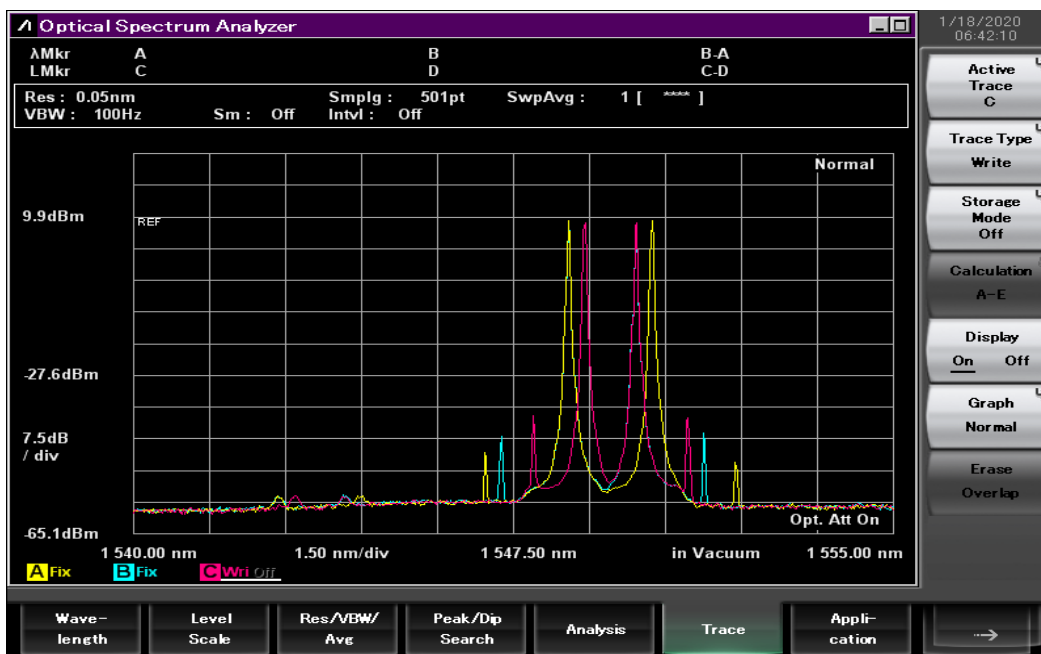


Figura 4.6: Ajuste a longitud de onda superior del canal con frecuencia central de 1548.55 nm.

4.2 Software de simulación y su calibración utilizando el experimento real a 2.3km

Al no ser factible la realización del experimento de inserción de la fuente WDM sobre los 103km de la Delta Metropolitana, se procede a realizar el experimento de forma simulada, utilizando el algoritmo de Runge-Kutta de cuarto orden programado utilizando Matlab R2020b Online [23]. Luego de obtenido los resultados para 2.3km entonces se inició la calibración de la simulación para esta distancia específica, el código en Matlab se encuentra en el anexo 1.

El primer paso de la programación del método matemático es la confección de la fuente WDM, en este caso se utilizaron las mismas longitudes de onda expuestas en el Capítulo 3 de la presente investigación; se utiliza como base 1550.17 para generar los otros dos canales ópticos. La figura 4.7 muestra la fuente WDM confeccionada en el software.

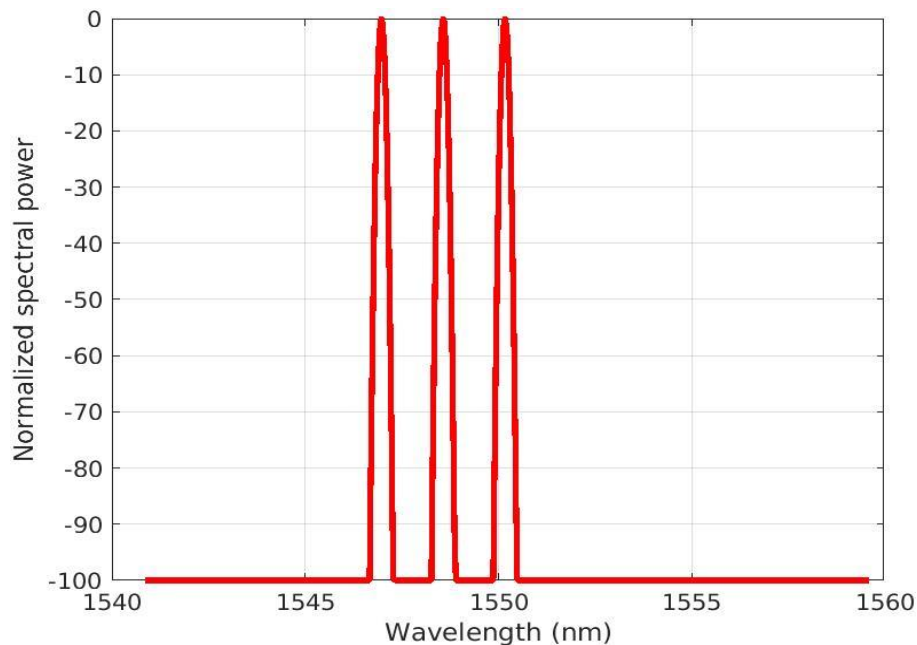


Figura 4.7: Fuente WDM simulada.

El primer fenómeno detectado al compilar el código y analizar los resultados es la atenuación que sufre la señal en el recorrido de 2.3km, la atenuación intrínseca de la fibra es de 0.45dB para esta distancia y las pérdidas asociadas a los conectores usados es de 0.5dB para un total de 0.95dB aproximados de pérdida de la potencia óptica. Otro de los fenómenos que se pueden percibir utilizando este método matemático es el surgimiento de nuevas longitudes de onda adyacentes como consecuencia del efecto no lineal Mezclado de Cuatro Ondas (FWM), este efecto se muestra en la figura 4.9, donde en color rojo se muestran los canales WDM a la entrada de la fibra y de color azul los canales WDM a la salida de la fibra.

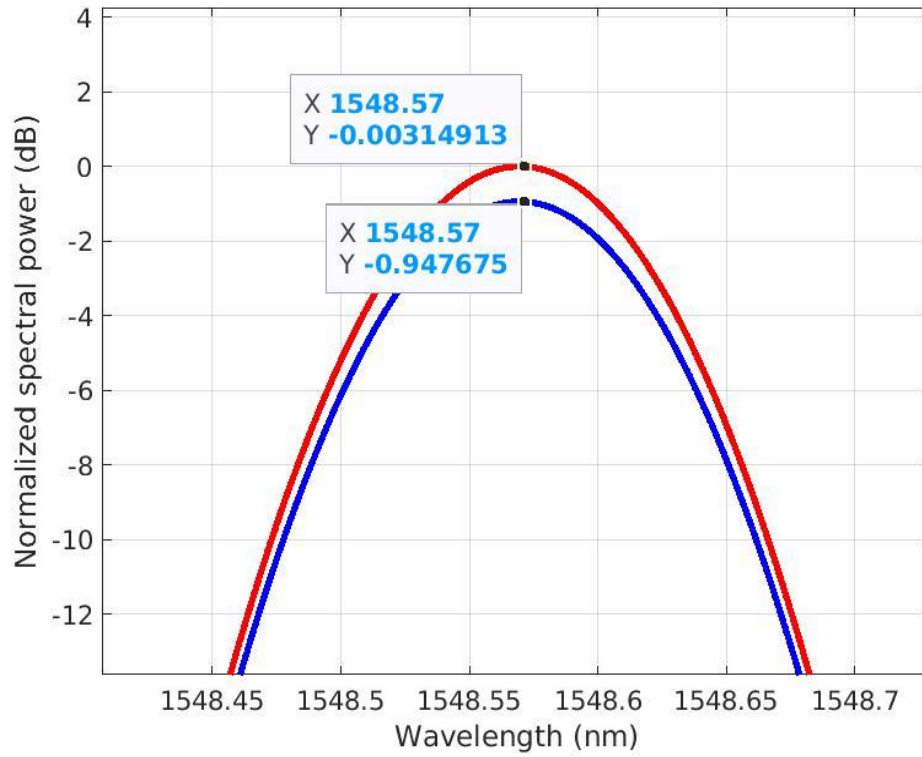


Figura 4.8: Atenuación de la señal en 2.3km.

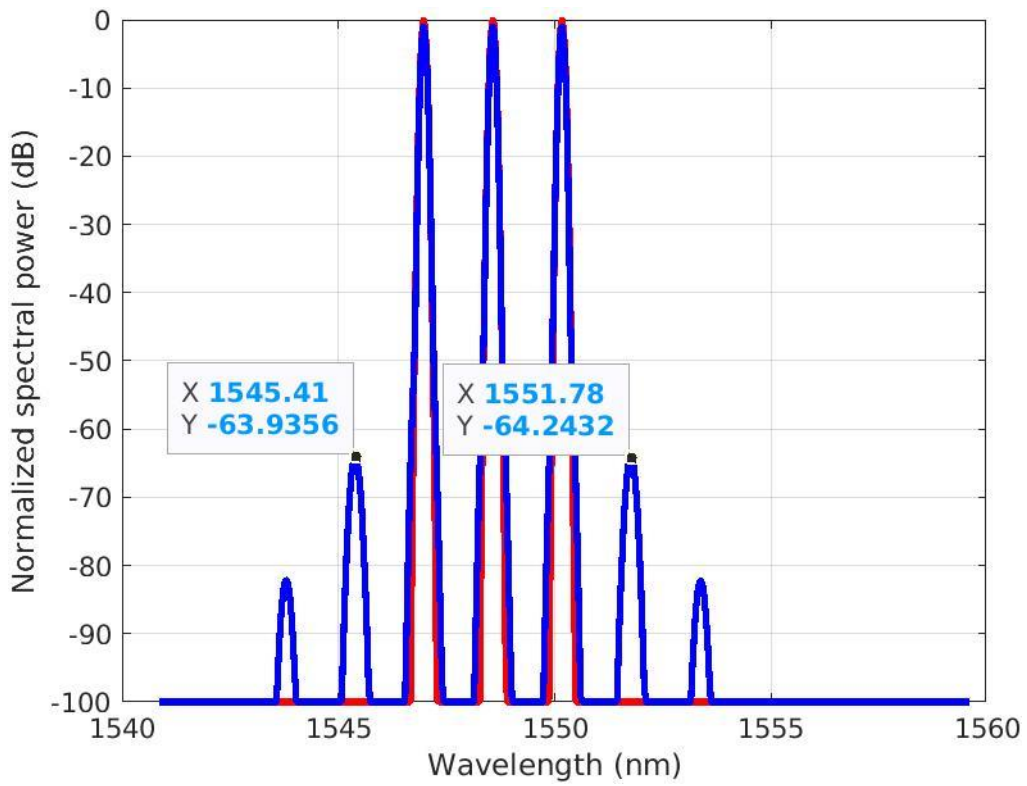


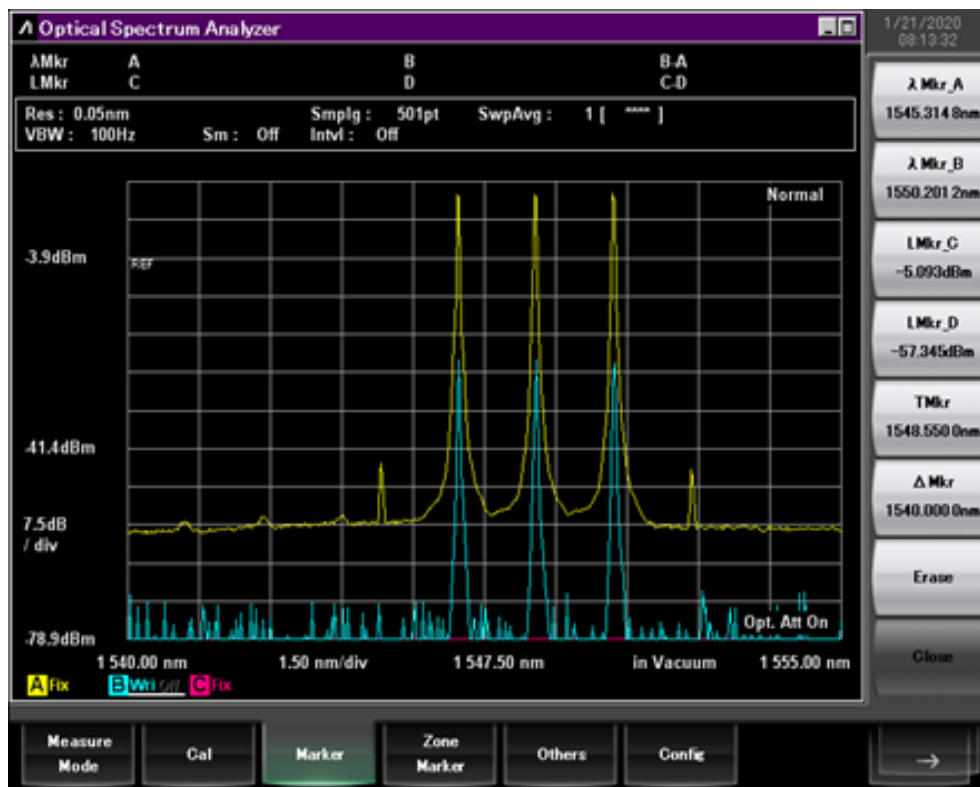
Figura 4.9: FWM en la señal WDM a una distancia de 2.3km.

Como en el experimento real, utilizando este programa se puede comprobar la no linealidad de la fibra óptica. Es evidente la veracidad de la simulación al comparar y obtener resultados similares al experimento real, es decir, se obtiene una similitud razonable entre la figura 4.9 obtenida con simulación y la figura 4.2 obtenida en forma experimental considerando en ambos casos un carrete de 2.3km de fibra SMF28. Por lo tanto, el código en Matlab se convierte entonces en la herramienta adecuada para analizar los efectos no lineales al transmitir canales WDM una distancia de 103 km.

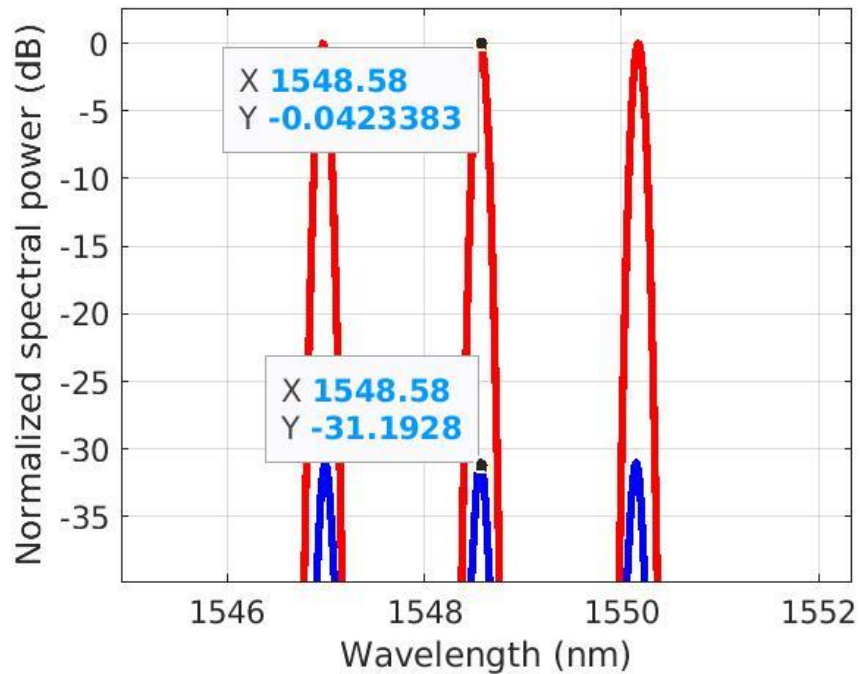
4.3 Inserción de la fuente WDM DFB-4-B en la Delta Metropolitana

Luego de insertar la fuente WDM en un carrete de fibra de poca distancia, se procede a insertarlo ahora sí en la Delta Metropolitana, medio de comunicaciones que se caracterizó en la etapa 2 de la investigación. Este experimento se realizó de forma simulada utilizando una modificación del código en Matlab que se utilizó para una distancia de 2.3km de fibra óptica pero ahora considerando 103km de fibra. El código para esta nueva distancia se muestra en el Anexo 2. La simulación posibilita realizar diferentes pruebas como: aumento de la potencia de la señal (amplificación), así como también el aumento y/o disminución de la separación entre los canales WDM.

El primer resultado visible es la atenuación que sufre la señal causada por el medio óptico. La figura 4.10 a) muestra el resultado del experimento, como se esperaba la atenuación de la señal es de aproximadamente 31dB. En la figura 4.10 b) se observa el resultado de la simulación y se comprueba que ambos resultados coinciden.



a)



b)

Figura 4.10: Atenuación de la señal WDM causada por la Delta Metropolitana. a) Experimento real. b) Simulación.

Vale la pena comentar que como resultado de la atenuación sufrida por la señal en 110km de fibra óptica, las señales adicionales generadas por el Mezclado de Cuatro Ondas se atenuaron y ya no son visibles. Por lo que el siguiente paso es el uso de amplificadores, tanto como Booster o Preamplificador, para saber el comportamiento de las no linealidades de la fibra a altas potencias y a diferentes distancias del enlace.

4.4 Análisis de la transmisión de canales WDM a diferentes potencias y espaciamento intercanal constante

Para determinar los regímenes de operación en la transmisión de canales WDM sobre un medio óptico es necesario controlar la potencia óptica y la distancia intercanal de la fuente. El experimento siguiente consiste en apagar uno de los canales, en el caso que se evidencia el canal número 3, e ir aumentando la potencia y disminuir la distancia intercanal con el objetivo de caracterizar los fenómenos no lineales asociados a estos parámetros. Primeramente, se experimenta con una distancia intercanal de 200 GHz y una potencia de 10 mW (10dBm) como se observa en la figura 4.11. Nótese que no se observa la aparición de canales adyacentes producto del FWM con estos parámetros.

Se procede entonces a aumentar la potencia de la fuente unos 5dB más que el caso anterior por lo que la potencia de la fuente WDM ahora es de 32mW (15dBm), se mantiene constante la separación entre canales (200GHz). Se puede observar el resultado de estas condiciones como en la figura 4.12 aparecen dos lóbulos laterales producto del mezclado de cuatro ondas.

En estas condiciones de distancia, potencia y separación entre canales adyacentes ya son visibles los fenómenos no lineales.

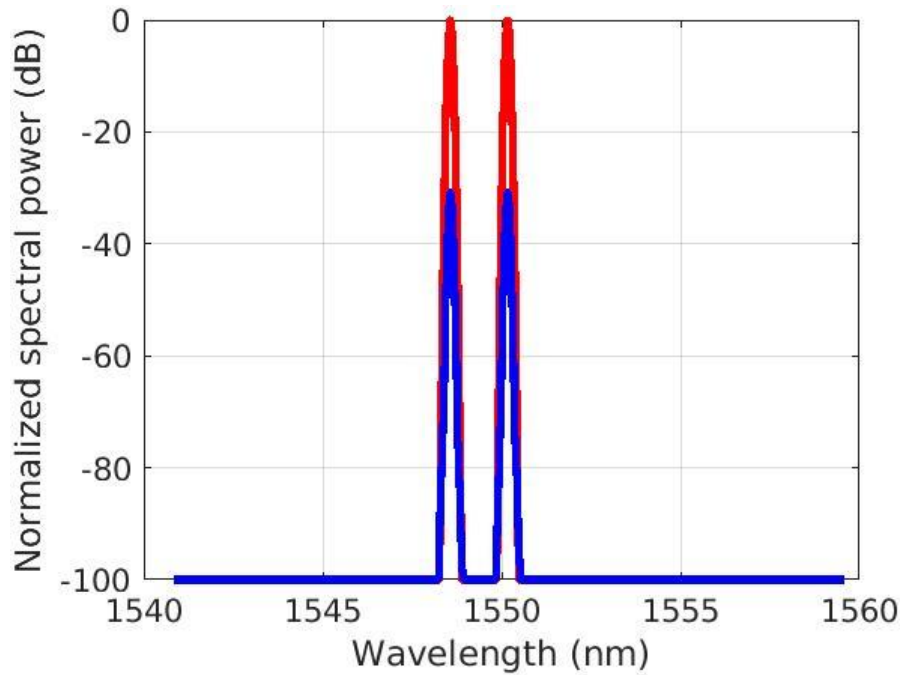


Figura 4.11: Separación entre canales 200GHz y potencia de 0.01W.

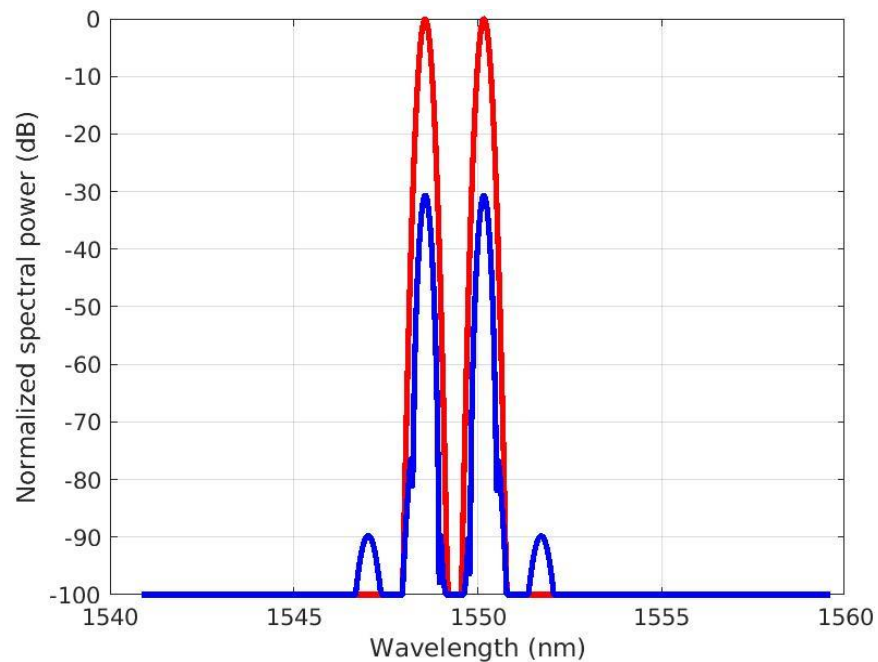


Figura 4.12: Separación entre canales 200GHz y potencia de 0.032W.

El proceso en este experimento es recurrente, se procede a aumentar nuevamente la potencia de la fuente manteniendo la misma distancia intercanal de 200GHz. Esta vez la potencia se

fija hasta 0.05W (17dBm), lo resultados se muestran en la figura 4.13. Se percibe un aumento ligero de la potencia de los lóbulos laterales productos de efectos no lineales.

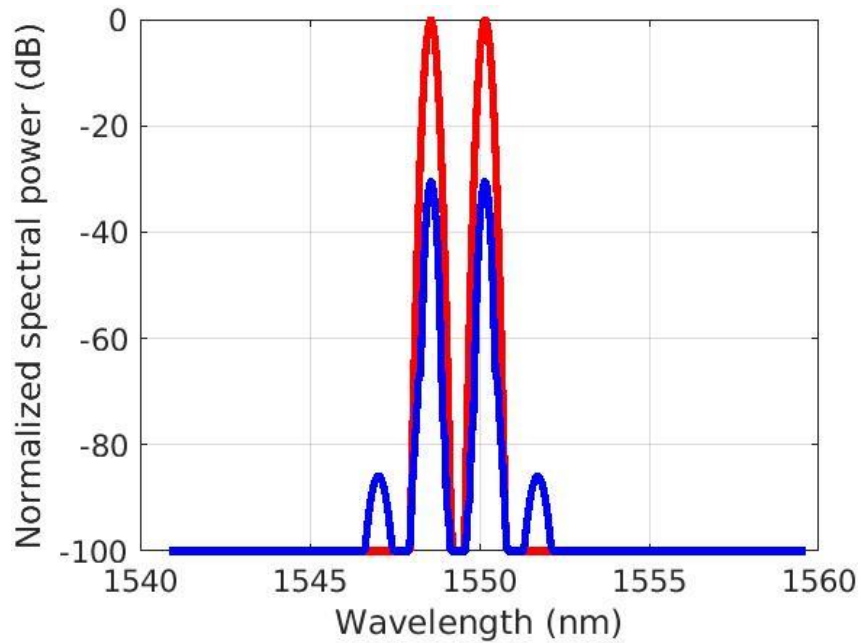


Figura 4.13: Separación entre canales 200GHz y potencia de 0.05W.

Otra vez se aumenta la potencia esta vez el doble hasta llegar a los 0.1 W (20dBm) manteniendo la separación de 200 GHz entre los canales como muestra la figura 4.14. Los lóbulos laterales crecen proporcionalmente con la potencia pico de la señal de entrada de la fibra.

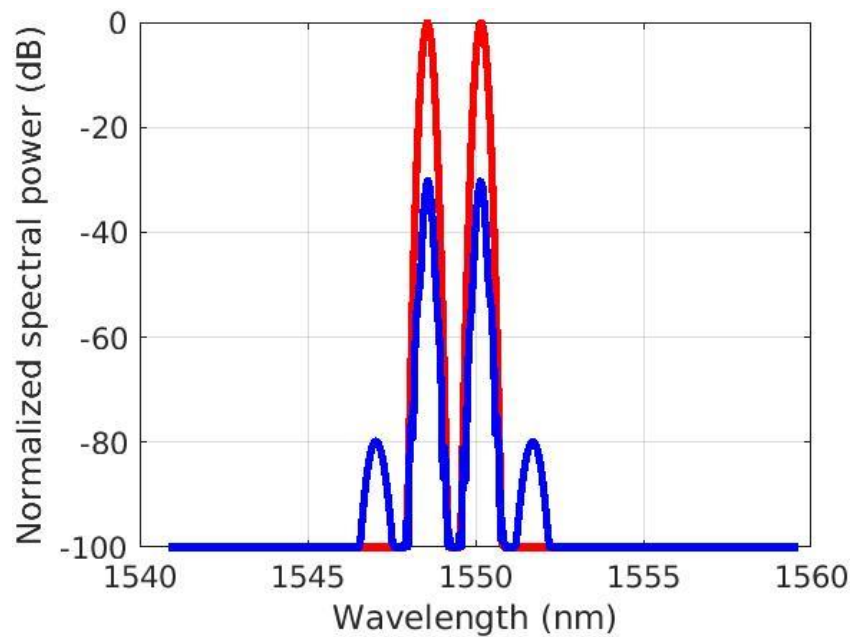


Figura 4.14: Separación entre canales 200GHz y potencia de 0.1W.

Se sigue aumentando la potencia de la fuente WDM con el objetivo de llevar al sistema límite de operación, esta vez la potencia pico de entrada es de 0.2W (23dBm) y el resultado de la señal a los 103 km de propagación. La figura 4.15 muestra estos resultados.

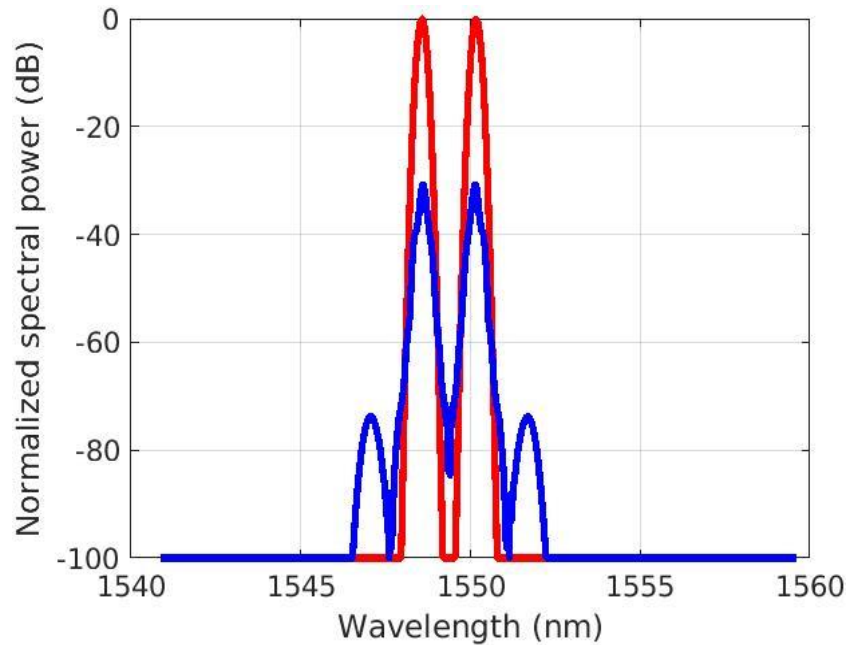


Figura 4.15: Separación entre canales 200GHz y potencia de 0.2W.

El nuevo valor para la potencia de entrada es de 0.398W (26dBm) para este nivel de potencia y niveles mayores, la señal al recorrer el medio no lineal producto a los efectos no lineales se distorsiona de forma que no se empiezan a hacer legible las señales para el receptor óptico. La figura 4.16 muestra los efectos que sufre la señal.

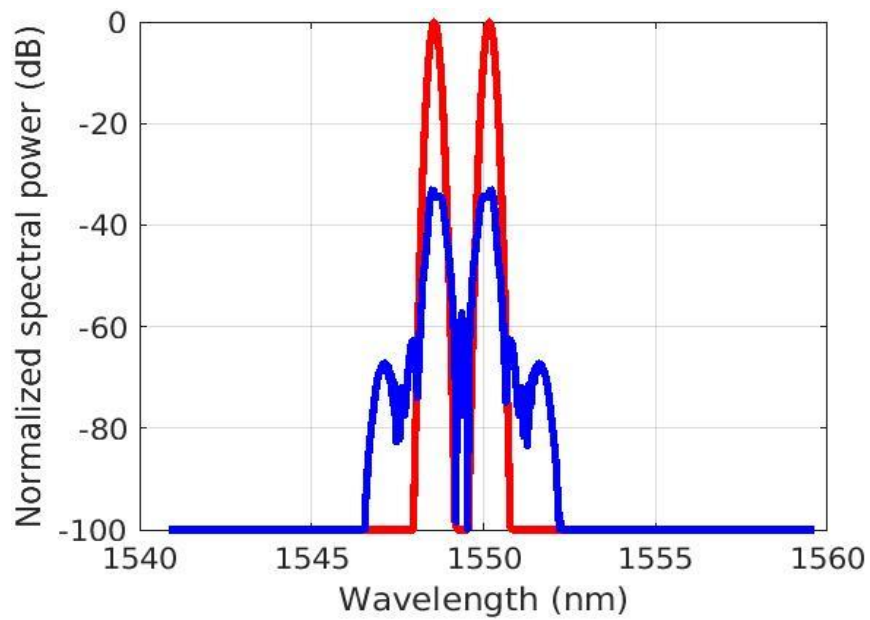


Figura 4.16: Separación entre canales 200GHz y potencia de 0.398W.

La Tabla XI expone los valores cuantitativos de este experimento y la figura 4.17 muestra la gráfica del comportamiento del sistema para condiciones antes expuestas.

Tabla XI. Datos del experimento de transmisión de canales WDM a diferentes potencias y espaciamiento intercanal constante de 200GHz.

Potencia de entrada (W)	Potencia Espectral Normalizada (dB) del Lóbulo FWM a 1546.93 nm	Potencia Espectral Normalizada (dB) del Lóbulo FWM a 1551.79 nm
0.01	-	-
0.032	-89.8875	-90.1581
0.05	-85.1556	-85.8825
0.1	-79.9507	-80.0245
0.2	-73.7357	-73.8072
0.398	-67.4656	-67.4546

Al ser bastante parecidos los resultados de potencias para ambos lóbulos productos del efecto de mezclado de cuatro ondas entonces se graficó solamente para el lóbulo de longitud de onda 1546.93 nm.

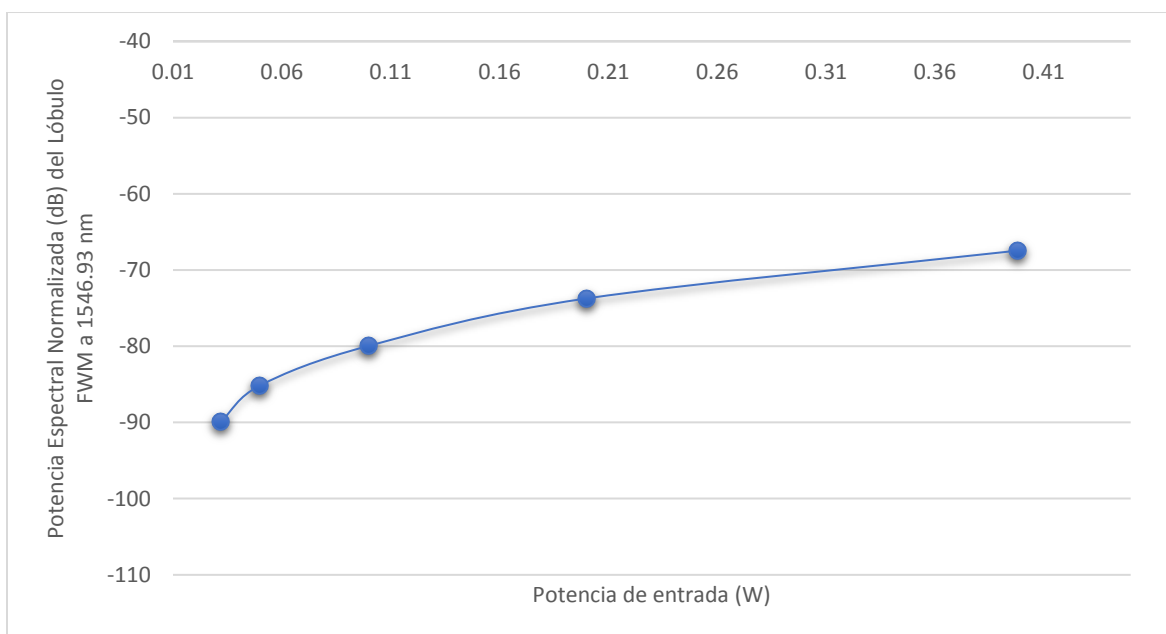


Figura 4.17: Análisis gráfico de la transmisión de canales WDM a diferentes potencias y espaciamiento intercanal constante de 200GHz.

Una vez que la potencia de la señal tiende al valor de 1W la señal recibida a los 103km no puede ser detectada con calidad por el receptor. Nótese en la figura 4.18 no solo se atenúa la señal, sino que también se distorsiona producto a la no linealidad del medio óptico. Estos efectos no lineales se maximizan para altas potencias de transmisión.

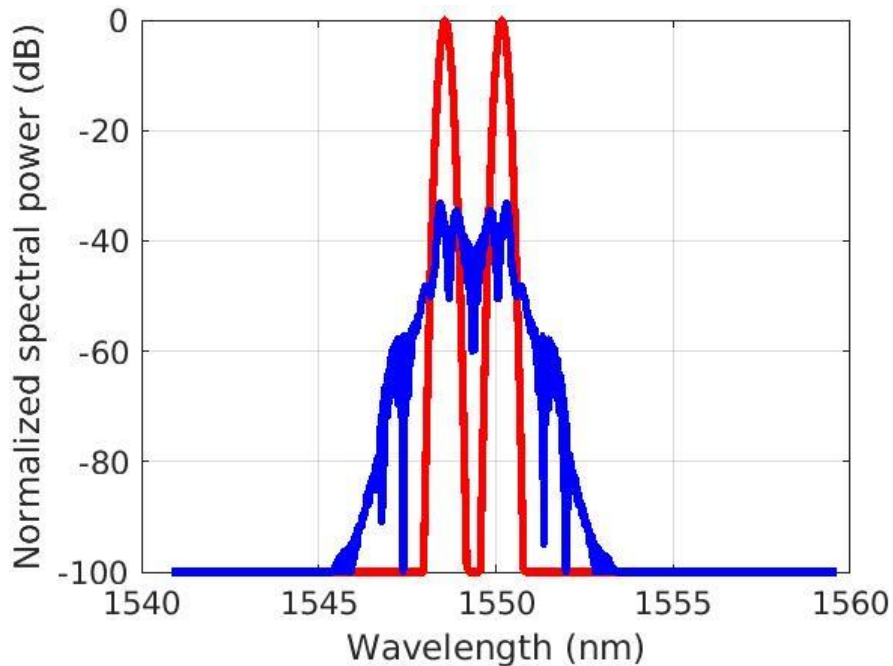


Figura 4.18: Separación entre canales 200GHz y potencia de 0.8W.

4.5 Análisis de la transmisión de canales WDM a diferente espaciamiento intercanal y a potencia constante

El experimento siguiente consiste en apagar uno de los canales, el canal número 3 en este caso como se hizo en el epígrafe anterior. En este caso se mantiene constante la potencia pico de la fuente y se va disminuyendo progresivamente la distancia intercanal, con el objetivo de caracterizar los fenómenos no lineales asociados a estos parámetros. Las condiciones iniciales del experimento son exactamente las mismas que el experimento anterior una potencia pico de la fuente de 10mW (10dBm) y una separación intercanal de 200GHz como se muestra en la figura 4.9.

Con las condiciones iniciales se puede apreciar que no hay indicios de fenómenos no lineales a simple vista. Las frecuencias espurias producto del mezclado de cuatro ondas están completamente atenuadas. Se procede entonces a disminuir progresivamente la distancia entre los canales, de 200GHz se disminuye hasta 150GHz.

Con esta separación entre canales es posible apreciar unas frecuencias espurias nuevamente, producto del mezclado de cuatro ondas que sufre la señal WDM como se observa en la figura 4.19. La potencia de estas señales ruidosas es mínima, pero se puede comprobar que a medida que se reduce el espaciamiento entre canales aumenta la potencia de estas señales no deseables.

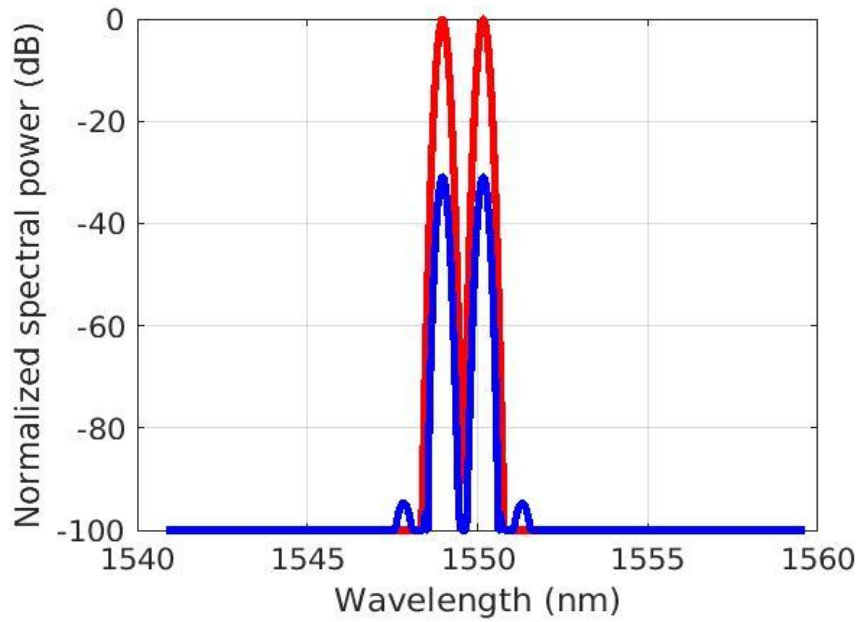


Figura 4.19: Separación entre canales 150GHz y potencia de 0.01W.

Lo siguiente es disminuir una vez más la distancia entre canales WDM, ahora este parámetro se reduce hasta 100GHz. En la figura 4.20 se puede ver el resultado de este experimento.

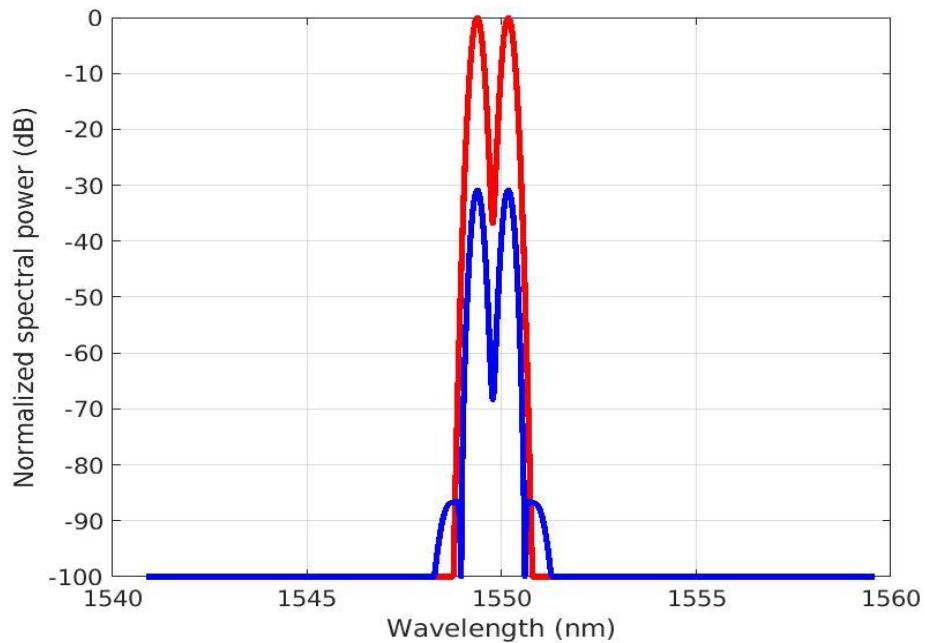


Figura 4.20: Separación entre canales 100GHz y potencia de 0.01W.

La Tabla XII expone los valores cuantitativos de este experimento y la figura 4.21 muestra la gráfica del comportamiento del fenómeno no lineal.

Tabla XII. Datos del experimento de transmisión de canales WDM a diferente espaciamiento intercanal y a potencia constante de 0.01W.

Separación intercanal (GHz)	Potencia Espectral Normalizada (dB) del Lóbulo FWM de menor longitud de onda	Potencia Espectral Normalizada (dB) del Lóbulo FWM de mayor longitud de onda
200	-	-
150	-94.7099	-94.7802
100	-86.9913	-86.7831

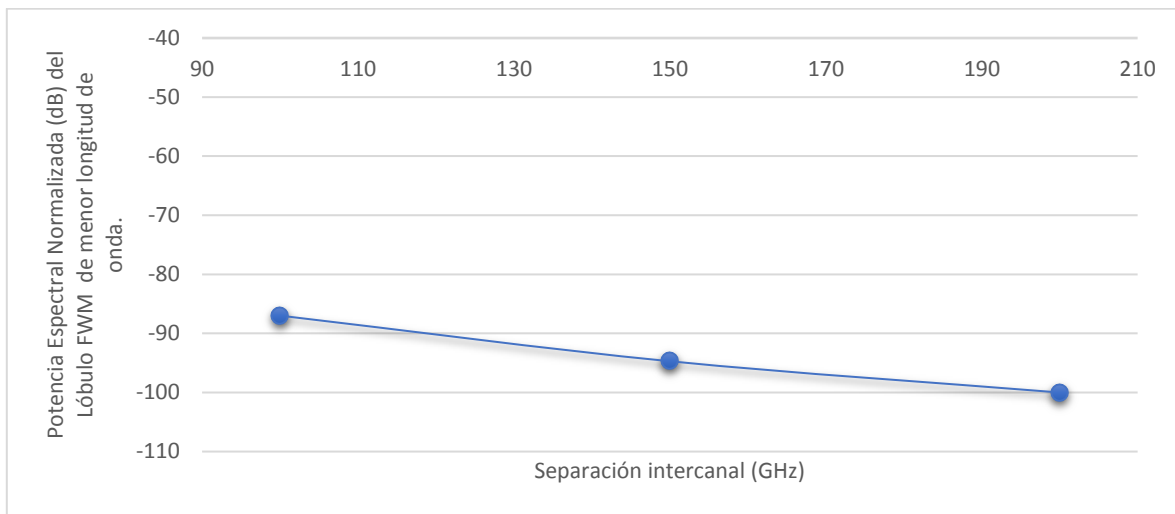
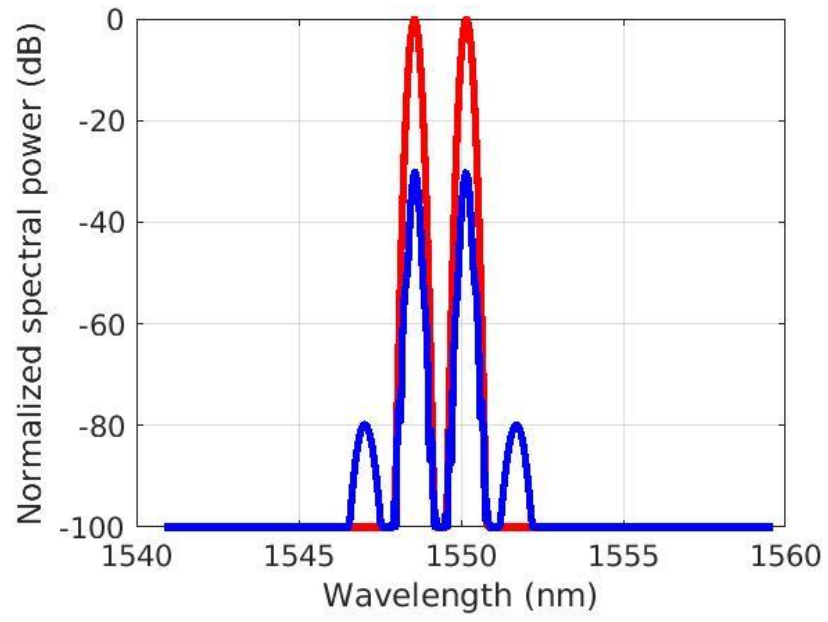
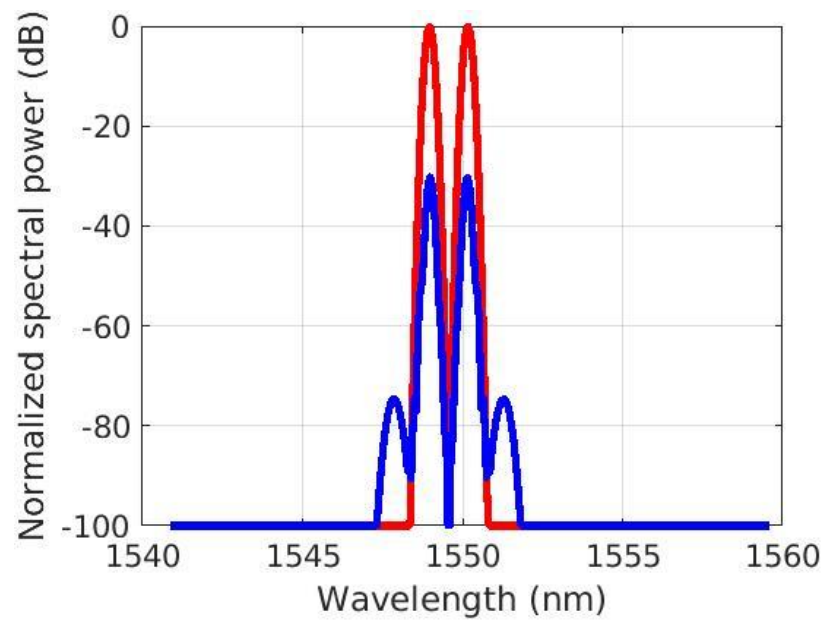


Figura 4.21: Análisis gráfico de la transmisión de canales WDM a diferentes separaciones intercanal y potencia constante 0.01W.

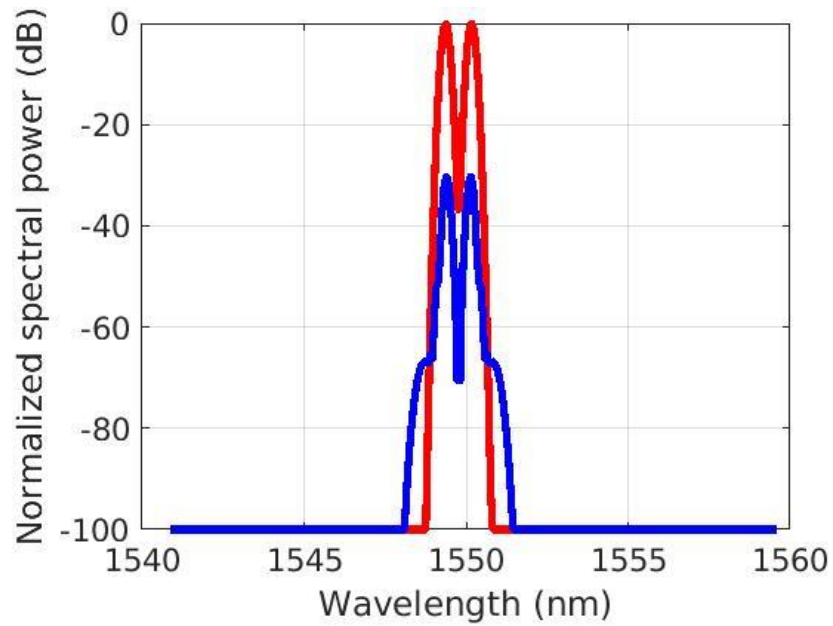
De manera recurrente se realizó otra vez este experimento, pero ahora fijando la potencia a 0.1W. La figura 4.22 muestra los resultados.



a)



b)



c)

Figura 4.22: Separación entre canales a) 200 GHz b) 150 GHz c) 100GHz y potencia pico de señal de entrada de 0.1W.

La Tabla XIII expone los valores cuantitativos de este experimento y la figura 4.23 muestra la gráfica del comportamiento del fenómeno no lineal.

Tabla XIII. Datos del experimento de transmisión de canales WDM a diferente espaciamiento intercanal y a potencia constante de 0.1W.

Separación intercanal (GHz)	Potencia Espectral Normalizada (dB) del Lóbulo FWM de menor longitud de onda	Potencia Espectral Normalizada (dB) del Lóbulo FWM de mayor longitud de onda
200	-79.8592	-80.0245
150	-74.6997	-74.9362
100	-67.3387	-67.3208

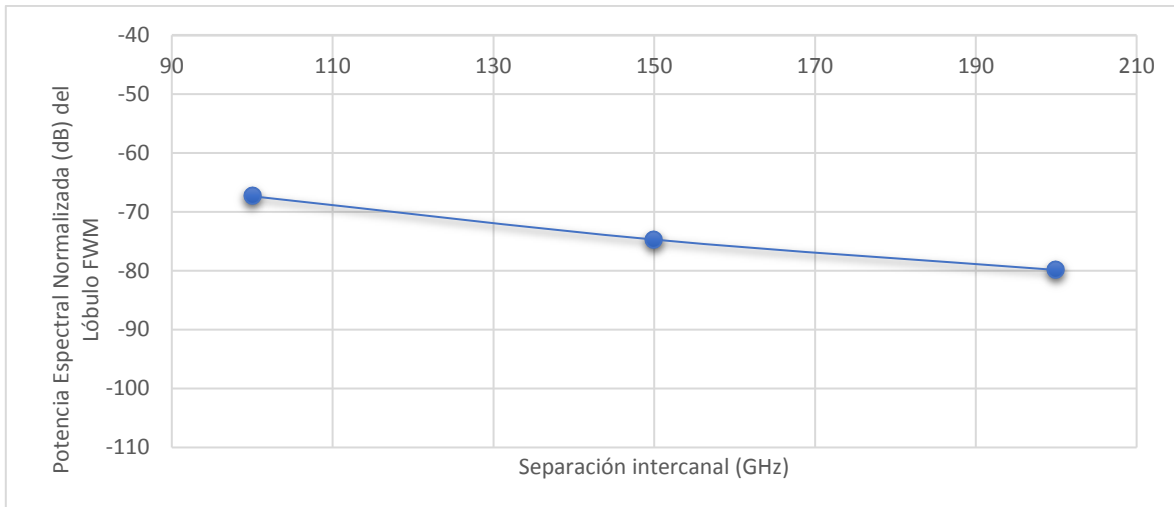


Figura 4.23: Análisis gráfico de la transmisión de canales WDM a diferentes separaciones intercanal y potencia constante 0.1W.

Nótese que para estas separaciones intercanal las frecuencias ruidosas producto de la mezcla de cuatro ondas adquieren una potencia considerable con respecto a la potencia pico de la señal. Esto demuestra una vez más que al disminuir la distancia intercanal aumentan la potencia de las frecuencias adyacentes producto de la no linealidad de la fibra.

4.6 Análisis de la desecualización en la transmisión de canales WDM a diferente espaciamiento intercanal y potencia constante

Otra consecuencia interesante del efecto lineal FWM es la desecualización de las señales al recorrer una distancia determinada sobre el medio óptico. El experimento mostrado en este epígrafe es similar a los anteriores, en este caso se utilizan los 3 canales de la fuente WDM, se fija la potencia pico de la señal de entrada y se varía la separación intercanal, este caso está más enfocado en la potencia de los canales de la señal WDM original que en la potencia de las señales laterales producto de la no linealidad del medio.

La figura 4.24 muestra el resultado para un valor de potencia de 0.1 W y 100GHz de separación intercanal. Obsérvese que para estos parámetros se evidencia que el canal central posee luego de recorrer los 103 km de fibra una potencia de aproximadamente 0.52 dB mayor que los canales adyacentes.

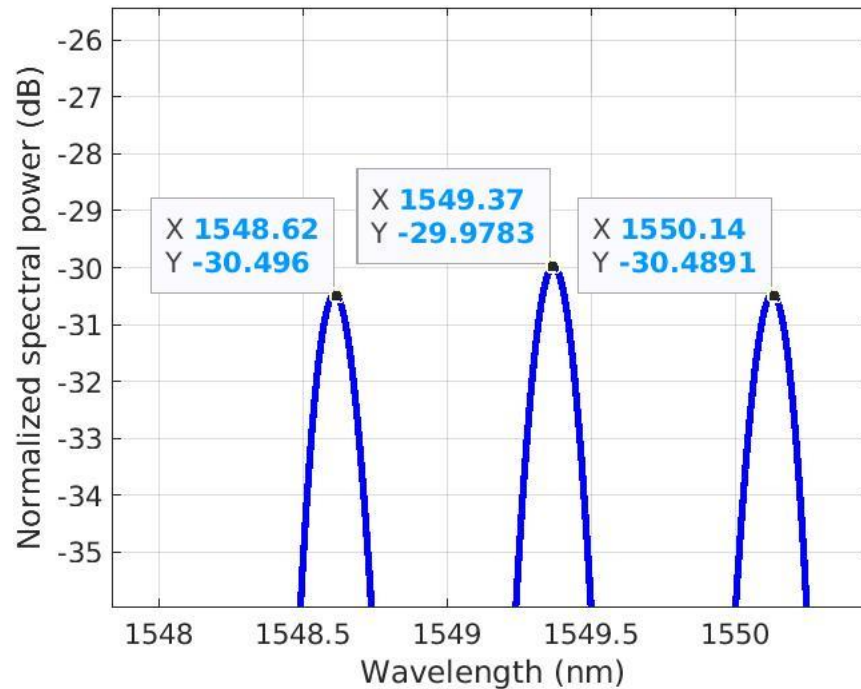


Figura 4.24: Deseccualización de los canales WDM, potencia pico de señal de entrada de 0.1W y una separación intercanal de 100GHz.

Si se mantiene constante la potencia pico de la señal de entrada y se disminuye la distancia entre los canales y ahora se hace de 75GHz entonces se puede percibir que este fenómeno de deseccualización de los canales se hace más notable.

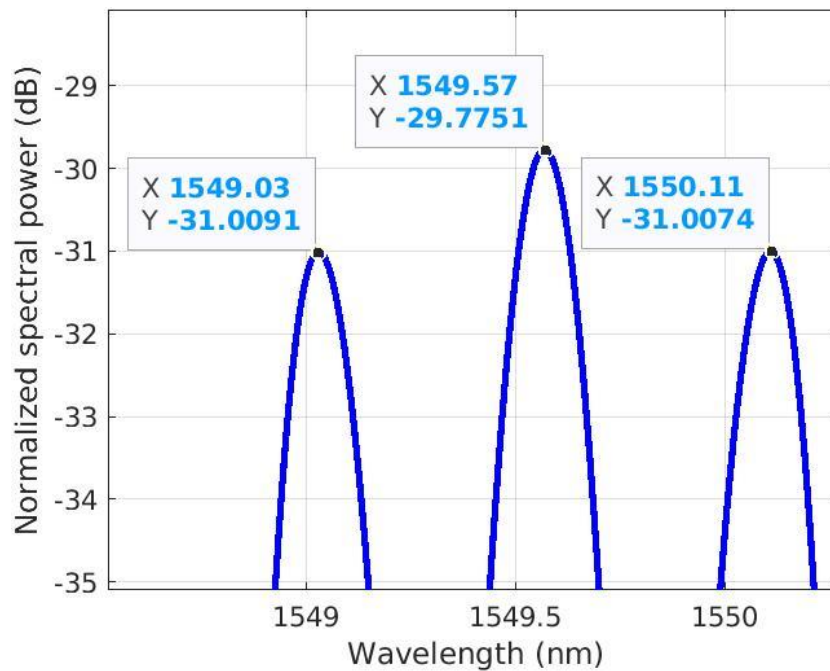


Figura 4.25: Deseccualización de los canales WDM, potencia pico de señal de entrada de 0.1W y una separación intercanal de 75GHz.

En la figura 4.25 se percibe que ahora la diferencia de potencia entre el canal central y los adyacentes es de 1.23 dB. Lo que da una medida de la relación de proporción entre la distancia intercanal y la ecualización de los canales en su recorrido por la fibra óptica. A medida que disminuye la distancia entre los canales mayor es la desecualización (diferencia de potencia) entre los canales de la señal WDM. La figura 4.26 refleja de forma gráfica ambos experimentos donde se puede apreciar como las diferencias de potencias son más abruptas cuando la separación intercanal es menor.

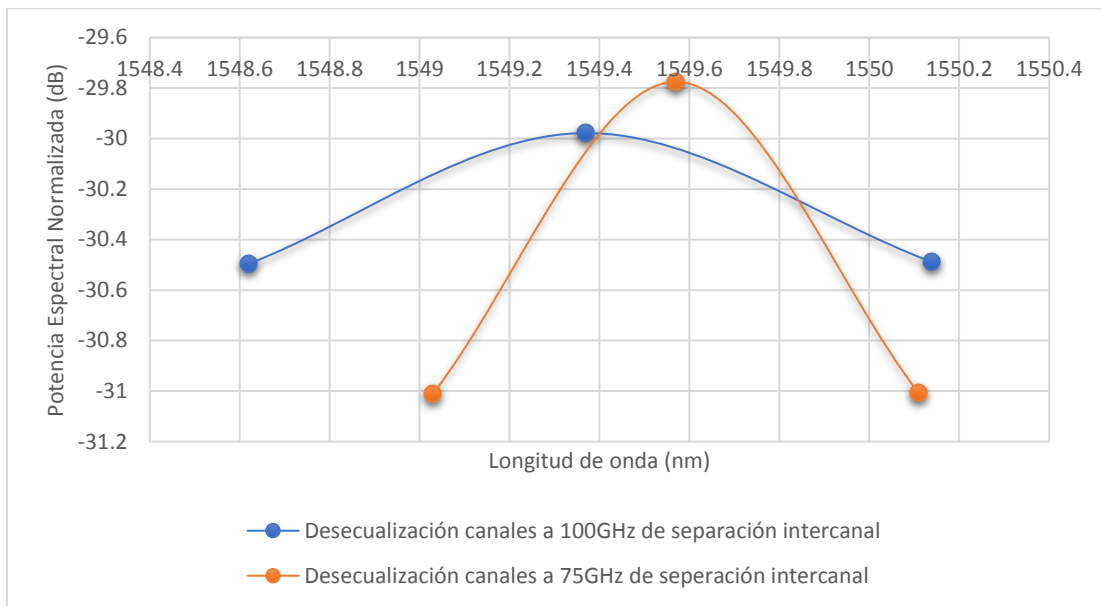


Figura 4.26: Análisis gráfico del comportamiento de la desecualización a diferentes separaciones entre canales y potencia constante.

Si definimos una variable llamada Δp o desecualización como la media entre las diferencias de potencia entre los canales laterales con respecto al canal central podemos ver el comportamiento de la desecualización con respecto a separación entre canales adyacentes. En este epígrafe se ilustran solamente dos casos puntuales para separaciones entre canales de 100 GHz y 75 GHz respectivamente con potencia de entrada constante y con valor 0.1W. La tabla XIV muestra los valores tabulados de este experimento para otros valores de separación intercanal y el cálculo de los respectivos valores de desecualización(Δp).

Tabla XIV. Datos del experimento de transmisión de 3 canales WDM a diferente espaciamiento intercanal y a potencia constante de 0.1W.

Separación Intercanal (GHz)	Potencia Espectral Normalizada C1 (dB)	Potencia Espectral Normalizada C2 (dB)	Potencia Espectral Normalizada C3 (dB)	C2-C1	C2-C3	Δp
150	-30.2598	-30.0676	-30.2471	0.1922	0.1795	0.18585
125	-30.3207	-30.0377	-30.3168	0.283	0.2791	0.28105
100	-30.496	-29.9783	-30.4891	0.5177	0.5108	0.51425
75	-31.0091	-29.7751	-31.0074	1.234	1.233	1.23315

Cabe mencionar que en la tabla anterior el parámetro de desecualización (Δp) se obtuvo promediando los valores de las columnas C2-C1 y C2-C3 que corresponden a la diferencia en potencia máxima de los canales laterales C1 y C3 con respecto a la potencia máxima del canal central C2.

Como resultado del experimento podemos deducir que la desecualización es inversamente proporcional al espaciamiento intercanal, mientras mayor sea la separación entre canales adyacentes menor va a ser la desecualización entre ellos. La figura 4.27 muestra gráficamente este efecto.

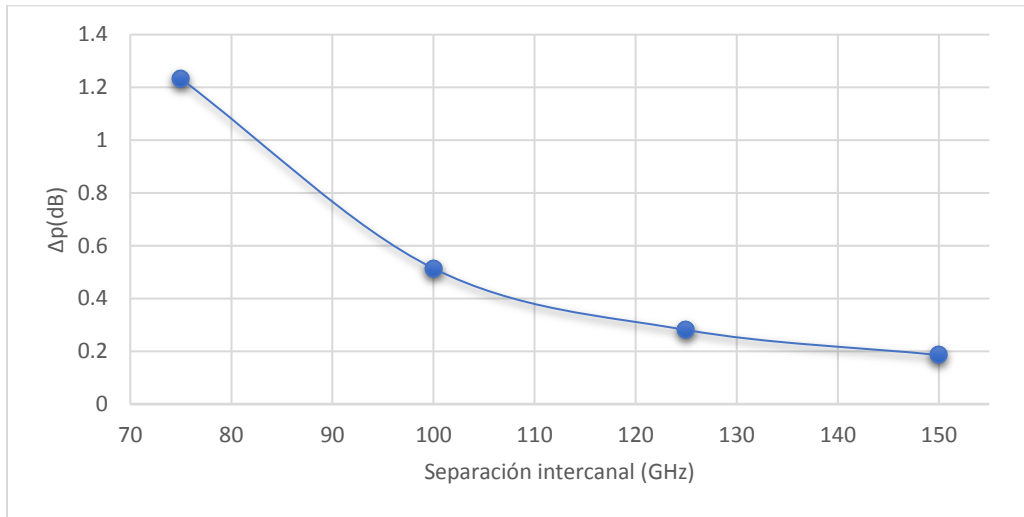


Figura 4.27: Separación intercanal (GHz) vs Δp (dB)

4.7 Análisis de la desecualización en la transmisión de canales WDM a diferentes potencias y espaciamiento intercanal constante

Este experimento parte desde valores de potencia menores, en este caso la potencia pico a la entrada es de 0.05W y la separación intercanal es de 100 GHz y se mantendrá constante, en este caso se pretende observar la relación de la potencia pico de la señal a la entrada de la fibra y la desecualización de las señales WDM a la distancia de 103 km. Nótese en la figura 4.28 que los canales tienen pequeña diferencia de potencia la salida de la fibra, la diferencia de potencia entre el mayor y el menor es de aproximadamente 0.2 dB.

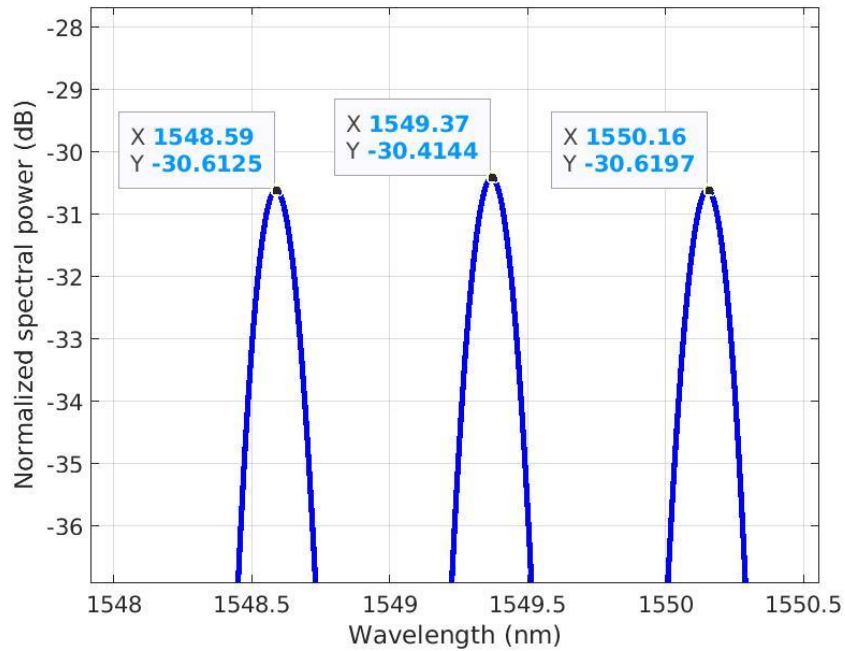


Figura 4.28: Deseccualización de los canales WDM, potencia pico de señal de entrada de 0.05W y una separación intercanal de 100GHz.

En la figura 4.29 se observa el resultado al aumentar la potencia pico de la señal de entrada hasta 0.15 W, se puede observar que la diferencia de potencia entre los canales de la señal WDM aumentó; entre el canal de más potencia y el menor hay ahora una diferencia de 0.671 dB. Se puede entonces concluir que la potencia de la señal de entrada influye en el aumento de la deseccualización de las señales ópticas al propagarse en la fibra.

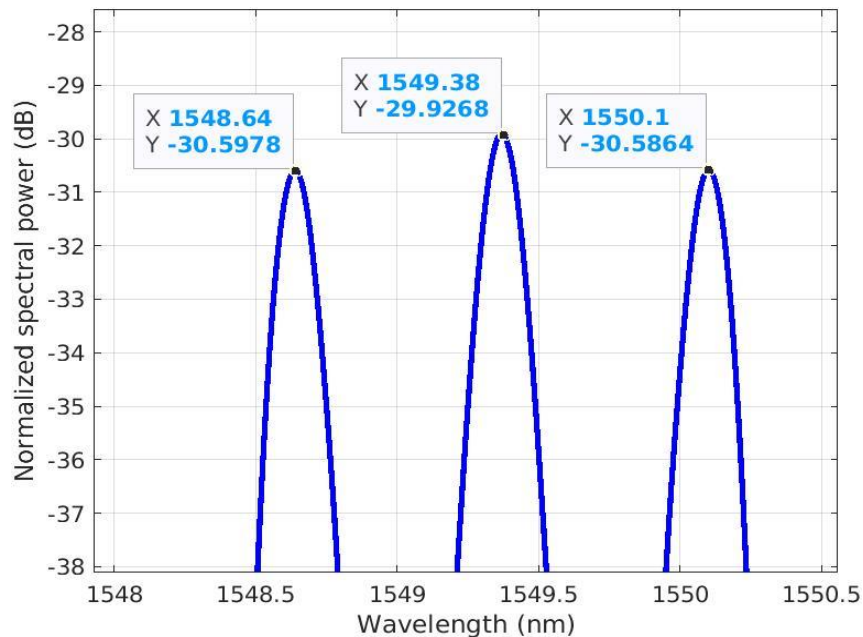


Figura 4.29: Deseccualización de los canales WDM, potencia pico de señal de entrada de 0.15W y una separación intercanal de 100GHz.

El comportamiento de la desecualización se expone gráficamente en la figura 4.30. Nótese que hay un aumento en la diferencia de potencia entre canales cuando se aumenta la potencia en la entrada producto de los efectos no lineales precisamente.

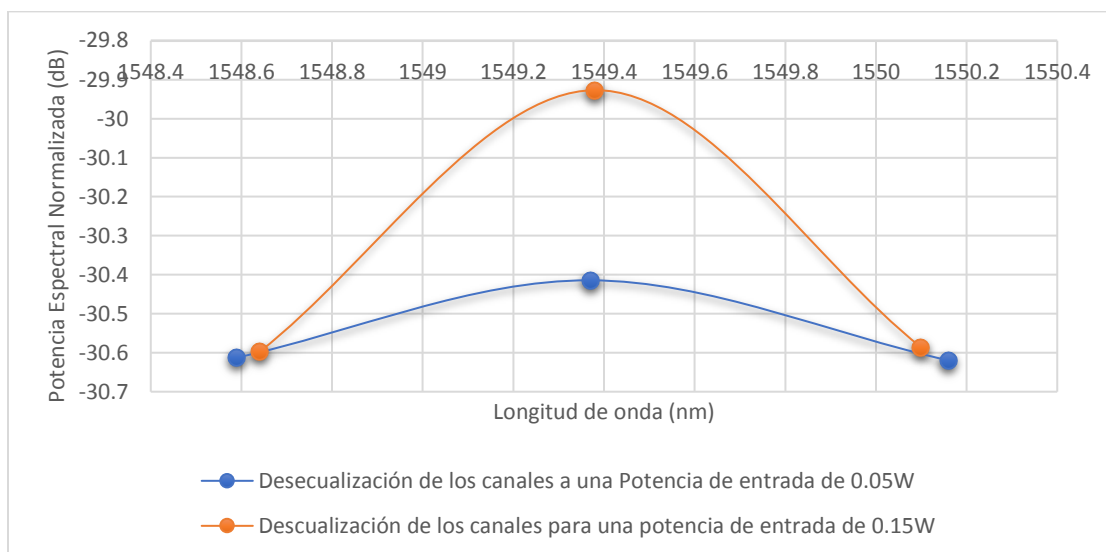


Figura 4.30: Análisis gráfico del comportamiento de la desecualización fijando una separación entre canales y a diferentes potencias.

Analicemos también el comportamiento de este sistema ahora con un enfoque en la desecualización (Δp), parámetro que definimos en el epígrafe anterior. La tabla XV muestra los valores obtenidos de repetir el experimento para diferentes potencias de la señal de entrada. La figura 4.31 describe gráficamente el comportamiento de la desecualización con respecto a la potencia de la señal de entrada.

Tabla XV. Datos del experimento de transmisión de 3 canales WDM a diferentes valores de potencia de entrada y un espaciamiento intercanal constante de 100GHz.

Potencia de Entrada (W)	Potencia Espectral Normalizada C1 (dB)	Potencia Espectral Normalizada C2 (dB)	Potencia Espectral Normalizada C3 (dB)	C2-C1	C2-C3	Δp
0.01	-30.8486	-30.8181	-30.8512	0.0305	0.0331	0.0318
0.05	-30.6125	-30.4144	-30.6197	0.1981	0.2053	0.2017
0.1	-30.4748	-29.992	-30.5096	0.4828	0.5176	0.5002
0.15	-30.5978	-29.9268	-30.5864	0.671	0.6596	0.6653

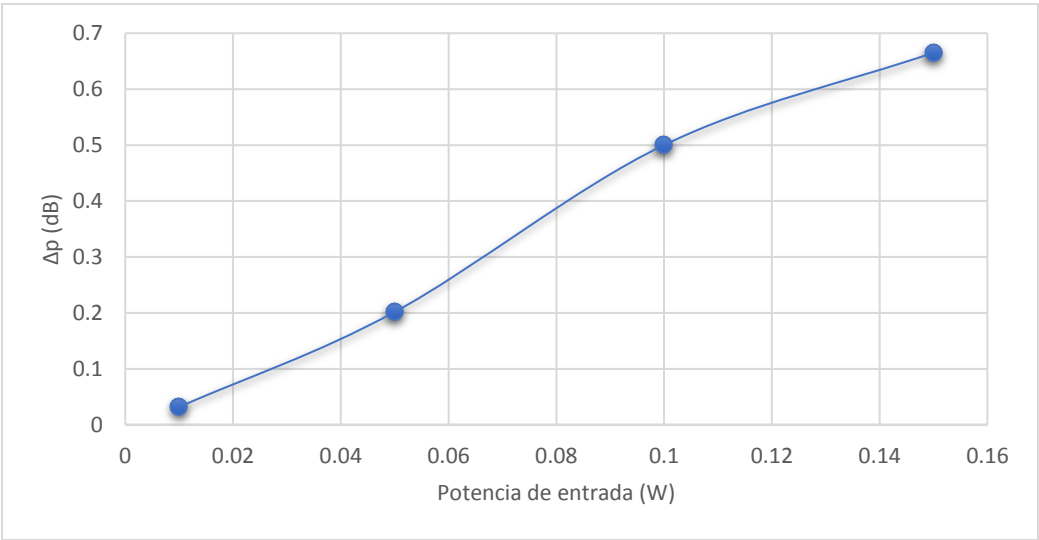


Figura 4.31: Potencia Entrada (W) vs Δp (dB)

Capítulo V: “Conclusiones”

Los experimentos realizados en este proyecto de investigación en el Laboratorio de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM dan una visión de forma práctica de los regímenes de operación y como afectan la eficiencia de un sistema de comunicaciones ópticas WDM parámetros como la potencia de la señal de entrada y la separación intercanal.

Como parte de la investigación se analizó experimentalmente el impacto de las no linealidades en la interferencia entre los canales ópticos WDM transmitidos en un sistema de fibra óptica. Para ello se empleó una fuente WDM con frecuencias inicialmente distanciadas a 200GHz, una potencia de aproximadamente 10 dBm y una distancia de fibra óptica de 2.3 km. Este experimento posibilita asumir como verídica la clasificación de la fibra óptica como medio no lineal, al visualizarse con estas condiciones efectos no lineales de mezclado de cuatro ondas.

Con una distancia de fibra óptica de 2.3 km se realizaron varios experimentos primero con 3 canales multiplexados y luego con tan solo dos, se fue variando la distancia entre canales para determinar qué relación existe entre este parámetro y la potencia pico de las señales espurias producto del fenómeno no lineal de mezclado de cuatro ondas. La relación entre ambos parámetros es inversa, a medida que disminuye la distancia intercanal aumenta la potencia de las señales producto del FWM.

El experimento a 2.3km permitió corroborar los resultados de un software desarrollado en Matlab para simular la inserción de la fuente WDM en la Delta Metropolitana. Luego de calibrada la simulación para 2.3km, se procedió a realizarla a una distancia de 103km y se agruparon un grupo de experimentos importantes para esta distancia de fibra.

A continuación, se presentan los aspectos más relevantes a considerar con base a los resultados del Capítulo 4 como parte del análisis de la investigación planteada en este trabajo de investigación:

- ✓ Se comprobó de forma experimental que la fibra óptica es un medio de comunicaciones no lineal.
- ✓ El régimen de operación de un sistema de comunicaciones ópticas WDM está definido principalmente por un umbral máximo de potencia pico de la señal de entrada y por un mínimo de separación entre los canales a diferentes longitudes de onda.
- ✓ A medida que la potencia de entrada se incrementa, las no linealidades aumentan de manera significativa, debido a que estas dependen en gran medida de la potencia de la señal de entrada. El máximo valor de potencia para una separación intercanal de 200GHz es de aproximadamente 0.4W o de 26 dBm. En el caso que el sistema requiera usar una separación intercanal de 100 GHz entonces el valor máximo de potencia recomendado es de 0.15W.

- ✓ Es importante cuidar la separación intercanal, este parámetro impacta de manera directa sobre el FWM y por lo tanto en la penalización en potencia. El valor mínimo para evitar una baja eficiencia del sistema WDM es de 100GHz, para potencias pico de señal de entrada de 0.01W, si se desea utilizar potencias mayores es recomendable aumentar la separación intercanal.
- ✓ Los canales WDM al propagarse por un medio óptico sufren una desecualización en potencia, proporcional al nivel de potencia pico de la señal de entrada y la separación intercanal.

Realizar la investigación de forma experimental casi en su totalidad y utilizando un software verídico, permitirá definir y proponer mejores diseños de redes WDM con mayores capacidades de transmisión al degradarse menos las señales WDM por causa de efectos no lineales. Además, sirve en gran medida para crear una plataforma de capacitación a los profesionales vinculados a las comunicaciones por fibra óptica.

Anexo 1: "Propagacion_canales_WDM_2300m"

```

clear all;
clc
format long;

#####
% PARÁMETROS DE ENTRADA

% DISCRETIZACIÓN EN DISTANCIA
distance=2.3;           %distancia de propagación en Km
step_num=2300;         %number of z steps
deltaz=distance/step_num; %STEP IN DISTANCE given in km

% DISCRETIZACIÓN EN TIEMPO
Tmax=14000;           %media ventana temporal de cálculo en ps
nt=2^16;              %puntos de la ventana temporal
dtau = (2*Tmax)/(nt); %valor de paso en el eje del tiempo TAU

%eje de tiempo "t" y eje de frecuencias "omega"
t=(-nt/2:nt/2-1)*dtau; %en ps
omega=(2*pi/(2*Tmax))*(-nt/2:nt/2-1); %en rad*Thz
nu=omega/(2*pi); %en Thz

% VECTOR DE LONGITUDES DE ONDA EN nm
lambda0=1550.17;      %en nm
c=3e5;                %velocidad de la luz en nm/ps
omega0=2*pi*c/lambda0; %en Thz

%vector de longitudes de onda
lambda=( omega/(2*pi*c)+1/lambda0).^-1; %en nm

#####
%CREANDO 3 CANALES WDM
c=3e5;                %velocidad de la luz en nm/ps
delta_nu=0.2;         %espaciamiento intercanal en THz (0.2THz = 200GHz -> 1.6nm)
delta_lambda=-(delta_nu)*(lambda0^2)/c; %espaciamiento intercanal en nm

%espaciamiento intercanal para 3 canales en Thz
delta_omega1=2*pi*(0*delta_nu);
delta_omega2=2*pi*(+1*delta_nu);
delta_omega3=2*pi*(+2*delta_nu);

%Creando filtros para cada canal WDM
index1=find( omega > delta_omega1-(2*pi)*delta_nu/2 & omega <
delta_omega1+(2*pi)*delta_nu/2 );
index2=find( omega > delta_omega2-(2*pi)*delta_nu/2 & omega <
delta_omega2+(2*pi)*delta_nu/2 );
index3=find( omega > delta_omega3-(2*pi)*delta_nu/2 & omega <
delta_omega3+(2*pi)*delta_nu/2 );

#####
%CAMPO DE ENTRADA

%Potencia pico en Watts
peak=0.010;

%Chirp
C=0;

%Tipo de pulso supergaussiano
m=1;

```

```

%Ancho inicial del pulso en ps
T0 = 20;

%Creando un solo pulso para cada canal WDM
U1= sqrt(peak)*exp(-0.5*(t/T0).^(2*m)).*exp(-0.5*1i*C*(t/T0).^(2*m)).*exp(-
1i*(delta_omega1)*t);
U2= sqrt(peak)*exp(-0.5*(t/T0).^(2*m)).*exp(-0.5*1i*C*(t/T0).^(2*m)).*exp(-
1i*(delta_omega2)*t);
U3= sqrt(peak)*exp(-0.5*(t/T0).^(2*m)).*exp(-0.5*1i*C*(t/T0).^(2*m)).*exp(-
1i*(delta_omega3)*t);

%CAMPO DE ENTRADA EN ESPACIO TEMPORAL
U = U1 + U2 + U3; % tres canales encendidos
%U = U1 + U2;      %canales 1 y 2 encendidos

U_ini = U;

%CAMPO DE ENTRADA EN ESPACIO DE FOURIER
U_fourier_ini = abs(fftshift(iffshift(iffshift(U_ini))).*(nt*dtau)/sqrt(2*pi)).^2;
Max_fourier_ini = max(U_fourier_ini);

%GRAFICANDO CAMPO DE ENTRADA NORMALIZADO SOLO PARA EL CANAL WDM 1
figure(1)
plot(t,(abs(U1).^2)/max(abs(U1).^2),'-k','linewidth',2.5);
xlabel('time (ps units)');
ylabel('Normalised power');
grid on

%GRAFICANDO CAMPO DE ENTRADA EN ESCALA DE DECIBELES (dB) NORMALIZADO

%Límite de corte en dB
dB=10;

for l=1:1:nt
    if U_fourier_ini(l)<Max_fourier_ini*10^-dB %esta condición impone el
corte en dB
        U_fourier_ini(l)=Max_fourier_ini*10^-dB;
    end
end

figure(2)
plot(lambda,10*log10(U_fourier_ini/Max_fourier_ini),'-r','linewidth',2.5);
xlabel('Wavelength (nm)');
ylabel('Normalized spectral power');
grid on

%
%Alrededor de 1550nm
beta2=-21; %en ps^2/km
beta3=0.128; %in ps^3/km
gamma=2; %en 1/W*Km

%Atenuación
loss_fiber=0.2; %in dB/km
loss_connectors=0.5; %db
alpha=loss_fiber/4.343; %in 1/km

#####
%CICLO INTERATIVO PRINCIPAL

%ESQUEMA: 1/2*N -> D -> 1/2*N

```

```

U=ifftshift(U);
omega=ifftshift(omega);
nu=ifftshift(nu);

for n=1:step_num

    n

    %%BEGIN 1/2*N
    N = 1i*gamma*( U.*conj(U) ); %OPERADOR NOLINEAL N
    U = U.*exp(0.5*deltaz*N);

    %%BEGIN D
    D = 1i*(1/2)*beta2*omega.^2 + 1i*(1/6)*beta3*omega.^3; %OPERADOR LINEAL D
    u = ifft(U).*exp(D*deltaz);

    %%Calculando valores máximos de cada canal WDM
    u_power = u;
    u_power = abs( fftshift(u_power)*(nt*dtau)/sqrt(2*pi) ).^2;
    %Power Spectrum
    max_WDM(n,:) = [ max(u_power(index1)) max(u_power(index2))
                    max(u_power(index3)) ];

    if n==2300
        loss=loss_fiber*2.3 + loss_connectors;
        u=u.*exp(-0.5*loss/4.343);
    end

    U = fft(u);

    %%BEGIN 1/2*N
    N = 1i*gamma*( U.*conj(U) ); %OPERADOR NOLINEAL N
    U = U.*exp(0.5*deltaz*N);

end
%FIN DE CICLO PRINCIPAL

#####
%GRAFICANDO CAMPO FINAL EN ESCALA DE DECIBELES (dB)

%Campo final en tiempo
U_fin = fftshift(U);
omega = fftshift(omega);
nu     = fftshift(nu);

%Campo final en Fourier (Power Spectrum)
U_fourier_fin = abs(fftshift(iff(iffshift(U_fin)))).*(nt*dtau)/sqrt(2*pi)).^2;

%Límite de corte en dB
dB=10;

for l=1:1:nt
    if U_fourier_fin(l)<Max_fourier_ini*10^-dB %esta condición impone el
corte en dB
        U_fourier_fin(l)=Max_fourier_ini*10^-dB;
    end
end

figure(3)
plot(lambda,10*log10(U_fourier_fin/Max_fourier_ini), '-b','linewidth', 2.5);
xlabel('Wavelength (nm)');
ylabel('Normalized spectral power (dB)');
grid on

```

```

figure(4)
plot(lambda,10*log10(U_fourier_ini/Max_fourier_ini), '-
r',lambda,10*log10(U_fourier_fin/Max_fourier_ini),'-b','linewidth', 2.5);
xlabel('Wavelength (nm)');
ylabel('Normalized spectral power (dB)');
grid on

z=(1:step_num)*deltaz;

figure(5);
plot( z, 10*log10(max_WDM(:,1)'/Max_fourier_ini),'ob', z,
10*log10(max_WDM(:,2)'/Max_fourier_ini),'-k', z,
10*log10(max_WDM(:,3)'/Max_fourier_ini),'xr', 'linewidth', 1.5);
xlabel('Distance (km)');
ylabel('Maximum (dB)');
grid on;

```

Anexo 2: “Propagacion_canales_WDM_103km”

```

clear all;
clc
format long;

#####
% PARÁMETROS DE ENTRADA

% DISCRETIZACIÓN EN DISTANCIA
distance=103;           %distancia de propagación en Km
step_num=103000;      %number of z steps
deltaz=distance/step_num; %STEP IN DISTANCE given in km

% DISCRETIZACIÓN EN TIEMPO
Tmax=14000;           %media ventana temporal de cálculo en ps
nt=2^16;              %puntos de la ventana temporal
dtau = (2*Tmax)/(nt); %valor de paso en el eje del tiempo TAU

%eje de tiempo "t" y eje de frecuencias "omega"
t=(-nt/2:nt/2-1)*dtau; %en ps
omega=(2*pi/(2*Tmax))*(-nt/2:nt/2-1); %en rad*Thz
nu=omega/(2*pi); %en Thz

% VECTOR DE LONGITUDES DE ONDA EN nm
lambda0=1550.17;      %en nm
c=3e5;                %velocidad de la luz en nm/ps
omega0=2*pi*c/lambda0; %en Thz

%vector de longitudes de onda
lambda=( omega/(2*pi*c)+1/lambda0).^(-1); %en nm

#####
%CREANDO 3 CANALES WDM
c=3e5;                %velocidad de la luz en nm/ps
delta_nu=0.2;         %espaciamiento intercanal en THz (0.2THz = 200GHz -> 1.6nm)
delta_lambda=-(delta_nu)*(lambda0^2)/c; %espaciamiento intercanal en nm

%espaciamiento intercanal para 3 canales en Thz
delta_omega1=2*pi*(0*delta_nu);
delta_omega2=2*pi*(+1*delta_nu);
delta_omega3=2*pi*(+2*delta_nu);

%Creando filtros para cada canal WDM
index1=find( omega > delta_omega1-(2*pi)*delta_nu/2 & omega <
delta_omega1+(2*pi)*delta_nu/2 );
index2=find( omega > delta_omega2-(2*pi)*delta_nu/2 & omega <
delta_omega2+(2*pi)*delta_nu/2 );
index3=find( omega > delta_omega3-(2*pi)*delta_nu/2 & omega <
delta_omega3+(2*pi)*delta_nu/2 );

#####
%CAMPO DE ENTRADA

%Potencia pico en Watts
peak=0.063;

%Chirp
C=0;

%Tipo de pulso supergaussiano
m=1;

```

```

%Ancho inicial del pulso en ps
T0 = 10;

%Creando un solo pulso para cada canal WDM
U1= sqrt(peak)*exp(-0.5*(t/T0).^2)*exp(-0.5*1i*C*(t/T0).^2)*exp(-
1i*(delta_omega1)*t);
U2= sqrt(peak)*exp(-0.5*(t/T0).^2)*exp(-0.5*1i*C*(t/T0).^2)*exp(-
1i*(delta_omega2)*t);
U3= sqrt(peak)*exp(-0.5*(t/T0).^2)*exp(-0.5*1i*C*(t/T0).^2)*exp(-
1i*(delta_omega3)*t);

%CAMPO DE ENTRADA EN ESPACIO TEMPORAL
%U = U1 + U2 + U3;
U = U1 + U2; %canales 1 y 2 encendidos
U_ini = U;

%CAMPO DE ENTRADA EN ESPACIO DE FOURIER
U_fourier_ini = abs(fftshift(iffshift(fftshift(U_ini))))*(nt*dtau)/sqrt(2*pi)).^2;
Max_fourier_ini = max(U_fourier_ini);

%GRAFICANDO CAMPO DE ENTRADA NORMALIZADO SOLO PARA EL CANAL WDM 1
figure(1)
plot(t, (abs(U1).^2)/max(abs(U1).^2), '-k', 'linewidth', 2.5);
xlabel('time (ps units)');
ylabel('Normalised power');
grid on

%GRAFICANDO CAMPO DE ENTRADA EN ESCALA DE DECIBELES (dB) NORMALIZADO

%Límite de corte en dB
dB=10;

for l=1:1:nt
    if U_fourier_ini(l)<Max_fourier_ini*10^-dB %esta condición impone el
corte en dB
        U_fourier_ini(l)=Max_fourier_ini*10^-dB;
    end
end

figure(2)
plot(lambda, 10*log10(U_fourier_ini/Max_fourier_ini), '-r', 'linewidth', 2.5);
xlabel('Wavelength (nm)');
ylabel('Normalized spectral power');
grid on

%
%alrededor de 1550nm
beta2=-21; %en ps^2/km
beta3=0.128; %en ps^3/km
gamma=2; %en 1/W*Km

%atenuacion
loss=0.18; %en dB/km
alpha=loss/4.343; %en 1/km

#####
%CICLO INTERATIVO PRINCIPAL
%ESQUEMA: 1/2*N -> D -> 1/2*N

U=ifftshift(U);
omega=ifftshift(omega);
nu=ifftshift(nu);

```

```

for n=1:step_num

    n

    %%BEGIN 1/2*N
    N = 1i*gamma*( U.*conj(U) ); %OPERADOR NOLINEAL N
    U = U.*exp(0.5*deltaz*N);

    %%BEGIN D
    D = 1i*(1/2)*beta2*omega.^2 + 1i*(1/6)*beta3*omega.^3; %OPERADOR LINEAL D
    u = ifft(U).*exp(D*deltaz);%.*exp(-0.5*alpha*deltaz);

    %%Calculando valores máximos de cada canal WDM
    u_power = u;
    u_power = abs( fftshift(u_power)*(nt*dtau)/sqrt(2*pi) ).^2; %Power
Spectrum
    max_WDM(n,:) = [ max(u_power(index1)) max(u_power(index2))
max(u_power(index3)) ];

    %%Ingresando pérdidas
    if n==0
        loss1=0.695;
        u=u.*exp(-0.5*loss1/4.343);
    end

    if n==3899
        loss2=0.709 + 0.322;
        u=u.*exp(-0.5*loss2/4.343);
    end

    if n==5691
        loss3=0.763 + 7.337;
        u=u.*exp(-0.5*loss3/4.343);
    end

    if n==36026
        loss4=1.824 + 6.485;
        u=u.*exp(-0.5*loss4/4.343);
    end

    if n==64264
        loss5=2.054 + 0.834;
        u=u.*exp(-0.5*loss5/4.343);
    end

    if n==67791
        loss6=0.115 + 1.599;
        u=u.*exp(-0.5*loss6/4.343);
    end

    if n==75586
        loss7=0.317 + 3.859;
        u=u.*exp(-0.5*loss7/4.343);
    end

    if n==90960
        loss8=0.487 + 0.929;
        u=u.*exp(-0.5*loss8/4.343);
    end

    if n==98520
        loss9=1.600 + 1.686;
        u=u.*exp(-0.5*loss9/4.343);
    end

```

```

        end

        U = fft(u);

        %%BEGIN 1/2*N
        N = 1i*gamma*( U.*conj(U) ); %OPERADOR NOLINEAL N
        U = U.*exp(0.5*deltaz*N);

    end
%FIN DE CICLO PRINCIPAL

#####
%GRAFICANDO CAMPO FINAL EN ESCALA DE DECIBELES (dB)

%Campo final en tiempo
U_fin = fftshift(U);
omega = fftshift(omega);
nu     = fftshift(nu);

%Campo final en Fourier (Power Spectrum)
U_fourier_fin = abs(fftshift(iff(iffshift(U_fin)))).*(nt*dtau)/sqrt(2*pi)).^2;

%Límite de corte en dB
dB=10;

for l=1:1:nt
    if U_fourier_fin(l)<Max_fourier_ini*10^-dB %esta condición impone el
corte en dB
        U_fourier_fin(l)=Max_fourier_ini*10^-dB;
    end
end

figure(3)
plot(lambda,10*log10(U_fourier_fin/Max_fourier_ini), '-b','linewidth', 2.5);
xlabel('Wavelength (nm)');
ylabel('Normalized spectral power (dB)');
grid on

figure(4)
plot(lambda,10*log10(U_fourier_ini/Max_fourier_ini), '-
r',lambda,10*log10(U_fourier_fin/Max_fourier_ini),'-b','linewidth', 2.5);
xlabel('Wavelength (nm)');
ylabel('Normalized spectral power (dB)');
grid on

z=(1:step_num)*deltaz;

figure(5);
plot( z, 10*log10(max_WDM(:,1)'/Max_fourier_ini),'ob', z,
10*log10(max_WDM(:,2)'/Max_fourier_ini),'-k', z,
10*log10(max_WDM(:,3)'/Max_fourier_ini),'xr', 'linewidth', 1.5);
xlabel('Distance (km)');
ylabel('Maximum (dB)');
grid on;

```


Referencias Bibliográficas

- [1] I. Roudas, *WDM Systems and Networks*. 2012.
- [2] G. . Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems (3rd ed, 2002)*, vol. 6. 2002.
- [3] ITU-T, “G.694.1 (02/2012), Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid,” *Ser. G.694.1*, pp. 1–16, 2012, [Online]. Available: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en%5Cnhttp://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I/en>.
- [4] M. S. Borella, J. P. Jue, D. Banerjee, B. Ramamurthy, and B. Mukherjee, “Optical components for WDM lightwave networks,” *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 8, pp. 1274–1307, 1997, doi: 10.1109/5.622506.
- [5] S. V. Kartalopoulos, *Introduction to DWDM Technology*, no. 6387. 2010.
- [6] A. Stavdas, “Optical Multiplexing and Demultiplexing,” pp. 1748–1758, 1998.
- [7] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, and G. H. Sasaki, *Optical networks*. 2010.
- [8] H. Ordóñez and J. P. Agredo, “Nonlinear Effects and their Relationship to a WDM Network Transmission ’ s Parameters,” *Rev. Fac. Ing. UPTC*, vol. 20, no. 31, pp. 23–35, 2011, doi: 10.1016/j.cden.2012.05.008.
- [9] B. Chomycz, *Planning Fiber Optic Networks*. New York: McGraw-Hill, 2009.
- [10] G. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*. 2013.
- [11] G. Nava-Heredia, S. M. Castro-Resines, A. Fernández-Alcántara, and R. Gutiérrez-Castrejón, “Design and feasibility analysis of the physical layer for the academic WDM ring of Mexico City,” *2009 6th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Sci. Autom. Control. CCE 2009*, no. Cce, pp. 393–398, 2009, doi: 10.1109/ICEEE.2009.5393378.
- [12] Corning Product Information, “Corning SMF-28 Ultra Optical Fiber,” no. November, pp. 1–2, 2014, [Online]. Available: <http://www.corning.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=65789>.
- [13] LANCAD, “Conectividad – LANCAD.” http://www.lancad.mx/?page_id=123 (accessed Jun. 12, 2020).
- [14] CUDI, “<http://www.cudi.edu.mx>,” 2011. http://www.cudi.edu.mx/primavera_2011/presentaciones/DELTA.pdf.
- [15] EXFO, “RTU-720.”
- [16] N. A. N. Quiroz, “Monitoreo a nivel capa física de una red de transporte por fibra óptica en la Ciudad de México.” Ciudad de México, 2017.
- [17] EXFO, “Ftb-5500B/FTB-5800 datasheet,” 2019. [Online]. Available: <https://www.exfo.com/umbraco/surface/file/download/?ni=10911&cn=&pi=5427>.
- [18] ALMA LAboratorios, “Red Delta. Informe de caracterización de dispersión

cromática puerto 71 de enlace de fibra óptica,” 2017.

- [19] EXFO, “FTB-5800 | Chromatic Dispersion Test | Phase-Shift Method.”
<https://www.exfo.com/es/productos/pruebas-de-redes-de-campo/analisis-de-dispersion/ftb-5800/> (accessed Aug. 23, 2020).
- [20] “OEQuest - Equipment - DFB Laser Source Bank - DFB Sources Bank, DWDM, 4 to 80 Wavelength Channels - 4 Channel DFB Laser Source, Benchtop, 20mW Output, SM Connector.”
<https://www.oquest.com/getproduct/20067/home.php?cat=1284> (accessed Aug. 23, 2020).
- [21] Optilab, “DFB-4-B,” 2017.
- [22] “Fiber Optical Mux Demux Module - DWDM 200GHz, oeMarket.com.”
http://www.oemarket.com/catalog/product_info.php/fiber-optical-mux-demux-module-dwdm-200ghz-p-94 (accessed Aug. 24, 2020).
- [23] “MATLAB Online R2020b.” <https://matlab.mathworks.com/> (accessed Sep. 28, 2020).