



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SISTEMA PARA LA INTEGRACIÓN ÓPTIMA
DE SÚPER CANALES EN REDES ÓPTICAS FLEXIBLES**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

FERNANDA VENTURA CHÁVEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. RAMÓN GUTIÉRREZ CASTREJÓN



CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE 2014

DEDICATORIA

A Dios, por ponerme en el camino que recorro.

A Fabiola, por guiarme y amarme siempre.

A Nando, por alumbrar cada sendero.

A Naihomy, por andar conmigo cada travesía.

Al Dr. Ramón, por ser parte importante de los últimos pasos que he dado.

A mi familia y amigos, por formar parte de mi vida.

Resumen

La demanda de capacidad en los sistemas de comunicaciones es un problema actual que surge debido al incremento en producción de información digital a todos los niveles y debido al vertiginoso incremento de aplicaciones informáticas que hacen del uso de las redes de datos. En comunicaciones ópticas, las redes ópticas contemporáneas necesitan evolucionar para suplir dicha demanda, es por ello que se ha planteado como solución el uso de las redes ópticas flexibles. Es decir, redes que se adaptan en tiempo real al tráfico de la red, según la demanda. Dicha solución conlleva la modificación de los sistemas de comunicaciones ópticos convencionales basados en tecnología WDM, siendo el transmisor óptico un elemento fundamental del sistema. Para la óptima configuración de dicho transmisor, se requiere un algoritmo que con base en parámetros de entrada como número de canales, alcance y tasa de transmisión de los mismos, realice un proceso de maximización de la eficiencia espectral del (así llamado) súper-canal.

En esta tesis se desarrolló un algoritmo que realiza la selección óptima de parámetros a emplear en un transmisor óptico de ancho de banda variable que será utilizado en la implementación de súper canales en sistemas de comunicaciones de siguiente generación basados en fibra óptica. Con base en los parámetros de entrada mencionados, el algoritmo indica el esquema de modulación que debe emplear la señal de cada canal que formará el súper-canal, de entre cuatro esquemas avanzados de modulación disponibles (DP-BPSK, DP-QPSK, DP-8QAM y DP-16QAM), y el número de ranuras en frecuencia necesarias de acuerdo a la recomendación G.694.1 de la ITU-T. La selección de parámetros se lleva a cabo por medio de tres rutas de optimización que buscan incrementar la eficiencia espectral del sistema, denominadas simple, *spans* y multisubcanales. El algoritmo realizado fue implantado en un lenguaje de programación gráfico por medio del *software* LabVIEW.

Tal como demuestran los resultados, la capacidad de análisis del algoritmo propuesto permite estudiar diferentes escenarios de configuración durante el proceso de diseño de una red de comunicaciones, por lo que es una herramienta muy poderosa en el diseño de sistemas ópticos.

Abstract

The increased demand for capacity in communication systems is an ongoing problem that arises due to the production of digital information at all levels, and because of the rapid growth in the number of applications that make use of data networks. In optical communications, current optical networks need to evolve to meet this demand. An interesting solution that has been recently proposed is the use of flexible optical networks. In other words, networks that adapt in real-time to the network traffic, according to demand. This solution involves modification of the conventional optical communications systems based on WDM technology, with the optical transmitter being a key element of the system. To optimally configure such transmitter, an algorithm based on input parameters such as link length, number of channels and bit rate has to be developed to maximize maximizing the spectral efficiency of the (so called) super channel.

This thesis work presents the development of an algorithm that optimally selects parameters for an optical variable bandwidth transponder that will be used in the implementation of super-channels in next generation fiber optic communication systems. Based on the input parameters mentioned above, the algorithm indicates, for each channel, the modulation scheme that should be used to form the super-channel. It chooses from four advanced modulation schemes available (DP-BPSK, DP-QPSK, DP- 8QAM and DP-16QAM), and delivers the required number of frequency slots according to the ITU-T G.694.1 Recommendation. The selection of the parameters is performed through three optimization routes to increase the spectral efficiency of the system, called simple, spans and multi-subchannels. The algorithm developed was implemented in a graphical programming language through LabVIEW.

According to the results, the proposed algorithm allows the analysis of different configuration scenarios during the design process of a communication network, therefore it is a very powerful tool in the design of optical systems.

Contenido

CAPÍTULO 1. MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA	7
1.1 Introducción	7
1.2 Transmisor Óptico	8
1.2.1 Fuente	8
1.2.2 Moduladores	9
1.2.2.1 Formatos de Modulación	9
1.3 Multiplexor / Demultiplexor	12
1.4 Amplificadores Ópticos	14
1.5 Receptor Óptico	14
1.5.1 Fotodetector	15
1.5.2 Detección Directa	16
1.5.3 Detección Coherente	16
1.5.4 Demoduladores	17
1.6 Optical Add-Drop Multiplexer	18
CAPÍTULO 2. REDES ÓPTICAS FLEXIBLES: ESTADO DEL ARTE	20
2.1 Surgimiento de las Redes Ópticas Flexibles	20
2.2 Cambios en Redes Ópticas Actuales	22
2.2.1 Grid Flexible	22
2.2.2 Transceptores Ópticos de Ancho de Banda Variable	24
2.2.2.1 Transceptores Ópticos Segmentados de Ancho de Banda Variable	24
2.2.2.2 Formatos de Modulación	25
2.2.2.3 Súper Canales	26
2.2.2.4 Estrategias para la Implementación de Súper Canales	27
2.2.3 ROADMs Elásticos	30
2.2.4 Desfragmentación de Espectro y Algoritmos de Asignación de Espectro	34
CAPÍTULO 3. ALGORITMO PARA LA INTEGRACIÓN ÓPTIMA DE SÚPER CANALES	38
3.1 Consideraciones en el Desarrollo del Algoritmo	38
3.2 Parámetros para el Proceso de Optimización	41
3.3 Decisiones para el Proceso de Optimización	45
3.3.1 Solución Simple	45
3.3.2 Solución Spans	47

3.3.3 Solución de Multisubcanales	48
3.3.4 Alcance del Proceso de Optimización	50
3.4 Implementación del Algoritmo en un Lenguaje Gráfico de Programación: NI LabVIEW	50
3.4.1 Integrador de Súper Canales: Panel Frontal	51
3.4.2 Integrador de Súper Canales: Diagrama de Bloques	52
CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL ALGORITMO Y RESULTADOS	55
4.1 Validación del Algoritmo	55
4.2 Resultados	59
4.2.1 Súper-Canal de Ocho Canales	59
4.2.2 Súper-Canal de Nueve Canales	62
4.2.3 Súper-Canal de Diez Canales	65
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	69
5.1 Conclusiones	69
5.2 Trabajo a Futuro	70

CAPÍTULO 1. MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA

1.1 Introducción

Actualmente, el incremento del tráfico de información digital es abrumador y con ello las necesidades de un ancho de banda mayor surgen día a día de acuerdo con el estilo de vida que vamos adoptando. La exigencia de una mayor capacidad de la red se debe a que cada vez son más y más los usuarios de internet y sus aplicaciones tales como hacer llamadas telefónicas, enviar correos electrónicos, teclear algunas palabras en algún buscador web, comprar con tarjetas de crédito y un sinfín de ejemplos más, donde la producción de información digital se lleva a cabo y debe ser entregada al usuario final, en el momento adecuado y sin errores para que sea útil [1].

Es por ello que los sistemas basados en fibra óptica tienen un papel crucial hoy en día, al ofrecer entre otras ventajas, mayor capacidad que los sistemas basados en comunicación por ondas de radiofrecuencia y sistemas de comunicaciones basados en otros medios guiados de transmisión. Un enlace de fibra óptica puede fácilmente ofrecer tasas de transmisión del orden de terabits por segundo (Tbps) gracias al amplio ancho de banda que dicho medio posee, incluso la tasa de transmisión puede llegar a 10 Tbps haciendo uso de técnicas de multiplexaje [2]. La más eficiente de estas técnicas es la Multiplexación por División de Longitud de Onda (*Wavelength Division Multiplexing*, WDM). Este revolucionario método fue introducido a inicio de la década de los 90 con la cuarta generación de sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica, popularizándose durante los años siguientes [3].

WDM es un método utilizado en los sistemas ópticos de comunicación para incrementar su capacidad de transmisión, donde se transmiten diferentes señales portadoras moduladas, cada una de ellas a diferente longitud de onda, para, posteriormente, multiplexarlas y obtener una sola señal óptica; es decir, los sistemas WDM permiten transportar varios canales en una misma fibra. El empleo de sistemas WDM se traduce en una reducción en el número de fibras ópticas a emplear y por lo tanto en reducción del equipo requerido, teniendo un desempeño similar al que se obtendría usando enlaces punto a punto [4].

La figura 1.1 muestra un diagrama de bloques con los componentes esenciales de un sistema WDM para un enlace punto a punto. Como en todo sistema de comunicaciones existe un transmisor y un receptor, el medio de transmisión en este caso es la fibra óptica, además se emplea un multiplexor y un demultiplexor, que son partes fundamentales en los sistemas WDM. Si es necesario pueden incluirse amplificadores ópticos.

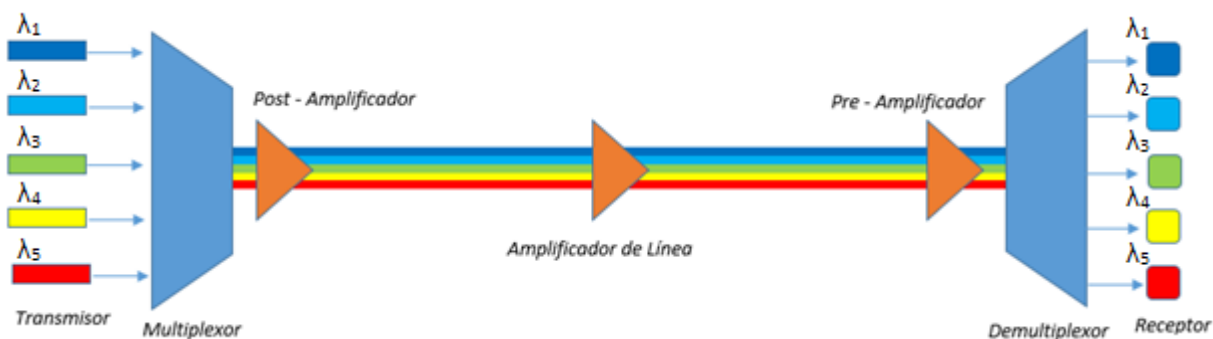


Figura 1.1 Diagrama de bloques básico de un sistema WDM.

1.2 Transmisor Óptico

El transmisor óptico tiene la función de convertir la señal eléctrica de información en una señal óptica y adaptarla al medio de transmisión. La figura 1.2 muestra el diagrama de bloques de un transmisor óptico; consiste en una fuente óptica, que es el corazón del transmisor, un modulador cuya función es modificar al menos un parámetro de la señal portadora y un acoplador de canal para adaptar con la mayor eficiencia posible la señal óptica a la fibra [3] [5].

Para un sistema WDM el transmisor está compuesto por arreglos de fuentes, cada una con su respectivo modulador y acoplador. Dependiendo del número de señales a multiplexar, será el tamaño del arreglo.

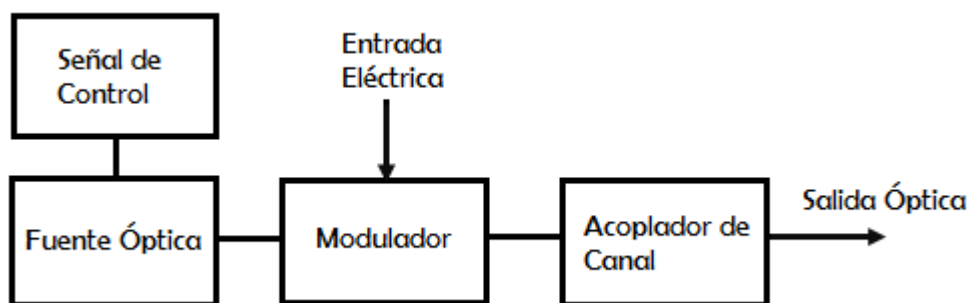


Figura 1.2 Componentes de un transmisor óptico [3].

1.2.1 Fuente

Las características que debe cumplir la fuente del transmisor son:

- Potencia de salida razonablemente alta. Para sistemas WDM la potencia de salida de la fuente se encuentra en un intervalo de 0 a 10 dBm.
- Ancho espectral estrecho. Esto permite que el espacio entre canales sea pequeño y reduce el efecto de la dispersión cromática de la fibra sobre los pulsos que se propagan.

- Estabilidad de longitud de onda. La desviación de longitud de onda emitida por la fuente durante su vida útil debe ser pequeña comparada con el espaciamiento que existe entre señales adyacentes [1].

Como fuentes del sistema tenemos diodos láser, pues cumplen con las características anteriormente mencionadas. A diferencia de los LEDs, los láseres tienen un ancho espectral estrecho. Cada láser transmite su flujo de información a una longitud de onda diferente establecida al momento de ser fabricado para luego ser modulada y finalmente inyectada a una fibra óptica. La longitud de onda emitida por cada láser debe cumplir con la estandarización establecida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones para los sistemas WDM [2]. La recomendación ITU-T G.694.1 sugiere utilizar como frecuencia de referencia 193.1 THz. Tomando en cuenta el número de canales, así como el espacio entre ellos, se establece una tabla que contiene las diferentes frecuencias con sus correspondientes longitudes de onda para ser usadas en el sistema, esta tabla es llamada *grid* [6].

1.2.2 Moduladores

La función principal del modulador es variar de forma controlada algún parámetro de la señal portadora de acuerdo con la señal de información que se desea transmitir, esto es conocido como modulación. En un sentido más general, la modulación también incluye la codificación para evitar que se produzcan errores en la información que se desea enviar [7].

Existen dos tipos de modulaciones. La primera de ellas es la Modulación Directa del Láser (*Directly Modulated Lasers*, DML), esta tecnología es la más simple para enviar información a una longitud de onda deseada, ya que se obtiene al variar la corriente de polarización del láser de acuerdo con el flujo de pulsos ópticos deseados. Debido a la limitación en la velocidad de conmutación de la circuitería eléctrica, dichos dispositivos no son comúnmente usados en sistemas WDM. La segunda tecnología es conocida como modulación externa. Aquí la onda continua generada por el láser es introducida a un modulador externo que se encarga de modificar la señal de acuerdo al flujo de pulsos ópticos deseados. Típicamente podemos encontrar Moduladores Externos de Electro Absorción (*Electro-Absorption Modulators*, EAMs) y moduladores externos basados en Interferómetros Mach-Zehnder (*Mach-Zehnder Interferometer Modulator*, MZMs). La modulación externa es la que se utiliza más frecuentemente en sistemas WDM, ya que puede soportar tasas de transmisión mayores a 40 Gbps [8].

1.2.2.1 Formatos de Modulación

Como se mencionó, la modulación es el proceso por el cual una señal de información es plasmada en una señal portadora. En el caso de comunicaciones ópticas esta señal portadora es un haz de luz, a la cual se le modifica uno o más parámetros. Al resultado de este proceso se le denomina formato o esquema de modulación. El más sencillo de ellos es *On-Off Keying* (OOK) y todas las variedades que presenta, donde el haz de luz del láser es encendido o apagado cuando se tiene un 1 o 0 lógico, respectivamente. Este formato de modulación es ideal cuando se tienen velocidades de hasta 40 Gbps, pero cuando los requerimientos de nuestro sistema son mayores debemos usar formatos de modulación complejos [8]

[9]. Gracias a que la luz tiene más parámetros que solamente la amplitud usada para el formato de modulación OOK, se presentan más grados de libertad para poder codificar la información [10].

Si en la señal portadora modificamos la fase dejando la amplitud constante, lo que tenemos es un formato de modulación denominado Modulación por Desplazamiento de Fase (*Phase-Shift Keying*, PSK). Cabe mencionar que en este esquema la información se encuentra en la fase, pues es el parámetro que estamos modificando en la señal. La Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (*Binary Phase-Shift Keying*, BPSK) es la más simple dentro de PSK, donde existen dos posibles valores de fase separados 180° uno del otro, el primero para un 1 lógico y el segundo para un 0 lógico. Los formatos mencionados pueden ser representados en lo que se conoce como un diagrama de constelación. Un ejemplo de ellos se presenta en la figura 1.3. . Un diagrama de constelación es la representación en el plano complejo del campo eléctrico de la señal modulada. Se conforma de dos ejes: el eje horizontal, denominado *I* (por *In-Phase*), para representar la parte real de la señal, y el eje vertical, denominado *Q* (por *Quadrature*), para figurar su componente compleja. Por lo tanto, cada punto en el diagrama es denominado punto de constelación y representa un símbolo del formato de modulación. De la misma forma que OOK, este esquema es capaz de codificar solamente dos bits, y es usado en enlaces con velocidades de transmisión menores a 100 Gbps, pero puede emplearse en redes de Ultra Larga Distancia (*Ultra Long-Haul*). Dentro de las modulaciones de fase existe también la Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial (*Differential Phase-Shift Keying*, DPSK), que de forma similar a BPSK puede codificar dos bits.

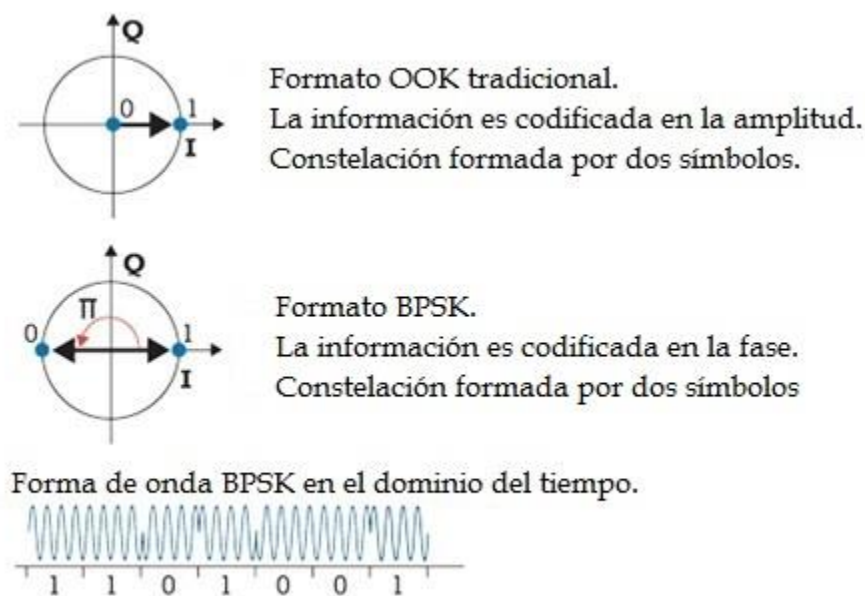


Figura 1.3 Representación gráfica de los formatos de Modulación OOK y BPSK [11].

Existen esquemas de modulación de fase aún más complejos, como la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (*Quadrature Phase-Shift Keying*, QPSK) y la Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial en Cuadratura (*Differential Quadrature Phase-Shift Keying*, DQPSK). Dichos esquemas son usados para transmisiones de alta velocidad con un espaciamiento entre canales de 50 GHz [9]. Por ejemplo, QPSK al ser un formato de modulación en cuadratura tiene cuatro símbolos, cada uno de ellos codifica 2 bits. Los símbolos adyacentes difieren en fase 90° uno del otro, manteniendo una amplitud constante. Los cuatro símbolos se reflejan mediante dos ondas de amplitud constante pero diferente fase.

QPSK permite así, enviar la información a doble velocidad que OOK o BPSK en el mismo ancho de banda o enviar con la misma tasa de transmisión requiriendo sólo la mitad del ancho de banda. Por lo anterior, QPSK es adecuado para enviar datos a 100 Gbps. La representación gráfica de QPSK se observa en la figura 1.4.

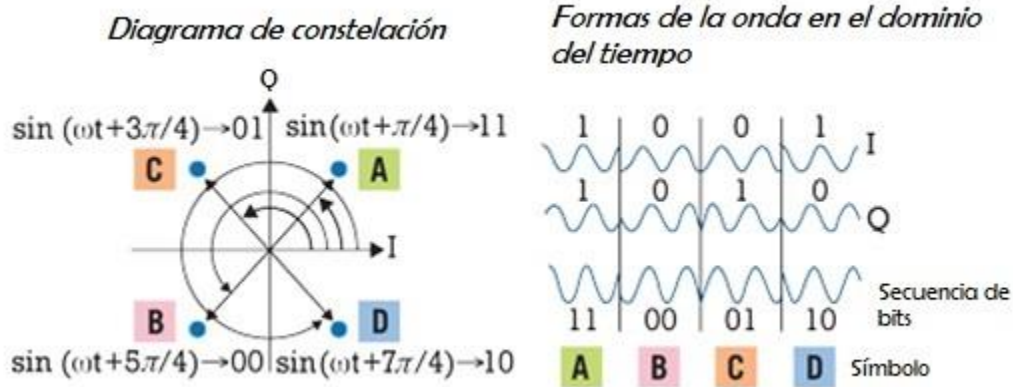


Figura 1.4 Representación gráfica del formato de modulación QPSK [10].

Existen esquemas de modulación donde la información no solo se encuentra en la fase, sino también en la amplitud. Tal es el caso de la Modulación de Amplitud en Cuadratura (*Quadrature Amplitude Modulation*, QAM), que puede ser usada para transmitir a altas velocidades. En este esquema de modulación los puntos de su constelación están más separados unos de otros a diferencia de los mencionados anteriormente, como consecuencia tenemos una señal menos susceptible tanto al ruido como a distorsiones. En comunicaciones ópticas la versión básica a usar de QAM es 16-QAM, pero existen esquemas superiores como 256-QAM. En 16-QAM cuatro bits conforman un símbolo, los dieciséis puntos de la constelación están distribuidos como se muestra en la figura 1.5. La distribución de los símbolos es de acuerdo al código Gray para minimizar errores.

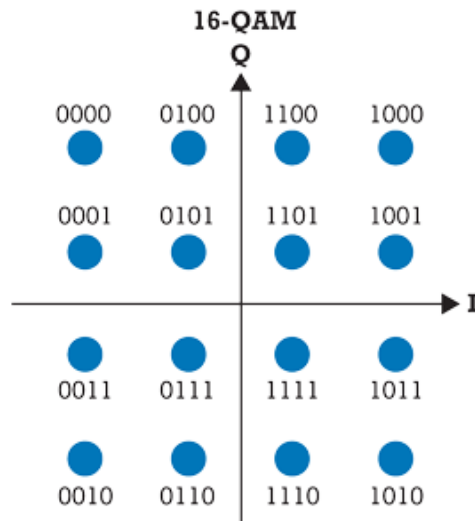


Figura 1.5 Constelación 16-QAM [11].

Cabe mencionar que los formatos aquí presentados, así como sus variantes, no son los únicos existentes y empleados en sistemas WDM.

1.3 Multiplexor / Demultiplexor

Un multiplexor (MUX), es un componente esencial en sistemas WDM teniendo como finalidad combinar las señales moduladas provenientes de cada uno de los láseres en una sola señal óptica, con el fin de enviarla por la fibra. Este proceso se denomina multiplexación.

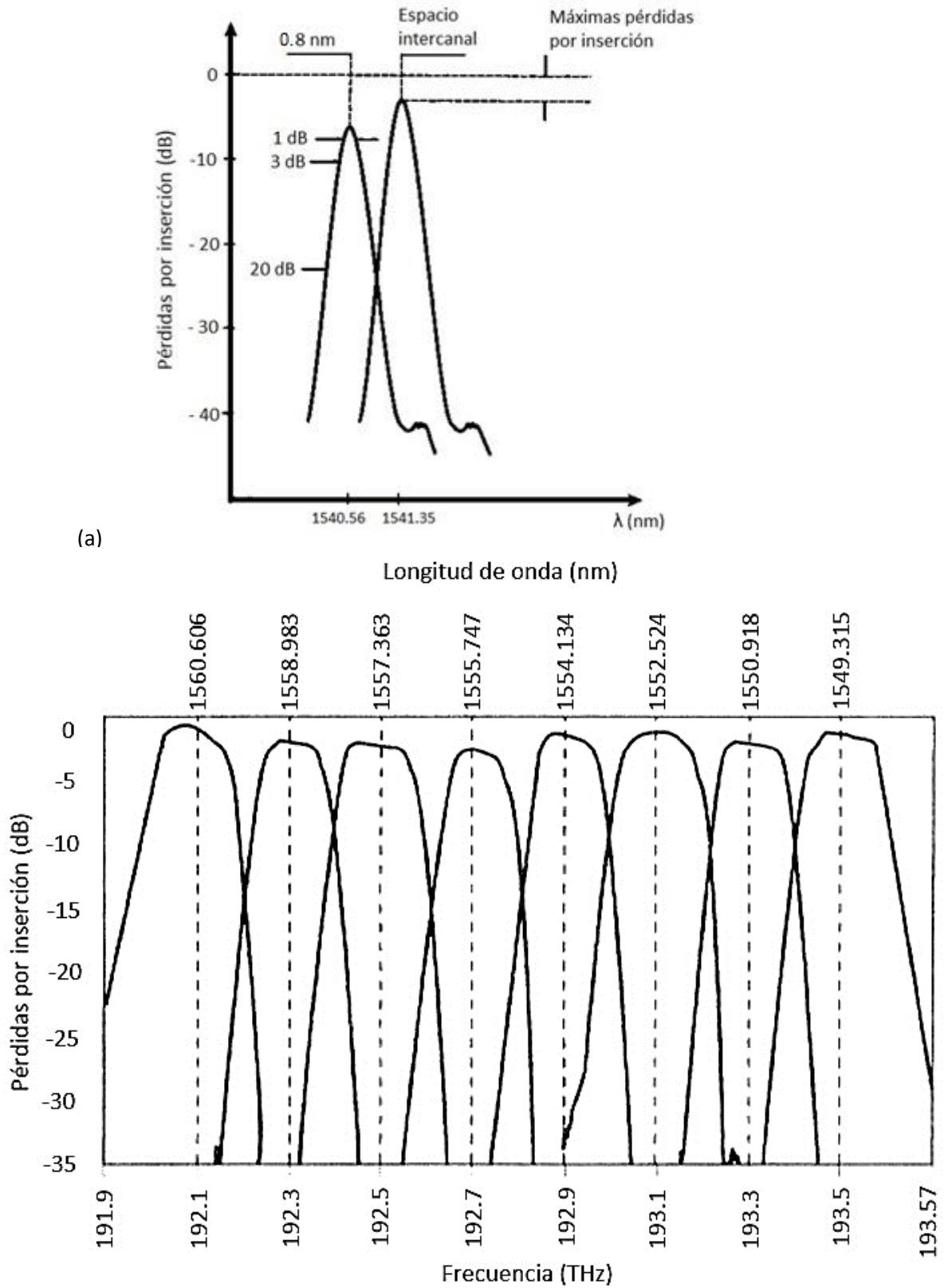
En el otro extremo del enlace, para recuperar las señales originales se debe primero separarlas, para lo cual se utiliza un demultiplexor (DEMUX). Un DEMUX lleva a cabo precisamente ese proceso inverso, denominado demultiplexación, es decir, obtener las señales individuales que originalmente fueron enviadas y dirigirlas a sus respectivos receptores.

Existen muchas tecnologías con las cuales se puede llevar a cabo la multiplexación y demultiplexación, algunos dispositivos usados se basan en el uso de Filtros de Películas Delgadas (*Thin-Film Filter*, TFF), Rejillas de Bragg (*Bragg gratings*), Arreglos de Guías de Onda (*Arrayed Waveguide Gratings*, AWGs), así como acopladores e interferómetros Mach-Zehnder [12]. Debido a la reciprocidad inherente de las señales ópticas en medios dieléctricos, un MUX puede ser usado como DEMUX y viceversa, dependiendo de la dirección en que se está propagando la onda [3].

Algunos parámetros importantes de un MUX/DEMUX son:

- Número de canales. Describe el número de canales que puede multiplexar/demultiplexar. Algunos valores típicos son 8, 16, 32.
- Longitudes de onda centrales. Deben coincidir con las longitudes de onda emitidas por los láseres siguiendo la recomendación ITU-T G.694.1 antes mencionada.
- Espacio intercanal. Indica la distancia mínima entre canales. Algunos valores estándar son 0.4 nm (50 GHz), 0.8 nm (100 GHz) y 1.6 nm (200 GHz).
- Ancho de banda. Especifica el ancho de banda de cada canal. Normalmente el fabricante lo sitúa a un nivel de -1dB, -3dB o -20 dB del nivel de las pérdidas por inserción del dispositivo. Como valores típicos podemos mencionar para un MUX/DEMUX de 32 canales un ancho de banda de 0.1 nm a -3dB de las pérdidas por inserción, en este caso el espacio intercanal puede tener un valor estándar de 0.4 nm o más. [5].

La figura 1.6 (a) muestra el espectro de dos canales de un MUX/DEMUX diseñado con una separación de 100 GHz (0.8 nm) según la recomendación ITU-T G.694.1. El primero de ellos está centrado en 1540.56 nm y el segundo en 1541.35 nm. La figura 1.6 (b) pertenece a la respuesta en frecuencia de un MUX/DEMUX de 8 canales fabricado a base de filtros TFF. Este dispositivo, presenta un espacio intercanal de 200 GHz.



(b) Figura 1.6 (a) Caracterización de un MUX/DEMUX. (b) Respuesta espectral típica de un MUX/DEMUX de 8 canales [5].

1.4 Amplificadores Ópticos

Dependiendo de los requerimientos de nuestro enlace se necesitan amplificadores para contrarrestar la atenuación de la señal cuando ésta viaja a través de la fibra óptica largas distancias, típicamente entre 40 y 80 km. Podemos considerar un amplificador como un amplificador de potencia o *booster*, un amplificador de línea o un pre-amplificador, todo depende de la posición que tengan en el enlace. Un amplificador de potencia debe su nombre a que amplifica la potencia de la señal óptica al momento que ésta sale del sistema de origen. Un amplificador de línea es usado después de un largo tramo de fibra para compensar la atenuación que sufre la señal en su recorrido. Finalmente, un pre-amplificador amplifica la señal antes que ésta se incorpore al extremo destino del sistema [13]. Los amplificadores también pueden ser clasificados de acuerdo a la tecnología que usan, dentro de los sistemas WDM tenemos una amplia variedad como lo son los Amplificadores Paramétricos, Amplificadores Ópticos de Semiconductor (*Semiconductor Optical Amplifier*, SOAs), Amplificadores de Fibra Dopada de Erbium, (*Erbium Doped Fiber Amplifier*, EDFAs) y los Raman.

Los EDFAs emplean para su funcionamiento una señal externa de bombeo comprendida entre los 980 y 1480 nm, pero dichos dispositivos son capaces de amplificar en todo el intervalo de la llamada banda C de frecuencias, cuyas longitudes de onda se encuentran entre los 1530 y 1565 nm.

Los amplificadores Raman también emplean un láser de bombeo para su funcionamiento, el cual emite una longitud de onda 100 nm menor que la señal a amplificar. Se rigen por el Esparcimiento Estimulado de Raman (*Stimulated Raman Scattering*, SRS) para lograr su objetivo, lo que los hace más flexibles, pues pueden amplificar un rango de longitudes de onda de 40 a 50 nm, comprendido entre las bandas E, S, C y L, es decir, entre las longitudes de onda que van de los 1300 a 1625 nm. Además, el intervalo de amplificación puede ser incrementado usando arreglos en cascada, alcanzando un ancho espectral de hasta 200 nm.

En el ámbito de los sistemas WDM, ambos amplificadores se emplean. Los EDFAs amplifican un pequeño rango de longitudes de onda, pero este desempeño es compensado por la baja energía que necesitan para operar, haciéndolos ideales para conexiones donde la potencia que se puede emplear es poca. Por otro lado, los amplificadores Raman, pueden amplificar un amplio espectro, requieren una mayor potencia para trabajar, pero su amplificación es casi equitativa para las longitudes de onda para las que fue diseñado [1] [2] [12].

1.5 Receptor Óptico

El receptor óptico tiene como función transformar la señal óptica que en él incide para poder devolverla a su forma eléctrica original y recuperar la información que transporta. Para poder realizarlo, el receptor cuenta con un acoplador, un fotodetector y un demodulador. La función del acoplador, de la misma forma que en el transmisor, es dirigir la señal con la mayor eficiencia posible, pero en este caso se hace de la fibra al fotodetector. El componente principal de un receptor óptico es el fotodetector, el cual genera una corriente eléctrica denominada fotocorriente, proporcional a la potencia óptica incidente. El demodulador recupera la información que lleva la señal, por lo tanto, debe estar diseñado para el formato de modulación empleado en el transmisor. El diagrama de un receptor óptico se muestra en la figura 1.7.

Similar al transmisor en un sistema WDM, el receptor está compuesto por un arreglo de fotodetectores, cada uno con su respectivo acoplador y demodulador. La dimensión del arreglo debe ser la misma que el número de canales demultiplexados.

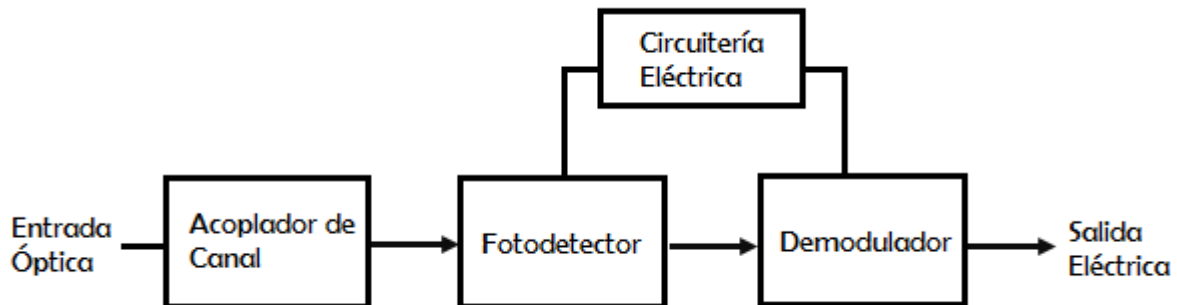


Figura 1.7 Componentes de un receptor óptico [14].

1.5.1 Fotodetector

Existen ciertas características que el fotodetector debe cumplir para que tenga un buen desempeño. Algunas de ellas son:

- Alta sensibilidad. El fotodetector debe desempeñarse adecuadamente cuando una señal muy débil y distorsionada llegue a él. La sensibilidad se define como la mínima potencia óptica requerida para alcanzar cierto BER (bits erróneos del total de bits transmitidos), que usualmente es 10^{-12} .
- Respuesta rápida. El dispositivo en cuestión debe reaccionar de manera veloz a las variaciones de potencia óptica incidentes.
- Bajo ruido. Existen fuentes de ruido, como el ruido cuántico y el ruido térmico, en un fotodetector que son imposibles de suprimir, por eso es importante considerar un dispositivo que introduzca el menor ruido posible. El ruido cuántico se genera al hacer la conversión fotón-electrón. El ruido térmico es debido al movimiento aleatorio de los electrones ya que el dispositivo no se encuentra a una temperatura de 0 K.
- Longitud de onda. Recordando que cada canal WDM posee cierta longitud de onda es importante verificar que el fotodetector sea el adecuado.

Debido a ello, los fotodetectores hechos de semiconductores como InGaAs o InP son los que comúnmente se emplean [3] [15] [16].

1.5.2 Detección Directa

Cuando una señal llega al receptor no basta con solo detectarla, sino también debe ser procesada e interpretada. La forma más simple que existe de este proceso se llama detección directa.

En el caso de una señal modulada en amplitud, como es el caso de una señal OOK y todas sus variantes, el receptor busca la presencia o ausencia de luz durante un intervalo de bit y la señal es interpretada como un 1 o 0 lógico, respectivamente, porque la información yace en la amplitud de la señal [8].

Pero también existen modulaciones más complejas como DPSK que pueden detectarse directamente. De hecho, DPSK es usada en lugar de una señal BPSK para evitar usar la detección coherente que ésta última necesita y trataremos más adelante. En el receptor, previo a que la señal sea inyectada al fotodetector, la señal DPSK es dividida en dos flujos, con la única diferencia que uno se encuentra desfasado del otro por un periodo de bit. Entonces se hace una comparación de las señales para poder determinar si se trata de un 1 o un 0. Si la fase de la señal no cambia indica la presencia de un 1, pero si existe cambio de fase entonces se trata de un 0. Al mezclar ambas señales, la señal resultante puede ser entonces detectada de manera directa [11]. La señal original, la señal desfasada por un periodo de bit y la señal resultante se aprecian en la figura 1.8.

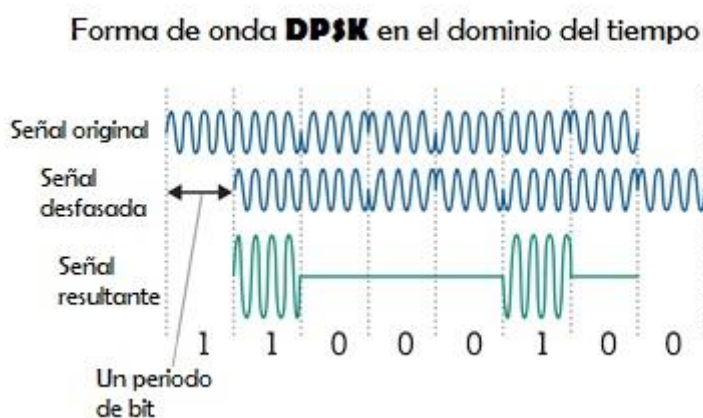


Figura 1.8 Proceso seguido para detectar directamente una señal DPSK [11].

Un proceso similar se lleva a cabo para señales DQPSK.

1.5.3 Detección Coherente

Este tipo de detección es más compleja que la detección directa, pero se emplea para mejorar la sensibilidad del receptor y ocupar de mejor manera el ancho de banda de la fibra óptica al hacer uso de complejos esquemas de modulación como QPSK, 16-QAM o formatos QAM superiores y con esto acrecentar la eficiencia de los sistemas WDM.

La idea principal de la detección coherente es introducir ganancia a nuestra señal, para ello la señal recibida se mezcla con otra señal óptica proveniente de un oscilador local. El oscilador local no es más que otro láser. Para mezclar las señales se emplean acopladores de 3 dB o combinadores. Finalmente, la señal

resultante es enviada al fotodetector [3]. En la figura 1.9 se expone el diagrama de bloques de un detector coherente básico.

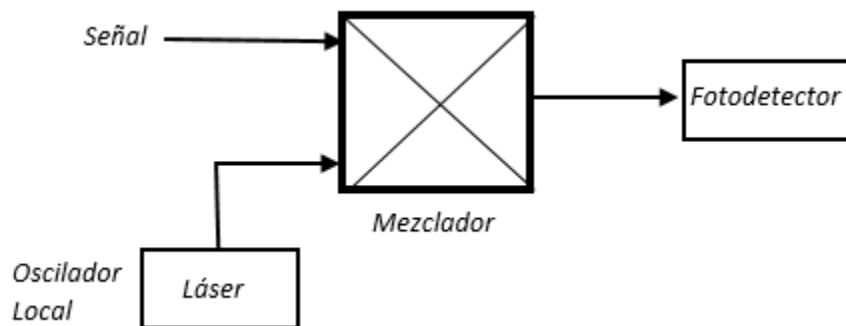


Figura 1.9 Diagrama de bloques para un detector coherente [1].

La detección coherente puede ser homodina o heterodina. Básicamente, en la detección homodina se busca que, tanto la señal recibida como la señal del oscilador local, tengan la misma frecuencia con el fin que la señal resultante esté en banda base. Por otro lado, en la detección heterodina, la señal recibida tiene diferente frecuencia a la señal del oscilador local, por lo que la señal resultante será de frecuencia diferente a las dos anteriores, dicha señal es denominada señal de frecuencia intermedia. La frecuencia de esta tercera señal debe ser mayor o igual al ancho de banda de la señal recibida pero en banda base y se obtiene de la diferencia de frecuencias de ambas señales.

Desgraciadamente en la detección heterodina se presenta un fenómeno denominado frecuencias imagen, que son frecuencias no deseadas capaces de producir la misma frecuencia intermedia. Además, el ancho de banda que requiere la detección heterodina es casi el doble que la detección homodina [14]. El uso en sistemas WDM radica en que el bloque del demultiplexor puede ser removido, ya que la selección de los canales puede hacerse en el dominio de la frecuencia intermedia, pero usando filtros electrónicos, los cuales pueden ser diseñados para que tengan un comportamiento casi ideal. Como consecuencia tenemos que los canales pueden situarse mucho más juntos [1].

1.5.4 Demoduladores

La demodulación, en su sentido más extenso, es devolver la señal modulada a su forma original, a esta señal se le conoce como señal en banda base.

Para el caso de detección homodina, la señal es demodulada directamente al hacer la mezcla de las señales. Aunque el concepto es simple, la construcción de tal dispositivo es difícil porque el oscilador local debe estar a la misma frecuencia que la señal a demodular, lo cual en la práctica es trabajoso. Este tipo de demodulación es conocida como demodulación síncrona.

Para la detección heterodina, el diseño es más simple. En este caso, la demodulación puede hacerse de manera síncrona o asíncrona. En la demodulación heterodina síncrona, la señal eléctrica a la salida del fotodetector se hace pasar por un filtro pasa banda, para posteriormente recuperar la portadora en la señal de frecuencia intermedia con un dispositivo denominado PLL. Para la demodulación heterodina

asíncrona, la señal proveniente del fotodetector se hace pasar por un filtro pasa banda, seguido de un detector de envolvente y finalmente filtros pasa bajas. El método asíncrono es el más usado en sistemas WDM.

1.6 Optical Add-Drop Multiplexer

Puesto que la creciente demanda en sistemas ópticos de comunicaciones no se satisface con enlaces punto a punto y se hace necesario el redireccionamiento de la información transportada por la fibra, es necesario incorporar otro tipo de módulos, dando origen a las denominadas redes ópticas. Estos módulos se conocen por su nombre en inglés *Optical Add/Drop Multiplexers* (OADMs). Los OADMs son equipos conformados por dispositivos ópticos más sencillos: conmutadores, filtros ópticos, multiplexores y demultiplexores. Hay dos generaciones de OADMs, la primera generación es de dispositivos que se configuran manualmente para extraer y añadir canales previamente seleccionados. La segunda generación es reconfigurable y capaz de seleccionar dinámicamente cuales longitudes de onda se extraen y agregan [13]. Además, existen los OADMs configurables, llamados ROADMs.

Su función principal es extraer y agregar uno (en el caso de OADMs) o más canales a la red (en el caso de ROADMs), preservando la integridad de los otros. Para la extracción, un DEMUX separa la señal óptica en canales individuales, se selecciona el canal o canales que se desean extraer y se redireccionan a otro destino mientras el resto de los canales, llamados canales exprés, siguen su trayectoria original. Cuando se desea agregar uno o más canales se debe hacer en la longitud de onda establecida para cada uno de ellos. Cuando las señales han ocupado su lugar en sus respectivas locaciones se hacen pasar por un MUX para obtener nuevamente una sola señal óptica. El esquema funcional de un ROADM se muestra en la figura. 1.10, donde se puede observar un sistema de cinco canales (cada uno con un color asociado). Los canales azules y el rojo constituyen canales exprés, mientras que el verde y amarillo son extraídos y agregados en el nodo particular de la red en que el ROADM se encuentra.

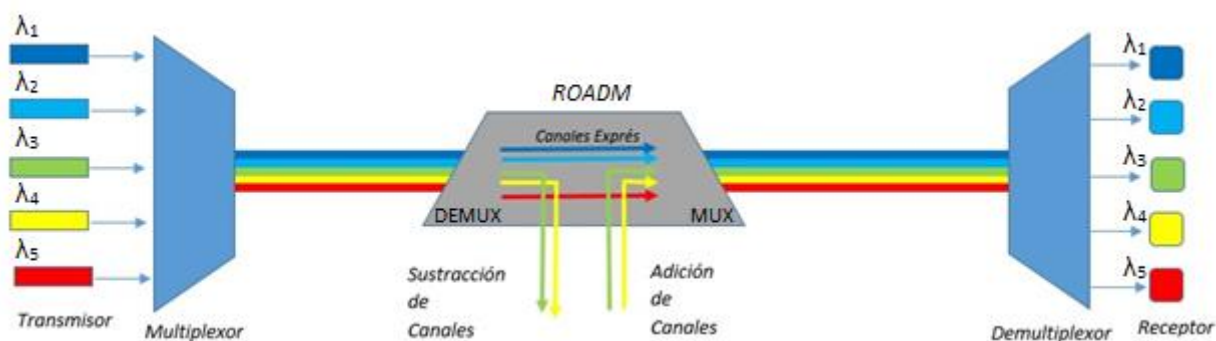


Figura 1.10 Esquema de la función que realiza un OADM.

Referencias

- [1] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, *Optical Networks: A Practical Perspective*, 2da ed., Morgan Kaufmann Publishers, USA, 2002.
- [2] Ramón Gutiérrez Castrejón, *Hacia un sistema de telecomunicaciones completamente óptico*, II-UNAM, México, 2005.
- [3] Godvind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3ra ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
- [4] Fujitsu, *DWDM Prerequisite Training*, Fujitsu, 2002.
- [5] Djafar K. Mynbaev, Lowell L. Scheiner, *Fiber-Optic Communications Technology*, Prentice Hall, 2001.
- [6] ITU-T, *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*, ITU-T Recommendation G.694.1, 2012.
- [7] Peter J. Winzer, *Modulation and multiplexing in optical communication systems*, IEEE LEOS the Society for Photonics, Vol. 23, No.1, pp. 4-9, 2009.
- [8] Ashwin Gumaste, Tony Antony, *DWDM Network Designs and Engineering Solutions*, Cisco Press, 2002.
- [9] Stephanie Michel, *Why complex modulated optical signals?*, Lightwave, Vol. 31, No.4, pp. 18-22, 2013.
- [10] Stephanie Michel, *Complex coding concepts for increased optical bit transfer efficiency*, 2013, <http://www.lightwaveonline.com/articles/2013/07/complex-coding-concepts-for-increased-optical-bit-transfer-efficiency.html>
- [11] Stephanie Michel, *Which optical modulation scheme best fits my application?*, 2013, <http://www.lightwaveonline.com/articles/print/volume-30/issue-5/features/which-optical-modulation-scheme-best-fits-my-application.html>
- [12] Selene Pérez García, *Apuntes del curso: Dispositivos Ópticos*, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2013.
- [13] Humberto Flores González, *Apuntes del curso: Redes Ópticas y de Microondas*, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2013.
- [14] José A. Gama, *Análisis del desempeño de sistemas WDM utilizando formatos avanzados de modulación óptica a tasas superiores a 10 Gbps*, Tesis, Posgrado de Ingeniería, UNAM, 2012.
- [15] Ramón Gutiérrez Castrejón, *Apuntes del curso: Sistemas ópticos de transmisión*, Instituto de Ingeniería, UNAM, 2014.
- [16] Juan Hernández Cordero, *Análisis de ruido en detectores ópticos*, 2007, http://www.iim.unam.mx/jhcordero/Cursos/Facultad_Ingenieria/Notas/Ruido_fotodetectores.pdf

CAPÍTULO 2. REDES ÓPTICAS FLEXIBLES: ESTADO DEL ARTE

Dentro de las redes ópticas se distinguen cuatro generaciones. En la década de los años 80 tienen lugar las dos primeras de ellas. Los sistemas que componían dichas redes ópticas fueron diseñados para una sola longitud de onda, donde la conmutación y otras funciones de orden superior eran hechas por dispositivos electrónicos. La tercera generación nace con la tecnología WDM y cuyo funcionamiento fue explicado en el capítulo 1. En las redes basadas en tecnología WDM la introducción del OADM Reconfigurable (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer, ROADM*), con la función de realizar conmutación dinámica de las longitudes de onda que viajan a través de la red, sienta las bases para la cuarta generación de las redes ópticas. Las redes ópticas flexibles se sitúan en ésta última [1] [2].

2.1 Surgimiento de las Redes Ópticas Flexibles

Actualmente, las redes ópticas están sufriendo cambios significativos impulsados por la creciente demanda de aplicaciones que requieren un amplio ancho de banda. Líneas de Abonado Digital (*Digital Subscriber Line, DSL*), Fibra Hasta el Hogar (*FTTH*), Video Bajo Demanda (*Video-On-Demand, VoD*), Televisión de Alta Definición (*High Definition Televisión, HDTV*) y Computación en la nube (*Cloud computing*) son algunos ejemplos de aplicaciones cuyas necesidades de gran ancho de banda deben satisfacerse con las redes ópticas existentes [3] [4].

Como consecuencia, tales requerimientos están llevando rápidamente la capacidad física de la fibra óptica estándar a su límite. En 2012 el tráfico de datos aumentó en promedio un 34%, pero en un futuro se espera un abrupto incremento tanto en tiempo como dirección, es decir, a ciertas horas del día el tráfico encaminado hacia diversos puntos por las redes ópticas será aún mayor [4]. Bell Labs de Alcatel-Lucent prevé un aumento de 560% en el tráfico de datos en Redes de Área Metropolitana (*Metropolitan Area Network, MAN*) para el año 2017 [5].

En la figura 2.1 se muestra el cambio en los patrones de uso de ancho de banda de la red que un proveedor de servicios puede encontrar durante el día. La gráfica superior muestra el comportamiento unos años atrás, mientras que la gráfica inferior el comportamiento actual. Al emplear ambas gráficas la misma escala, se nota a simple vista que el tráfico en la red y la relación de tráfico entre el valor pico y el valor promedio (*Peak-to-Average Traffic Ratio*) han aumentado en gran medida [1].

Para hacer frente a las crecientes necesidades de capacidad en la red, los investigadores del área están proponiendo y desarrollando nuevas soluciones tomando como base los sistemas WDM. El enfoque más prometedor es conocido como redes ópticas flexibles, donde se plantea introducir elasticidad y adaptación en el dominio óptico, asignando los recursos de la red de acuerdo a la demanda de tráfico y condiciones del enlace. El término flexibilidad en las redes ópticas se refiere a la capacidad de la red para ajustar dinámicamente sus recursos (canales para cada una de las longitudes de onda, ancho de banda,

formato de modulación, tasa de transmisión, etc.), de una manera óptima y capaz de variar de acuerdo con las condiciones de tráfico, pero conservando la calidad de transmisión. Otros nombres con los que podemos encontrar esta nueva tecnología en la literatura son: redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks*, EONs), redes ópticas sintonizables, redes ópticas *gridless* o redes ópticas adaptativas [2] [3] [6-9].

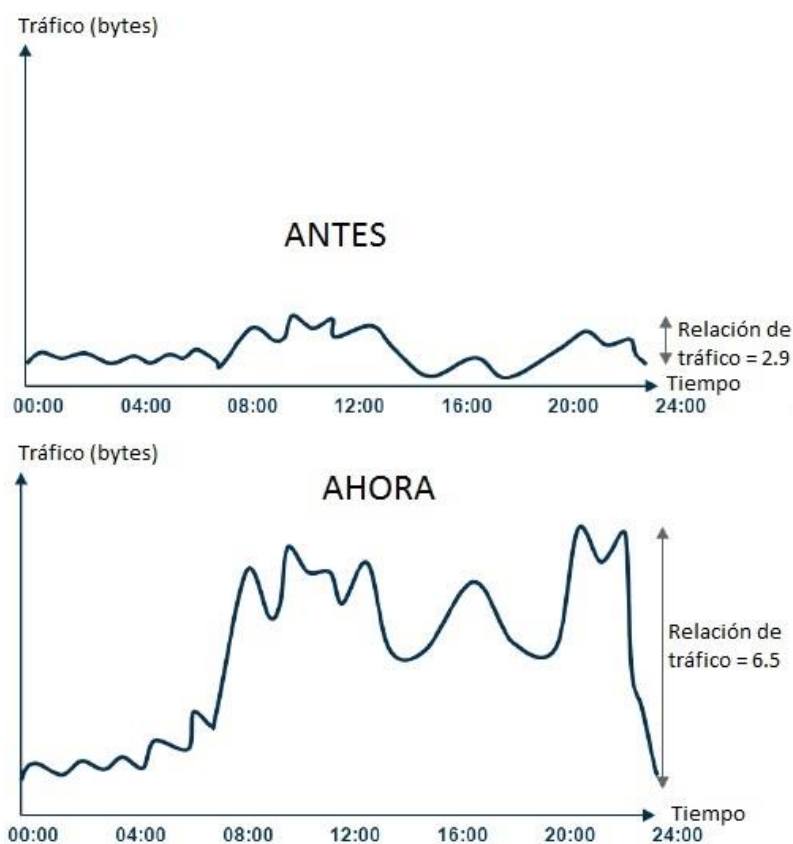


Figura 2. 1 Tráfico típico de datos durante un día en la red [1].

Para que las redes ópticas flexibles sean una realidad, se han propuesto diversos cambios o adaptaciones en las actuales redes WDM. Las primeras adaptaciones iniciaron con los ROADMs. La diferencia entre un OADM convencional y uno reconfigurable radica básicamente en que el segundo permite la selección de canales exprés y canales que se extraerán o insertarán en la red de forma dinámica. El corazón del ROADM es un módulo conocido como Conmutador Selectivo de Longitudes de Onda (*Wavelength Selective Switch*, WSS) con la función de conmutar, de manera independiente, cada una de los canales que en él se inyectan. Los OADMs Reconfigurables fueron implementados para introducir cierto grado de flexibilidad y permitir la adaptación de la red, remotamente y bajo demanda, de acuerdo a los cambios potenciales que se pudieran presentar en el tráfico de datos. Por otro lado, para suplir las necesidades de las nuevas aplicaciones multimedia que requieren un gran ancho de banda, se incluyeron nuevas tecnologías capaces de enviar información a altas tasas de transmisión, fijas y previamente establecidas. Sin embargo, dichas tasas no son requeridas por todas las demandas de tráfico, desencadenando en el uso ineficiente de los recursos de la red. A esta situación se le conoce como *Single Line-Rate* (SLR). Como solución a lo anterior se planteó migrar de manera gradual las redes existentes a redes heterogéneas, donde pueden coexistir

en la misma infraestructura enlaces de 10 Gbps, 40 Gbps y 100 Gbps, dando origen a lo que se conoce como *Mixed Line-Rate* (MLR) [2] [9].

No obstante, las medidas anteriores proporcionaron flexibilidad limitada, siendo incapaces de hacer frente a las futuras exigencias de ancho de banda. Debido a que los operadores proveen conexiones diseñadas para cumplir con la demanda de tráfico más alta (peor caso), asignan recursos en exceso que son subutilizados la mayor parte del tiempo, derivando en la necesidad de más grados de flexibilidad en la red. Con los avances en comunicaciones ópticas presentados en los últimos años, se ha podido alcanzar una alta eficiencia espectral. Además, el ajuste dinámico de ciertos parámetros en un enlace se ha vuelto una realidad, permitiendo sacar mejor partido a los recursos proporcionados por la fibra óptica. Dos de los desarrollos que han permitido dar ese paso son la transmisión/recepción coherente y las técnicas de transmisión de multiplexadoras: Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM), Nyquist WDM (N-WDM), entre otras [2] [3].

En 2008 se anunció la primera propuesta de redes ópticas flexibles con el concepto de un sistema de *grid* flexible (*flexible-grid*) conocido como SLICE. Con tal sistema se demostró experimentalmente la viabilidad de las redes ópticas flexibles, cambiando el *grid* fijo establecido en la recomendación ITU-T G.694.1 por uno flexible. Con dicho *grid* flexible se optimiza la asignación de ancho de banda para cada canal, con el fin de hacer un mejor uso del espectro óptico disponible. El sistema propuesto utiliza transceptores (dispositivos que cuentan con un transmisor y un receptor en un mismo módulo empleando elementos comunes del circuito para transmitir y recibir información) basados en OFDM con tasas de transmisión flexibles para generar señales desde 40 Gbps hasta 400 Gbps [10].

En los años posteriores, las investigaciones en este rubro aumentaron y nuevas e interesantes propuestas surgieron, algunas de ellas se tratan en los subcapítulos siguientes.

2.2 Cambios en Redes Ópticas Actuales

Uno de los mayores desafíos son transceptores y elementos de red capaces de adaptarse a las necesidades de tráfico día a día. Afortunadamente las tecnologías para transmisiones de 100 Gbps (que actualmente han alcanzado madurez) y superiores, pueden proporcionar esta flexibilidad adicional. La combinación de transceptores adaptativos, *grid* flexible y nodos inteligentes posibilitan el paradigma de las redes elásticas. En esta sección se trata de profundizar en los requerimientos esenciales para tener un panorama más amplio de los conceptos planteados y estudiados recientemente por los investigadores en este ámbito.

2.2.1 Grid Flexible

El *grid* fijo establecido por la ITU-T es un punto preliminar. Se mencionó con anterioridad que este *grid* divide el espectro correspondiente a la banda C en ranuras fijas, por lo general de 50 GHz o 100 GHz. Las transmisiones de 100 Gbps se ajustan en gran medida a ellas. Pero es probable que esta división no sea la que mejor se adapte a tasas de transmisión superiores como 400 Gbps o 1Tbps. El ancho espectral ocupado por tales tasas, usando modulaciones estándar, es muy amplio para tener lugar en alguna de las

ranuras de frecuencia, provocando la superposición con al menos uno de los canales adyacentes. En la figura 2.2 se observa que en efecto, el grid fijo no es adecuado para transmisiones de 400 Gbps y 1Tbps [4] [7].

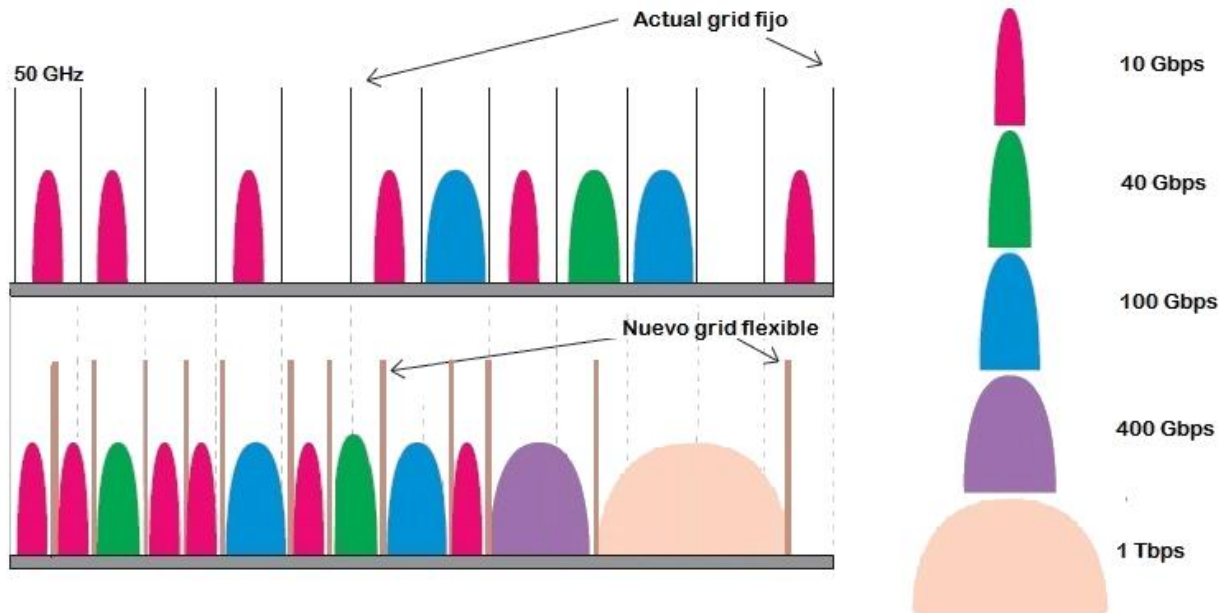


Figura 2. 2 En la parte superior se muestra la división de espectro con el grid fijo establecido por la ITU-T, en la parte inferior se muestra la división de espectro usando grid flexible [7].

Un primer escenario para poder adaptar señales de 400 Gbps en una ranura de 50 GHz fue denominado multiplexación inversa. Aquí las señales son divididas en flujos de datos con velocidades menores, 100 Gbps por ejemplo, aptos para espaciamientos de *grid* fijo. Aunque la idea es funcional, el espectro óptico se agotaría con mayor rapidez que en una red óptica flexible y sería necesario un transceptor para cada uno de los flujos resultantes. Debido a ello, se plantea como mejor solución el *grid* flexible, donde se es capaz de adaptar el ancho espectral de cada ranura, acorde con las características del enlace [7] [9].

En la recomendación G.694.1, además de presentar el *grid* fijo, se ha hecho la modificación para el nuevo *grid* flexible. La motivación principal es permitir que los sistemas de transmisión que emplean tasas y formatos de modulación mixtos, puedan asignar ranuras de diferente ancho espectral para cada uno de los canales. De este modo, dichas ranuras pueden ser optimizadas para las necesidades de ancho de banda (de acuerdo a la tasa de transmisión y formato de modulación) de cada uno de los canales del sistema.

De acuerdo a la recomendación la frecuencia central (en THz) de cada ranura está definida por $193.1 + n \times 0.00625$, donde n es un entero positivo o negativo incluyendo el cero y 0.00625 es la granularidad de la frecuencia central nominal en THz. El ancho de la ranura consigue ser tan amplio como sea necesario y es definido por $12.5 \times m$, es un número entero positivo y 12.5 es la granularidad del ancho de la ranura en GHz. La granularidad se entiende como el factor mínimo permitido.

La figura 2.3 muestra un ejemplo de *grid* flexible. Se muestran dos ranuras de 50 GHz y dos ranuras de 75 GHz. Para cada ranura son dados los valores de n y m . Se observa que el rango de frecuencias entre 193.125 THz y 193.18125 THz no está asignado, dicho rango puede emplearse como banda de guarda

entre los dos conjuntos de canales o ser asignado en un futuro a una ranura adicional con un ancho de 50 GHz ($n = 8, m = 4$), dejando 6.25 GHz sin asignar o asignarlo a dos ranuras de 25 GHz ($n = 6, m = 2$ y $n = 10, m = 2$). Es conveniente mencionar que cualquier combinación está permitida siempre y cuando las ranuras no se superpongan [11].

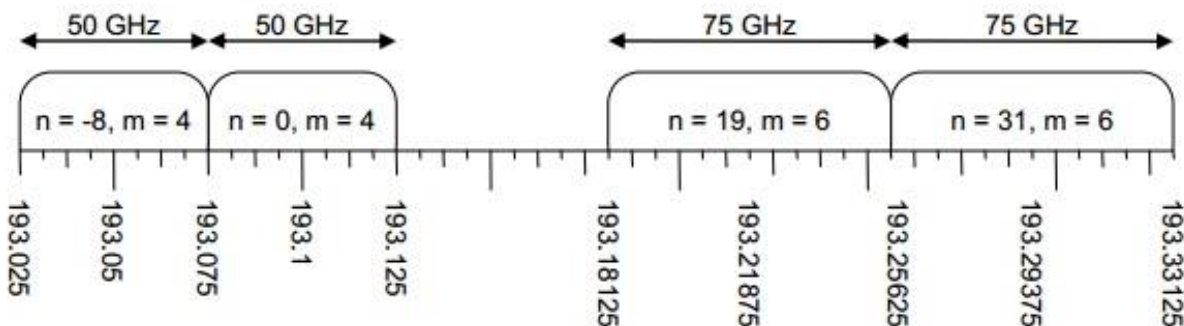


Figura 2. 3 Uso del grid flexible de acuerdo a la recomendación G.694.1 [11].

Sin embargo, con la introducción de este nuevo *grid* no se obtiene una red totalmente flexible. Para lograrlo implicaría el uso de una granularidad aún menor o la eliminación total del grid (*grid-less*) lo que complica aún más el panorama.

2.2.2 Transceptores Ópticos de Ancho de Banda Variable

Otro cambio benéfico es que los transceptores o transpondedores sean capaces de elegir la tasa de transmisión y formato de modulación adecuados para cada demanda de tráfico, maximizando la eficiencia espectral y adaptándose a los cambios que se puedan tener en cierto momento.

Estos nuevos transceptores han sido propuestos recientemente y son llamados Transceptores de Ancho de Banda Variable (*Bandwidth Variable Transceivers, BVTs*), Transpondedores Ópticos Sintonizables (*Tunable Optical Transponders*) o Transpondedores de Software Definido (*Software Defined Transponders*). La principal diferencia con los transceptores actuales es que pueden adaptar varios parámetros de transmisión, tales como la velocidad de transmisión, el formato de modulación, y el espectro que utilizan. En una red óptica flexible un BVT usa la cantidad suficiente de espectro para atender cada demanda [4].

2.2.2.1 Transceptores Ópticos Segmentados de Ancho de Banda Variable

Un BVT segmentado (*Sliceable BVT*) se refiere a dividir un BVT en diversos BVTs virtuales que puedan atender señales independientes, en otras palabras, permite la transmisión de un origen a varios destinos (que pueden aumentar o disminuir en función del tiempo) [12]. Ésta característica es una de las claves para la justificación de las redes ópticas flexibles desde un punto de vista económico, ya que es difícil argumentar el gasto de un BVT de 400 Gbps para un enlace, por decir, de 150 Gbps. El concepto es simple,

se tiene un transceptor con cierta capacidad para servir a varios enlaces. Por ejemplo, en la figura 2.4, un BVT de 400 Gbps es segmentado para cubrir tres enlaces, dos de 100 Gbps y uno de 200 Gbps.

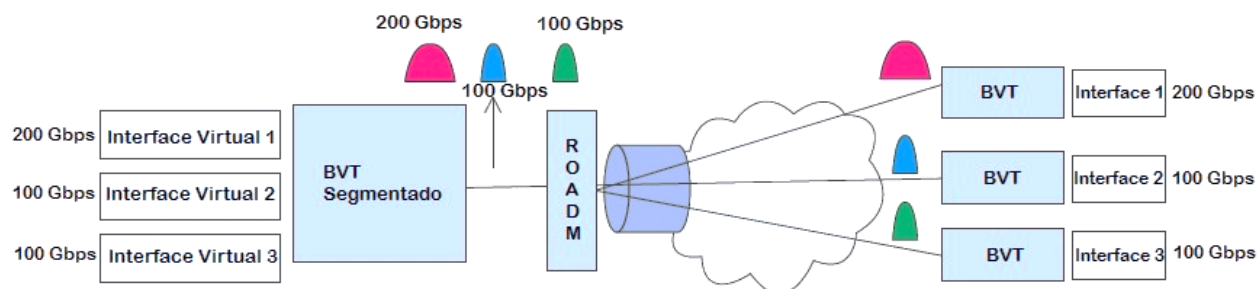


Figura 2. 4 Representación del funcionamiento de un BVT segmentado [7].

Se estima que esta flexibilidad será factible para los diseños de BVTs de próxima generación, así como la capacidad de usar un esquema de modulación diferente para cada transceptor virtual. Aunque tales características pueden parecer un desafío para el diseño, el costo adicional parece bastante modesto [7].

De acuerdo con la tecnología actualmente disponible, implementar los BVTs segmentados es posible. Se ha propuesto usar Circuitos Fotónicos Integrados (*Photonic Integrated Circuits, PICs*) como base, debido a que permiten tener múltiples portadoras en un mismo componente. En cuanto a la modulación, ésta puede hacerse de manera externa para cada una de las señales [12].

2.2.2.2 Formatos de Modulación

Con los BVTs se puede lograr equilibrio entre distancia y eficiencia espectral, es decir, si se necesita un enlace para cubrir un requerimiento en corta distancia, el BVT será capaz de ajustar el formato de modulación que empleará para ocupar la menor cantidad de espectro posible, en este caso puede usarse un formato de modulación complejo y la transmisión aún conservará su calidad. Por otro lado, si la demanda a cubrir es de gran distancia, el BVT ajustará el formato de modulación (por ejemplo modulación BPSK) y asignará el espectro necesario. Con ésta función se ahorra espectro que puede ser asignado a otros canales.

La tabla 2.1 compara el *grid* fijo y el *grid* flexible para un enlace punto a punto de 300 km. Se emplean dos formatos de modulación: Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura de Polarización Dual (*Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying, DP-QPSK*) y Modulación de Amplitud en Cuadratura de Polarización Dual (*Dual-Polarization Quadrature Amplitud Modulation, DP-QAM*) de 16 símbolos. La polarización dual implica la multiplexación de dos señales con el fin de duplicar la eficiencia espectral. Lo anterior es posible gracias a que las ondas electromagnéticas, como la luz, tienen dos componentes ortogonales de polarización que pueden ser usados como canales para enviar señales independientes [13].

Con el uso de EONs, en todos los casos, aumenta la eficiencia espectral, pero los beneficios son diferentes dependiendo de la demanda de tráfico que se esté cubriendo. El mayor rendimiento se observa para la

transmisión de 1 Tbps usando DP-QPSK. Por lo tanto, desde un punto de vista de eficiencia, existe una ventaja significativa del uso de redes ópticas flexibles asumiendo que el tráfico en la red las amerita [7].

Tasa de transmisión de la demanda [Gbps]	Formato de modulación	Ancho de banda del canal [GHz]	Solución para <i>grid</i> fijo	Incremento en eficiencia empleando EON
40	DP-QPSK	25+10	1 Canal de 50 GHz	35 GHz vs. 50 GHz = 43%
100	DP-QPSK	37.5+10	1 Canal de 50 GHz	47.5 GHz vs. 50 GHz = 5%
100	DP-16QAM	25+10	1 Canal de 50 GHz	35 GHz vs. 50 GHz = 43%
400	DP-QPSK	75+10	4 señales de 100 Gbps en 4 canales de 50 GHz	85 GHz vs. 200 GHz = 135%
400	DP-16QAM	75+10	2 señales de 200 Gbps en 2 canales de 50 GHz	85 GHz vs. 100 GHz = 17%
1000	DP-QPSK	190+10	10 señales de 100 Gbps en 10 canales de 50 GHz	200 GHz vs. 500 GHz = 150%
1000	DP-16QAM	190+10	5 señales de 200 Gbps en 5 canales de 50 GHz	200 GHz vs. 250 GHz = 25%

Tabla 2.1 Mejora en la eficiencia con asignación flexible de espectro en un enlace punto a punto, se asume un grid fijo de 50 GHz y banda de guarda de 10 GHz [7].

2.2.2.3 Súper Canales

Con la tecnología coherente (mencionada en el capítulo 1), que combina avanzadas técnicas de modulación y sofisticado procesamiento digital de señales, se habilita la construcción de súper canales, empleados cuando una demanda es demasiado grande, 500 Gbps por ejemplo (aunque puede ser mucho mayor), para ser cubierta por un solo canal óptico o incluso por un BVT (en cuyo caso la demanda sería cubierta por un conjunto de ellos). Un súper canal es un conjunto de canales (cada uno centrado en su respectiva longitud de onda) con espacio intercanal tan estrecho como la técnica de implementación lo permita. Éstos son generados en un mismo transceptor, pero a partir de diferentes fuentes ópticas moduladas independientemente, para posteriormente ser filtrados y acoplados a la fibra. Así, el súper canal atraviesa la red como una sola entidad y puede ser demultiplexado en el receptor [7] [12] [14].

La necesidad de implementar súper canales puede ser mejor comprendida con ayuda de la figura 2.5, donde se muestran tres soluciones (A, B y C) para poder enviar una señal de 1 Tbps con modulación DP-QPSK. La opción A pertenece a un transpondedor de longitud de onda única operando a 1 Tbps (lo que equivale a un transpondedor de 100 Gbps que trabaja 10 veces más rápido). Desafortunadamente la electrónica con la que se cuenta hoy en día no es capaz de trabajar a 320 Gbaud (El baud es una medida para representar los símbolos por segundo que se están codificando de acuerdo al esquema de modulación empleado), por lo que esta solución queda descartada por algunos años más. La opción B es un súper canal formado por dos subportadoras, de 500 Gbps cada una, que son combinadas electrónicamente en el transpondedor para aparecer como una sola entidad. Sin embargo, aunque la tasa de baud ha sido reducida significativamente, la opción B también es descartada por las limitaciones en la

electrónica actual. Finalmente, la opción C cuenta con 10 subportadoras que requieren electrónica que trabaje a 32 Gbaud. Afortunadamente, esta tecnología se encuentra disponible en los PICs [14].

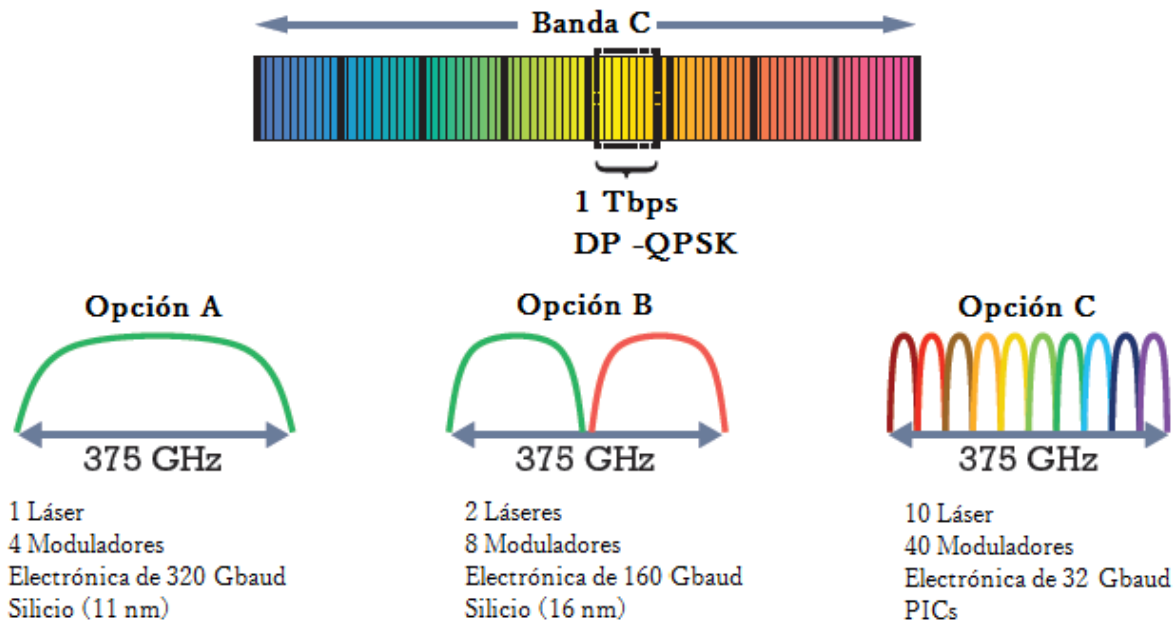


Figura 2. 5 Comparación del desempeño e implementación de tres transpondedores para enviar una señal de 1 Tbps con modulación DP-QPSK [14].

Para que el uso de súper canales tenga sentido, se deben considerar dos aspectos: la separación entre canales y el número de ellos. La separación, sin importar el método por el cual sean implementados, debe ser mínima (de acuerdo a la técnica empleada). El número de canales, considerando que cada uno de ellos tiene su propio procesamiento en paralelo con los demás y para ello necesitan sus propios dispositivos, debe ser razonablemente pequeño, 10 como máximo [15].

2.2.2.4 Estrategias para la Implementación de Súper Canales

Existen varios enfoques que están tomando fuerza en los BVTs para construir súper canales: Multiplexación por División de Longitud de Onda Coherente (*Coherent Wavelength Division Multiplexing*, CoWDM), Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM), Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales Óptica Coherente (*Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, CO-OFDM), Nyquist WDM (N-WDM) y Generación de Onda Óptica Arbitraria (*Optical Arbitrary Waveform Generation*, OAWG). Estas técnicas son conocidas como técnicas de multiportadoras o subportadoras y permiten que el espaciamiento intercanal sea más estrecho con el fin de alcanzar altas velocidades de transmisión.

A pesar de la similitud que existe entre CO-OFDM, CoWDM, Nyquist-WDM, y transmisores OFDM para la generación de una señal multiportadora, existen diferencias fundamentales con respecto a sus capacidades y principios de operación [3] [7].

Recientemente OFDM se ha convertido en un área dominante para la investigación y desarrollo en el campo de las comunicaciones ópticas de alta velocidad. El éxito de OFDM se debe a que es una técnica de modulación de múltiples portadoras, donde el flujo de datos se codifica en varias subportadoras que son transmitidas juntas por un mismo canal. En otras palabras, las altas tasas de transmisión son logradas por medio de la transmisión paralela (en un solo canal) de señales secundarias de ancho de banda estrecho (comparado con la tasa total de datos, generalmente de 100 MHz [7]), parcialmente superpuestas en el dominio de la frecuencia. La diferencia entre OFDM y la Multiplexación por División de Frecuencia (*Frequency Division Multiplexing*, FDM) es, como su nombre lo indica, la ortogonalidad. La ortogonalidad en OFDM indica que el espaciamiento entre subportadoras Δf es más estrecho que en FDM y es caracterizado por $\Delta f = \frac{1}{T_s}$, donde T_s es la duración del símbolo OFDM. Un símbolo OFDM está formado por la suma de las subportadoras moduladas en fase y amplitud. Es importante saber que las subportadoras toman la forma de una función sinc, en el dominio de la frecuencia, luego de ser moduladas, permitiendo obtener alta eficiencia espectral, ya que la superposición de las funciones sinc (de acuerdo a la expresión para Δf) se hace de modo que las frecuencias centrales de todas las subportadoras que no sean de interés se encuentren en los nulos de la subportadora de interés [16] [17] [18]. La figura 2.6 ilustra el espectro superpuesto de las subportadoras junto con la forma de la onda transmitida en el dominio del tiempo.



Figura 2. 6 Espectro OFDM (derecha) y Forma de la onda en el dominio del tiempo (izquierda) [18].

Los datos recibidos son recuperados usando filtros adaptativos para cada subportadora, éstos deben ser diseñados para rechazar perfectamente la interferencia causada por señales vecinas y no deben causar ningún tipo de distorsión en el canal. Este banco de filtros puede ser sustituido por dispositivos que realicen la Transformada Discreta de Fourier, los cuales pueden estar basados en algoritmos para realizar la Transformada Rápida de Fourier [16] [18].

Una de las variantes de OFDM es CO-OFDM (figura 2.7a), donde cada modulador genera varias subportadoras con un ancho de banda angosto (Δf) para formar cada banda (señal de alta velocidad). Este método es empleado para reducir la potencia que se requiere para enviar una señal OFDM por medio de la eliminación de la portadora en el transmisor y posteriormente recuperándola en el receptor. La ortogonalidad entre bandas se asegura con un espaciamiento Δf_G entre las subportadoras de los extremos de cada par de bandas adyacentes, dado por $\Delta f_G = m \times \Delta f$ para valores enteros de m [7] [18].

Por otro lado CoWDM (figura 2.7b) es una técnica que también hace uso de subportadoras. Básicamente, CoWDM es una implementación completamente óptica de OFDM. CoWDM opera de la siguiente manera, primero un conjunto de subportadoras (con un ancho de banda aproximado de 10 a 40 GHz) ortogonales, no moduladas y controladas en fase son generadas por un láser. Después las señales son separadas y moduladas individualmente, pero en paralelo. Finalmente las señales son combinadas nuevamente para

ser transmitidas por un solo canal. En el receptor las señales son demultiplexadas y procesadas en paralelo, cada una por un receptor coherente. Es conveniente decir que el control de fase en las subportadoras es para minimizar la diafonía entre ellas, misma que causa problemas en la demultiplexación, tales problemas son derivados debido a que los filtros empleados no son ideales [17] [18]. Con el fin de mantener la ortogonalidad entre subportadoras, la tasa de símbolos de cada subportadora CoWDM debe ser exactamente igual a la separación en frecuencia comprendida entre ellas. Como consecuencia, el transpondedor necesita un ancho de banda eléctrico muy amplio, que es difícil obtener con los dispositivos electrónicos actuales, haciendo esta técnica ideal sólo para bajas tasas de transmisión de símbolos [7] [15].

N-WDM (figura 2.7c) es una técnica que permite el ensamble de súper canales para altas tasas de baud e intenta minimizar el ancho espectral de cada canal, así como reducir las bandas de guarda intercanal. Por su compatibilidad con WDM, ésta podría ser la tecnología predilecta en primera instancia para la adopción de las redes ópticas flexibles. Se caracteriza porque cada subportadora tiene una forma rectangular ideal en el dominio de la frecuencia, cuyo equivalente en el dominio del tiempo es una función sinc. El ancho de banda de cada subportadora es muy cercano o igual al límite de Nyquist para una transmisión libre de interferencia entre símbolos, el cual coincide con la tasa de símbolos. Idealmente, la diafonía no existe en este método porque las subportadoras no se superponen en el dominio de la frecuencia. Además, permite una compensación entre capacidad y desempeño, al habilitar la ampliación o reducción del espacio entre subportadoras. Existen dos alternativas en el transmisor para implementar N-WDM. La primera de ellas, conocida como N-WDM óptica, utiliza filtros ópticos para que el espectro de cada subportadora tome forma rectangular. La segunda, nombrada N-WDM digital, hace uso de un modulador electro-óptico, que por medio de la aplicación de señales eléctricas adecuadas, moldea el espectro de la subportadora. En ambas, cada subportadora es generada por un láser independiente [3] [7] [15] [18].

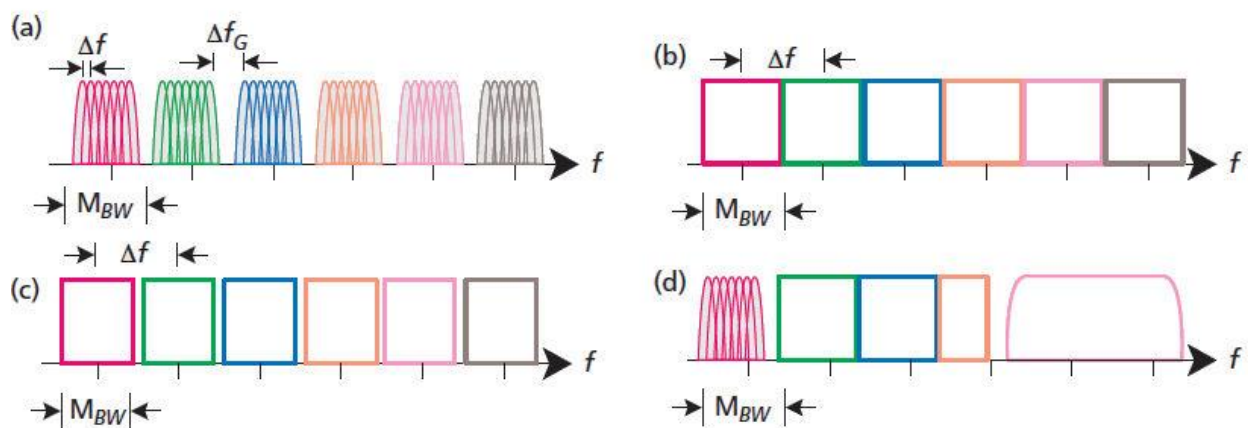


Figura 2. 7 Señales generadas para (a) CO-OFDM, (b) CoWDM, (c) N-DWM y (d) OAWG. El ancho de banda del modulador es representado por M_{BW} [7].

Finalmente, OAWG (figura 2.7d) es un método que introduce más flexibilidad, ya que a diferencia de OFDM, CO-OFDM, CoWDM y N-WDM, combina una variedad de espacios intercanal con diferentes tasas de símbolos. Además, pueden trabajar con portadora única o con múltiples portadoras. Esta es una importante ventaja, ya que implica interoperabilidad tanto con sistemas WDM como con sistemas, CO-OFDM, CoWDM y N-WDM, por lo que podría adoptarse como la tecnología por excelencia en las redes ópticas flexibles del futuro [7].

2.2.3 ROADMs Elásticos

Los ROADMs son un punto clave para la adopción de redes ópticas flexibles, pero necesitan ciertas modificaciones para poder tener lugar en ellas. Se requiere un nuevo tipo de ROADM que permita redireccionar canales con asignación de espectro dinámica, es decir, ROADMs elásticos capaces de encaminar, extraer o insertar canales flexibles, entre ellos súper canales, a través de la red como una sola entidad. Si estos dispositivos trabajan conforme a la mencionada recomendación de la ITU-T, no serán capaces de cumplir con su función.

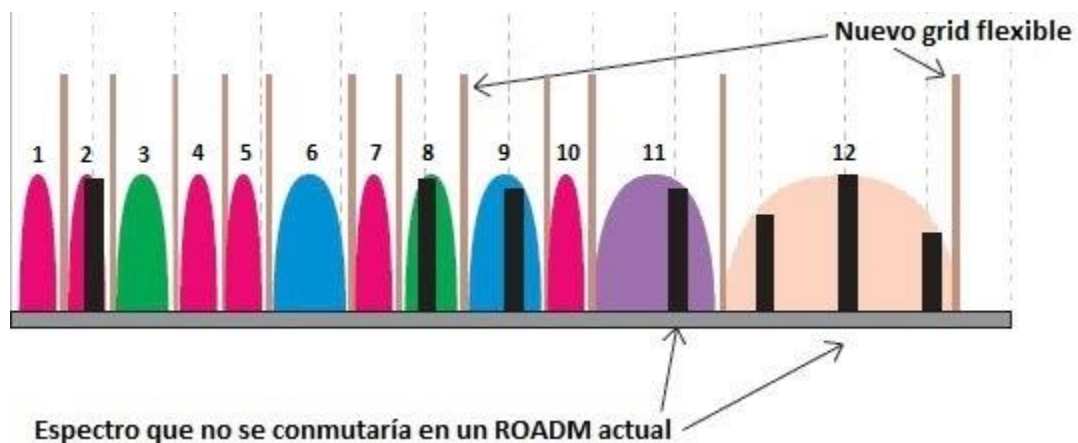


Figura 2. 8 Espectros ópticos de canales flexibles que un ROADM tendría que manejar [7].

Se observa en la figura 2.8 la representación de doce canales con asignación flexible de espectro. Las líneas punteadas indican espaciamientos fijos de 50 GHz. Las líneas continuas en color café representan los límites de las ranuras con *grid* flexible. Si la señal mostrada ingresara a un ROADM actual con espaciamiento intercanal de 50 GHz, los canales que no coincidan exactamente con ese ancho de banda y estén centrados acorde al *grid* fijo, como el canal 8, sufrirían cambios perjudiciales como se menciona a continuación. Por ejemplo, en el supuesto caso de necesitar extracción del canal 4 (el cual tiene un ancho de banda menor a 50 GHz), el ROADM haría su extracción junto con el canal 5, ya que ambos forman una entidad de 50 GHz y están alineados con el *grid* fijo. Pero el panorama es peor para otros canales, debido a que algunos de ellos tendrían una partición no deseada cuando una porción de su ancho de banda coincida con los límites del *grid* fijo. Por ejemplo, el canal 7 y parte del 8 tendrían el mismo procesamiento, por decir de conmutación, aunque no sea requerido para ambos. En este caso, la conmutación del canal 7 sería exitosa pero únicamente parte del canal 8 sería redireccionada, el resto del canal tendría un procesamiento a la par con parte del canal 9. Además, los segmentos marcados en negro en algunos de los canales posiblemente se perdería debido a los procesos de filtrado que son requeridos en los ROADMs [7] [19].

Un ROADM convencional está construido típicamente por un banco de WSSs (dispositivos fundamentales), amplificadores y monitores de canal. Los WSSs son conmutadores bidireccionales 1xN que distribuyen dinámicamente los canales de una señal WDM en N señales de longitud de onda única o multi-longitud de onda para gestionar los canales en la red [19] [20]. En la figura 2.9 un WSS 1x4 recibe la señal WDM por su puerto común y la demultiplexa en los 11 canales correspondientes. Cada canal individual es dirigido a su conmutador y éstos dirigen el o los canales requeridos (bloqueando los que no son de interés) a cada uno de los 4 puertos de salida, previamente pasando por un multiplexor. Estos

conmutadores fueron propuestos por primera vez en 2001 para maximizar el uso del ancho de banda disponible en la fibra óptica e introducir flexibilidad en los OADMs [9]. Sin embargo, para las redes ópticas flexibles no es suficiente, por lo que dichos dispositivos han evolucionado a Conmutadores Selectivos de Espectro (*Spectrum Selective Swithces, SSSs*) [21].

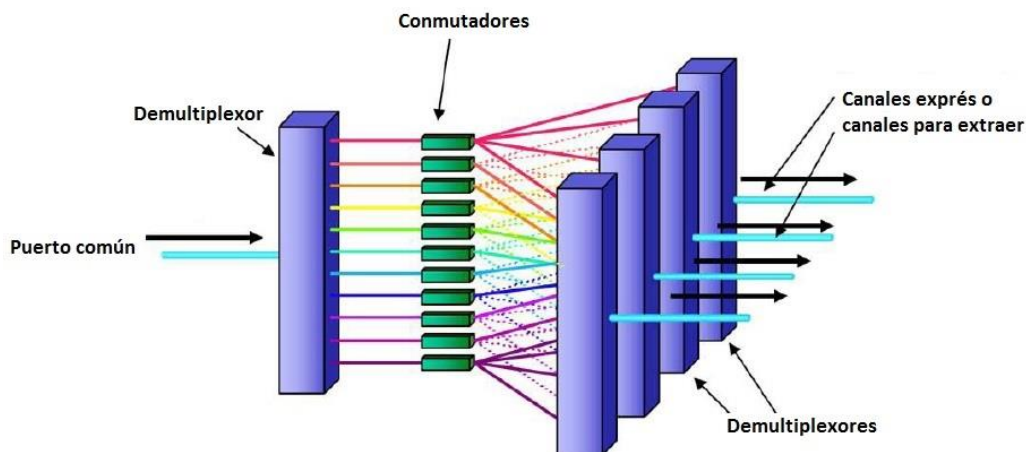


Figura 2. 9 Operación de un WSS 1x4 [20].

Aunque el rubro de los ROADMs para redes elásticas ha estado un tanto desatendido por la comunidad investigadora, se han desarrollado SSSs que permiten conmutación en rangos de espectro casi arbitrarios, alcanzando granularidades de hasta 6.250 GHz o incluso 3.125 GHz [7]. El poco interés de este campo podría deberse a que los ROADMs elásticos pueden heredar muchas de las tecnologías empleadas en sus predecesores o debido a que hace falta aún un sistema de medición adecuado para evaluar su desempeño.

Básicamente, para realizar la multiplexación, estos nuevos SSSs están constituidos por filtros *flattop* pasabanda, cada uno de ellos programado para permitir el paso del espectro que abarca el canal al que sirve. La respuesta en frecuencia ideal de los filtros es rectangular, además regulan la potencia de modo tal, que a la salida todos los canales tienen una misma intensidad. Se fabrican con componentes activos, típicamente basados en Cristal Líquido sobre Silicio (*Liquid Crystal on Silicon, LCoS*) o Sistemas Microelectromecánicos (*Microelectromechanical Systems, MEMS*). Por otro lado, los SSSs deben tener tiempos de conmutación cortos, 10 ns por ejemplo, por lo que se ha propuesto que los dispositivos que realizan esta función sean implementados con Amplificadores Ópticos de Semiconductor (*Semiconductor Optical Amplifiers, SOAs*) o materiales electro-ópticos. Éstos últimos son materiales que consiguen modificar sus propiedades ópticas a través de la aplicación de un campo eléctrico en ellos, como el LiNbO_3 [21].

Se han diseñado varias arquitecturas para la construcción de ROADMs elásticos a partir de los SSSs. En la Arquitectura de Transmisión y Selección (*Broadcast-and-Select Architecture*) presentada en la figura 2.10a, se plantea el uso de divisores de señal en los N-1 puertos (o grados) de entrada para generar N copias de la señal original. Para el redireccionamiento, N-1 copias son dirigidas a los SSSs para llevar a cabo un proceso de filtrado con el fin de seleccionar el o los canales requeridos en cada puerto de salida. Por otro lado, las copias restantes se envían a una estructura de extracción/inserción por si dicha función

es requerida. La desventaja de esta arquitectura es que el número de puertos a emplear está limitado por el uso de divisores de señal, debido a las pérdidas que introducen [22].

Otra propuesta similar, mostrada en la figura 2.10b, lleva el nombre de Arquitectura de Encaminamiento de Espectro (*Spectrum Routing Architecture*), en ésta los divisores de señal son reemplazados por SSSs $1 \times N$, mismos que llevan a cabo las funciones de conmutación y filtrado. A diferencia de la arquitectura anterior, ésta no está limitada en número de grados, sin embargo, al requerir más SSSs su costo se incrementa.

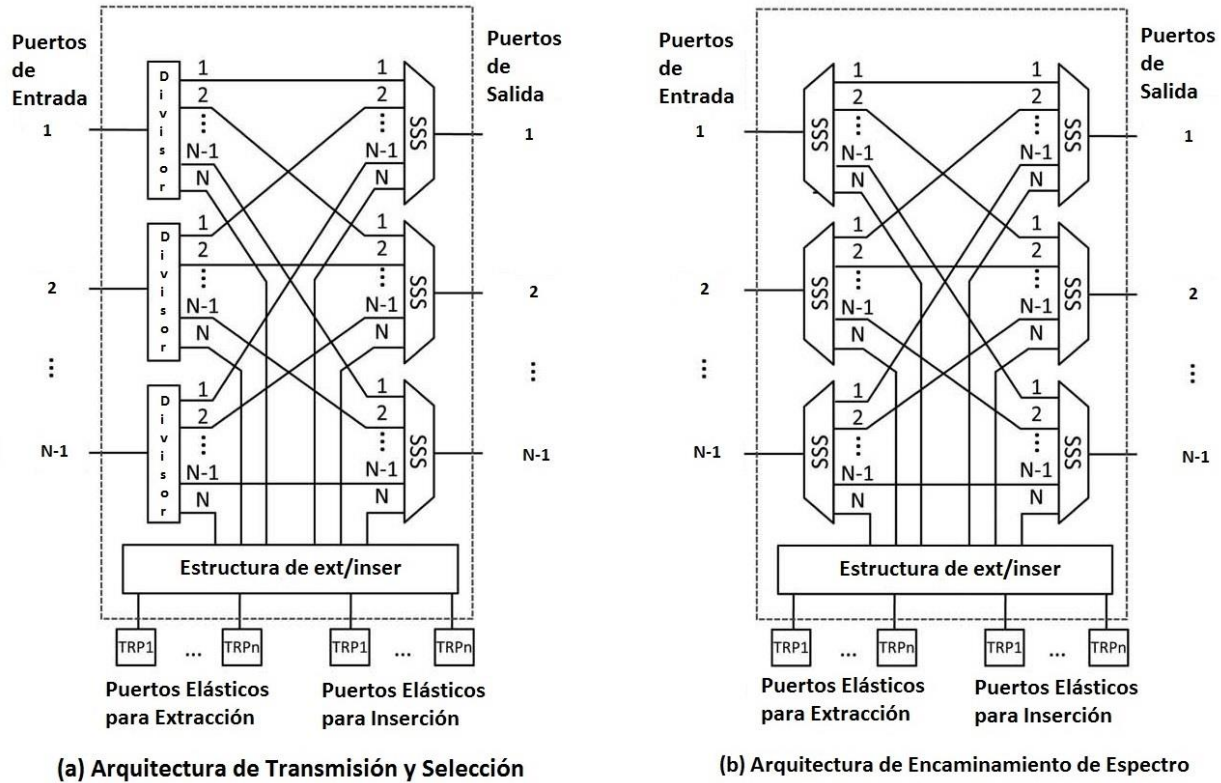
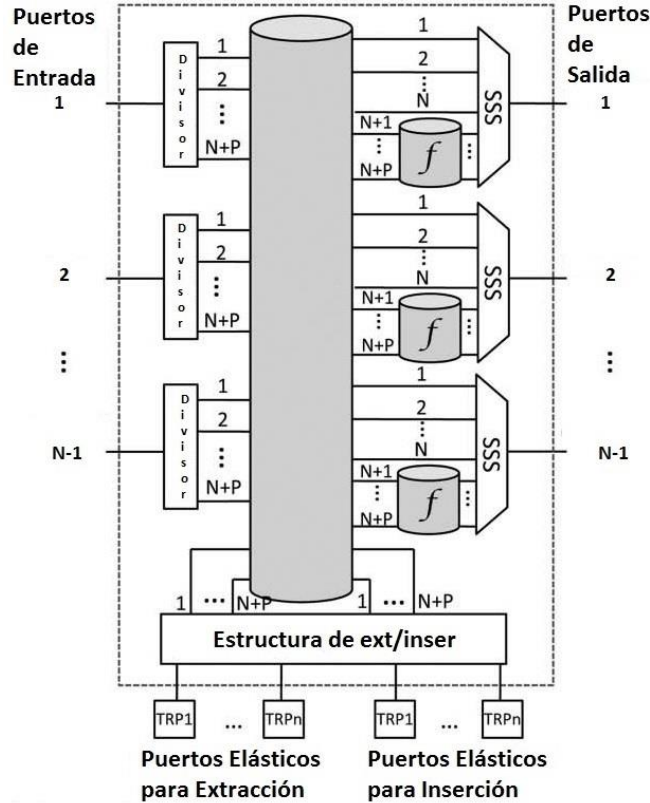


Figura 2. 10 Arquitecturas de ROADMs elásticos, (a) Arquitectura de Transmisión y Selección, (b) Arquitectura de Encaminamiento de Espectro [21].

La arquitectura de la figura 2.11 es conocida como Conmutación y Selección con Funcionalidad Dinámica (*Switch and Select with Dynamic Functionality*), ésta es mucho más compleja que las anteriores. Los $N-1$ puertos de entrada cuentan con un divisor de señal que genera $N+P$ copias de la señal original. Se hace uso de un conmutador óptico para dirigir las copias de las señales de entrada a un SSS $N+P \times 1$, un módulo funcional f , o una estructura de extracción/inserción, según las necesidades. El módulo funcional provee de procesamiento adicional (desfragmentación de espectro, multiplexación por división de tiempo, regeneración, etc.) a las copias de las señales que son inyectadas a él. Las salidas del módulo están conectadas al SSS correspondiente para llevar a cabo un proceso de filtrado y tener sólo los canales necesarios en los $N-1$ puertos de salida. Se pueden tener tantos módulos funcionales como sean necesarios, cada uno con una diferente tarea. La funcionalidad dinámica añadida hace que el número de puertos requeridos en el conmutador óptico sean demasiados y los de cada SSS se vean altamente incrementados en comparación con las arquitecturas antes presentadas.



Conmutación y Selección con Funcionalidad Dinámica

Figura 2. 11 Arquitectura de un ROADM de Conmutación y Selección con Funcionalidad Dinámica [21].

Finalmente, es presentada una arquitectura con un grado de complejidad mucho mayor, pero capaz de proveer mayor flexibilidad que las arquitecturas previas. La Arquitectura bajo Demanda (*Architecture-on-Demand*, AoD), ilustrada en la figura 2.12, consiste en una “placa madre óptica”, por ejemplo un arreglo de MEMS, conectada a diversos módulos de procesamiento de señales (SSSs, conmutadores de gran velocidad, EDFAs, desfragmentadores de espectro, etc.), puertos de entrada y puertos de salida. La gran ventaja radica en la “placa madre óptica”, pues los módulos de procesamiento de señales no están cableados físicamente, por lo que permiten su uso bajo demanda. Además, esta arquitectura presenta beneficios considerables en términos de escalabilidad [21].

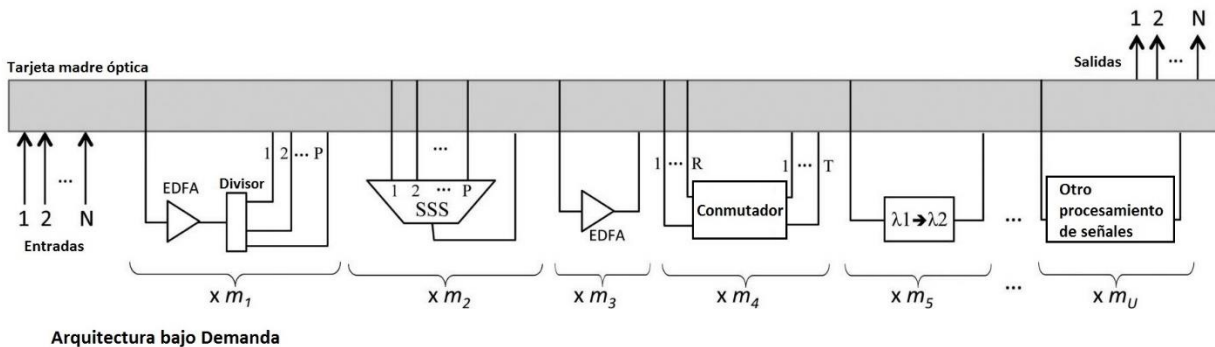


Figura 2. 12 Arquitectura de un ROADM de Arquitectura bajo Demanda [21].

Aunque los nuevos ROADMs elásticos trabajen con asignación de espectro dinámica, todas las arquitecturas deben conservar ciertas características, como la capacidad llamada *colorless*, donde el dispositivo realiza su función independientemente de la longitud de onda del canal. Además, cualquier proceso debe ser realizado sin importar la dirección de cada grado, a esto se le conoce como *directionless*. Y por último todos los ROADMs elásticos deben ser *contentionless*, es decir, evitar bloqueos en el enlace (realizando conversión de longitud de onda, por ejemplo) cuando dos o más canales, provenientes de direcciones diferentes y centrados en la misma longitud de onda, necesitan salir por un mismo grado [19].

2.2.4 Desfragmentación de Espectro y Algoritmos de Asignación de Espectro

Así como en las redes WDM se tienen algoritmos de Encaminamiento y Asignación de Longitud de Onda (*Routing and Wavelength Assignment, RWA*), en las redes ópticas flexibles se necesitan algoritmos de Encaminamiento y Asignación de Espectro (*Routing and Spectrum Allocation, RSA*). Un algoritmo RWA provee conexiones ópticas encontrando una ruta física y asignando una longitud de onda. La longitud de onda a asignar debe estar libre en todos los enlaces de la ruta, en caso de no disponer de convertidores de longitud de onda. En un algoritmo RSA se debe hallar una ruta física y asignar un conjunto de ranuras de frecuencia para establecer una conexión. Análogo a RWA, existe la restricción de contigüidad espectral, en otras palabras, las ranuras de frecuencia atribuidas a una petición de conexión deben ser contiguas en espectro a lo largo de toda la ruta [23].

Dado que los recursos espectrales de las redes elásticas son provistos de manera dinámica (asignación de ancho de banda para nuevas conexiones y liberación del mismo para conexiones expiradas), la fragmentación del espectro es inevitable. Este proceso puede verse de manera análoga a la fragmentación de un disco duro en una computadora, donde al ir almacenando y eliminando archivos, éstos no quedan acomodados contiguamente. En ambas situaciones, el problema es mitigado haciendo una desfragmentación. Un problema relacionado, pero diferente, será la necesidad de expandir los súper canales con el tiempo, esta habilidad llegará en algún punto su límite por falta de espectro disponible. Para lidiar con estas situaciones, se requerirá en las redes ópticas flexibles una reasignación de espectro también dinámica [7].

Como la mayoría de los fragmentos espectrales no son contiguos en el dominio de la frecuencia ni son continuos (los mismos a lo largo de los enlaces), son difíciles de utilizar. Esto puede aumentar las probabilidades de bloqueo y limitar el volumen máximo de tráfico que puede ser transportado por la red. Con la desfragmentación del espectro se pretende consolidar estos recursos para facultar un uso más eficiente de ellos, y en general del espectro disponible en la red [24].

El concepto de desfragmentación no es propio de las redes flexibles, fue introducido por primera vez en 1996 para redes WDM con una estrategia llamada *move-to-vacant wavelength retuning*, basada en reasignar a otras longitudes de onda los enlaces ópticos establecidos, con el fin hacer espacio suficiente para nuevas conexiones. Debido al impacto de este aporte, en los años siguientes se intensificó el estudio de estas estrategias, siendo un aspecto de gran relevancia en las redes elásticas. Para la desfragmentación en EONs una de las soluciones propuestas es aprovechar la capacidad que algunos WSSs tienen para realizar conversión de longitud de onda, con esto la probabilidad de bloqueo puede reducirse en un 50%, a expensas de aumentar notablemente el costo de la capa óptica de la red [23] [24]. Otro enfoque es el

uso de algoritmos que realizan la desfragmentación del espectro por medio de redireccionamiento en lugar de conversión de longitud de onda, donde la nueva ruta es establecida antes de hacer el redireccionamiento. Con esta técnica la cantidad de rutas optimizadas incrementa en un 10% [23]. Una propuesta más es el uso de dispositivos con arquitecturas tipo nodo óptico flexible (como las de un ROADM elástico). Se demostró experimentalmente que por medio de esta técnica la capacidad de las redes ópticas de comunicaciones puede mejorar en un 40% [25].

Referencias

- [1] Transmode, *Transmode's Flexible Optical Networks*, Transmode Application Notes, <http://www.transmode.com/en/technologies/flexible-optical-networks>
- [2] Ioannis Tomkos et al., *Next Generation Flexible and Cognitive Heterogeneous Optical Networks Supporting the Evolution to the Future Internet*, First Future Internet Assembly (FIA), 2012.
- [3] Ioannis Tomkos et al., *A Survey of Recent Developments on Flexible/Elastic Optical Networking*, 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1-6, 2012.
- [4] K. Christodoulopoulos et al., *Planning Flexible Optical Networks Under Physical Layer Constraints*, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 5, No. 11, pp. 1296-1312, 2013.
- [5] Alcatel-Lucent, *Metro Network Traffic Growth: An Architecture Impact Study*, Alcatel-Lucent, 2013.
- [6] Masahiko Jinno et al., *Elastic and Adaptive Optical Networks: Possible Adoption Scenarios and Future Standardization Aspects*, IEEE Communications Magazine, Vol. 49, No. 10, pp. 164 -172, 2011.
- [7] Ori Gerstel et al., *Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?*, IEEE Communications Magazine, Vol. 50, No. 2, pp. s12-s20, 2012.
- [8] I. Stiakogiannakis et al., *On the Cost Efficiency of Flexible Optical Networking Compared to Conventional SLR/MLR WDM Networks*, 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1-4, 2013.
- [9] Sheryl L. Woodward, *ROADM options in optical networks: flexible grid or not?*, Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, pp. 1-3, 2013.
- [10] Masahiko Jinno et al., *Demonstration of Novel Spectrum-Efficient Elastic Optical Path Network with Per-Channel Variable Capacity of 40 Gb/s to Over 400 Gb/s*, 34th European Conference on Optical Communication (ECOC), pp. 1-2, 2008.
- [11] ITU-T, *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*, ITU-T Recommendation G.694.1, 2012.
- [12] Victor López et al., *Target Cost for Sliceable Bandwidth Variable Transponders in a Real Core Network*, Future Network and Mobile Summit (Future Network Summit), 2013.
- [13] Stephanie Michel, *Complex coding concepts for increased optical bit transfer efficiency*, 2013, <http://www.lightwaveonline.com/articles/2013/07/complex-coding-concepts-for-increased-optical-bit-transfer-efficiency.html>
- [14] Geoff Bennett, *Superchannels to the rescue!*, 2012, <http://www.lightwaveonline.com/articles/print/volume-29/issue-2/features/superchannels-to-the-rescue.html>

- [15] Gabriella Bosco et al., *On the Performance of Nyquist-WDM Terabit Superchannels Based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM Subcarriers*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 29, No. 1, pp. 53-61, 2011.
- [16] R. Freund et al., *Single- and Multi-Carrier Techniques to Build up Tb/s per Channel Transmission Systems*, 12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1-7, 2010.
- [17] Neda Cvijetic, *OFDM for Next-Generation Optical Access Networks*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, No. 4, pp. 384-398, 2012.
- [18] Arthur J. Lowery, Liang B. Du, *Optical orthogonal division multiplexing for long haul optical communications: A review of the first five years*, Optical Fiber Technology, Vol. 17, No. 5, pp. 421-438, 2011.
- [19] Steven Gringeri et al., *Flexible architectures for optical transport nodes and networks*, IEEE Communications Magazine, Vol.48, No.7, pp. 40-50, 2010.
- [20] Ramón Gutiérrez Castrejón, *Apuntes del curso: Sistemas ópticos de transmisión*, Instituto de Ingeniería, UNAM, 2014.
- [21] Norberto Amaya et al., *Introducing node architecture flexibility for elastic optical networks*, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 5, No. 6, pp. 593-608, 2013.
- [22] Sheryl L. Woodward, Mark D. Feuer, *Benefits and Requirements of Flexible-Grid ROADMs and Networks*, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 5, No. 10, pp. A19-A27, 2013.
- [23] Alberto Castro et al., *Dynamic routing and spectrum (re)allocation in future flexgrid optical networks*, Computer Networks, Vol. 56, No. 12, pp. 2869–2883, 2012.
- [24] Ke Wen et al., *Adaptive Spectrum Control and Management in Elastic Optical Networks*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 31, No.1, pp. 39-48, 2013.
- [25] Fujitsu, *Fujitsu Develops World's First Technology to Increase Efficiency of In-Service Optical Network Resources*, 2012, <http://www.fujitsu.com/global/news/pr/archives/month/2012/20120919-01.html>

CAPÍTULO 3. ALGORITMO PARA LA INTEGRACIÓN ÓPTIMA DE SÚPER CANALES

Con el propósito de satisfacer las diferentes necesidades de ancho de banda para todas las aplicaciones de comunicaciones, se han empleado diferentes tecnologías, cada una de ellas con características y ventajas propias, haciendo que la elección de una u otra sea la más rentable para cubrir cierta demanda. Una buena manera de elegir un sistema de comunicaciones es comparar la tasa de transmisión y distancia requerida en la conexión, con la máxima tasa de transmisión que puede soportar dicho sistema para un enlace con cierta distancia de transmisión libre de regeneradores. La distancia de transmisión libre de regeneradores es aquella distancia que un enlace puede alcanzar sin necesidad de detectar y retransmitir la información digital que se encuentra en la señal óptica [1].

El continuo crecimiento de servicios de datos, así como el ancho de banda que éstos exigen, han despertado un enorme interés por alcanzar la máxima distancia de transmisión libre de regeneradores, en conjunto con la necesidad de agregar mayor capacidad en el sistema (dada por la suma de las tasas de transmisión a la que opera cada uno de los canales que lo componen), buscando simultáneamente la reducción de costo por bit de información transportado [2].

Tomando en cuenta lo anterior, el transceptor juega un papel crucial en las redes ópticas flexibles. Se sabe que el transceptor segmentado de ancho de banda variable debe ser capaz de elegir el formato de modulación y el ancho de banda de cada uno de los canales que formarán el súper-canal. Para su óptima configuración, se requiere un algoritmo (así como el software que lo ejecute) que con base en parámetros de entrada como número de canales, tasa de transmisión y alcance (ambas características para cada uno de ellos), realice un proceso de maximización de la eficiencia espectral. En esta sección se propone y explica un algoritmo que realiza justamente esa función.

3.1 Consideraciones en el Desarrollo del Algoritmo

En esta tesis se desarrolla, se implanta en un lenguaje de programación y se presenta de manera gráfica un algoritmo para la integración óptima de súper canales en redes ópticas flexibles. Se considera que dichas redes están basadas en enlaces de hasta 5000 km de fibra óptica monomodo. Los canales que conforman el súper-canal tienen como máxima tasa de transmisión 960 Gbps. Se contemplan cuatro formatos de modulación (DP-BPSK, DP-QPSK, DP-8QAM, DP-16QAM) con sus respectivas peculiaridades, tales como ancho de banda, máxima distancia de transmisión libre de regeneradores y eficiencia espectral.

Con el fin de seleccionar y asignar adecuadamente los parámetros a cada uno de los canales que conforman el súper-canal, el algoritmo toma en cuenta la tasa de transmisión por canal y la distancia que

éste debe cubrir. Además, está pensado para que el transceptor óptico segmentado de ancho de banda variable (o un conjunto de ellos si la demanda a suplir es muy grande) genere las señales con las características necesarias para maximizar la eficiencia espectral y minimizar el ancho de banda, al mismo tiempo que minimiza el costo de la transmisión, como se explica a continuación.

Se estiman tres rutas de optimización partiendo de la elección de un sistema de comunicaciones arriba mencionada: comparar la tasa de transmisión y distancia requerida en la conexión, con la máxima tasa de transmisión que puede soportar dicho sistema para un enlace con cierta distancia de transmisión libre de regeneradores. Para poder ejecutar la comparación, es necesario conocer los valores de tasa de transmisión y distancia para cada canal que compondrá el súper-canal. La optimización se hace de acuerdo con los parámetros de la tabla 3.1.

La primera ruta (representada en la figura 3.1) se denominó solución simple. En ésta, el algoritmo asigna a cada canal un formato de modulación, con su respectivo ancho de banda, basado en los valores de la tasa de transmisión y distancia del enlace. Para ello, primero se selecciona el formato de modulación dentro de los mostrados en la tabla 3.1 que tenga el menor ancho de banda, máxima eficiencia espectral y satisfaga en longitud la totalidad del enlace. Con base a estos parámetros asociados, se calcula el ancho de banda mínimo necesario y la tasa de símbolos que debe emplear el transmisor para generar la señal con el esquema de modulación resultante de la optimización. Esta solución está limitada por la máxima distancia libre de regeneradores que se puede alcanzar con cada formato de modulación, por lo que se hace imprescindible hacer un segundo y tercer proceso de optimización.

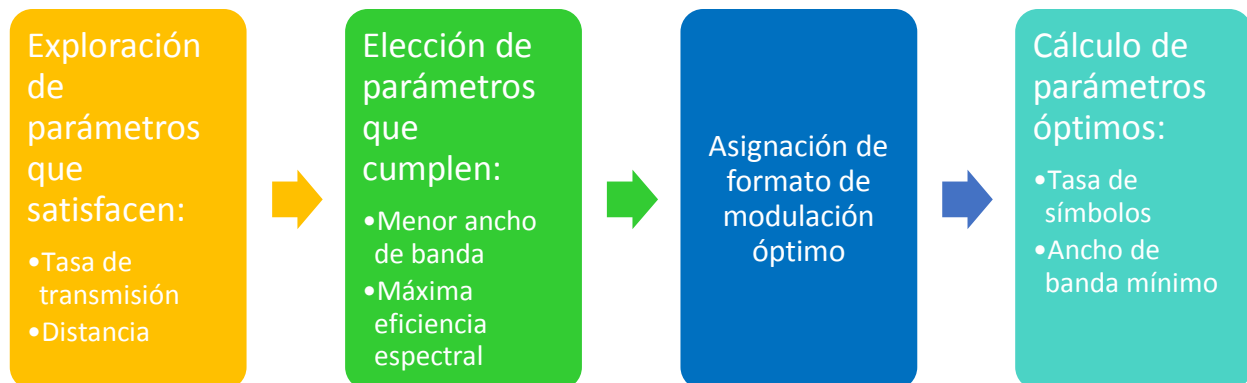


Figura 3.1 Diagrama de la ruta de optimización para la solución simple.

La segunda ruta de optimización se llamó *spans* y es ejecutada exclusivamente cuando no existe solución simple. Como su nombre lo indica, se hace uso de *spans*, o subenlaces de diseño óptimo, con sus respectivos regeneradores, para cubrir íntegramente la longitud del enlace. En términos generales, el algoritmo se basa en la tasa de transmisión que requiere el enlace para seleccionar el formato de modulación con menor ancho de banda y máxima eficiencia espectral como se muestra en la tabla 3.1. Con la distancia asociada al esquema de modulación seleccionado se calcula la cantidad de *spans* requeridos. Igual que en el proceso anterior, tomando como base los parámetros seleccionados en el proceso de optimización, se calcula el ancho de banda necesario en el enlace y la tasa de símbolos del transmisor óptico. La ejecución de esta rutina se muestra gráficamente en la figura 3.2. Cabe mencionar que el costo del sistema se ve considerablemente incrementado por el uso de regeneradores, pero la importancia de ésta solución radica en que para poder ser aplicada o descartada debe conocerse la infraestructura de red que recorrerá el súper-canal.

Finalmente, como tercer proceso de optimización, se tiene la solución de multisubcanales que sugiere el uso de un conjunto de subcanales para crear el canal que formará parte del súper-canal. Esta solución es ejecutada cuando una u otra de las dos circunstancias presentadas a continuación sucedan. La primera es, de igual modo que la solución *spans*, cuando no existe solución simple para los parámetros de entrada del canal. Y la segunda, cuando la tasa de transmisión requerida en el enlace, de acuerdo con la tabla 3.1, supera los 480 Gbps.

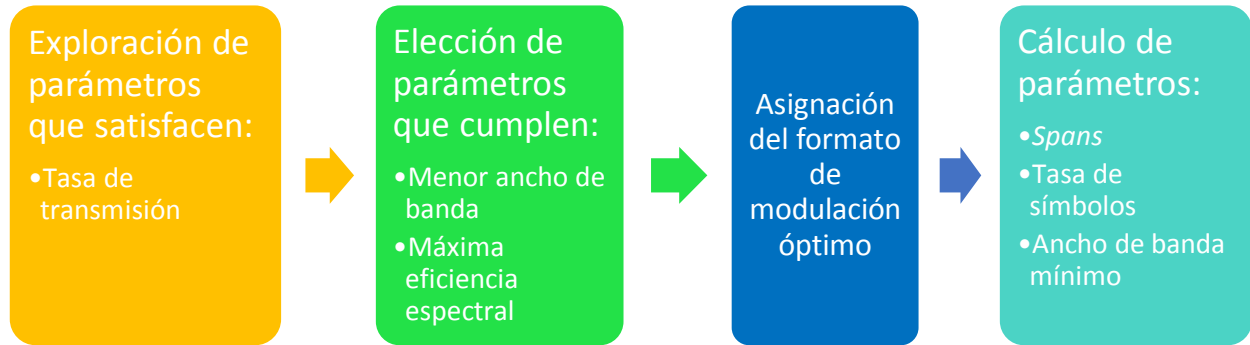


Figura 3.2 Diagrama de la ruta de optimización para la solución *spans*.

La finalidad de hacer uso de multisubcanales es brindar al usuario una segunda opción mediante el costo del sistema al no emplear *spans*, pero requerir, por canal, de tecnología más sofisticada (explicada al final de la siguiente sección) en el transceptor segmentado de ancho de banda variable. Por otro lado, la necesidad de transmitir a tasas superiores a los 480 Gbps hace inevitable el uso de multisubcanales, generados también a partir de tecnología más sofisticada. En esta ruta, para la selección de parámetros, el algoritmo primero considera la longitud que debe cubrir el enlace. Con base en ella selecciona una combinación de subcanales (basados en la tabla 3.1) que satisfagan, tanto la distancia como la tasa de transmisión que requiere la conexión, siempre buscando emplear el menor ancho de banda y la máxima eficiencia espectral. Finalmente, se calcula la tasa de transmisión de cada subcanal, el ancho de banda mínimo necesario para el enlace y la tasa de símbolos a la que debe trabajar el transmisor. Un diagrama general para la solución de multisubcanales se presenta en la figura 3.3.

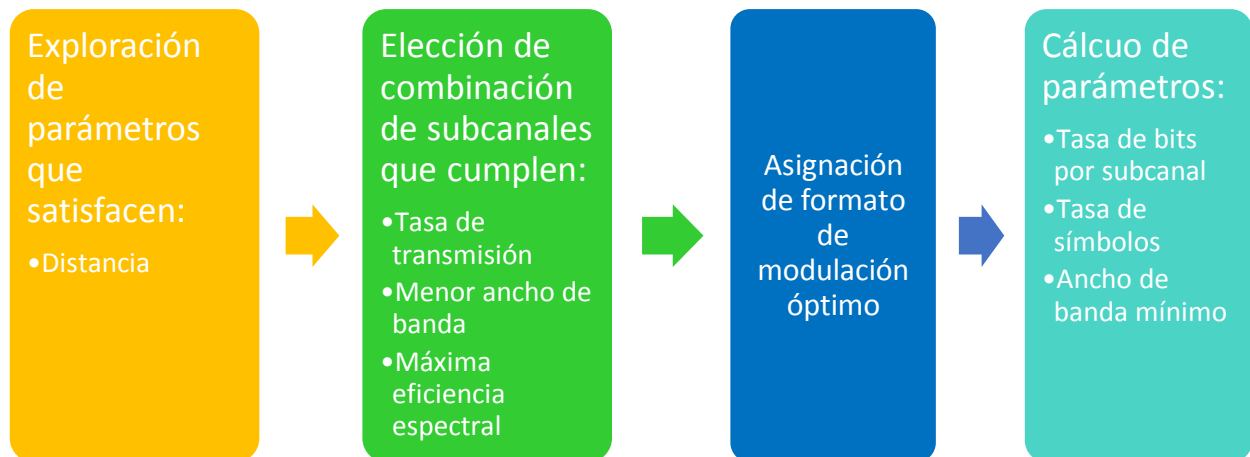


Figura 3.3 Diagrama de la ruta de optimización para la solución multisubcanales.

3.2 Parámetros para el Proceso de Optimización

Los parámetros empleados para el proceso de optimización del presente trabajo fueron elegidos después de una exhaustiva búsqueda bibliográfica dentro de una inmensidad de artículos sobre redes basadas en tecnología WDM, hojas de especificaciones para dichas tecnologías, además de varios artículos sobre prototipos de redes y tecnologías flexibles (desgraciadamente el acceso a los recursos bibliográficos más recientes de este campo se encuentra aún muy limitado).

La elección de los parámetros fue compleja porque en su mayoría, éstos no son consistentes entre sí de un artículo a otro o de una hoja de especificaciones a otra, dicho de otra manera, no se encontraron dos artículos u hojas de especificaciones donde las condiciones del enlace fueran las mismas, lo que hace difícil tener un punto de comparación del desempeño entre tecnologías. Por ejemplo, en tecnologías de transmisión, es difícil comparar la máxima distancia de transmisión libre de regeneradores, piedra angular del algoritmo, presentada en dos artículos diferentes (aun empleando la misma tasa de transmisión y el mismo esquema de modulación), porque la transmisión puede hacerse sobre diferentes tipos de fibra óptica, generalmente empleando diferente potencia de transmisión, diferente FEC, diferente BER etc. haciendo que se tenga una excesiva cantidad de variables para examinar. Asimismo, dentro de los artículos consultados, existen algunos con un análisis paramétrico muy bueno y consistente, que bien pudo haberse empleado en el algoritmo, pero en su mayoría carecían de alguna de las características necesarias en el proceso de optimización, como ancho de banda o máxima distancia de transmisión libre de regeneradores, por lo que fueron descartados. El único artículo que reunió consistencia y todas las características necesarias para poder ser empleado fue *Flexible Bandwidth and Bit-Rate Programmability in Future Optical Networks* presentado en 2012 en la décimo cuarta edición de la Conferencia Internacional sobre Redes Ópticas Transparentes.

Cabe mencionar que otro procedimiento para elegir los parámetros, o constatar los elegidos, hubiera sido realizar simulaciones en algún *software* que permita evaluar el desempeño de los sistemas de comunicaciones ópticos, como *Virtual Photonics Inc.* (VPI). Sin embargo, debido a las limitaciones en tiempo y la magnitud que dicho proyecto implicaría (realizar, tanto simulaciones individuales para cada canal, como un sinnúmero de casos para integración del súper canal), esa alternativa quedó fuera del alcance de esta tesis. La tabla 3.1 concentra los parámetros usados en el proceso de optimización, misma que fue extraída del artículo referido.

El algoritmo fue diseñado para un transceptor que puede programar hasta cuatro diferentes formatos de modulación de alto orden, multiplexados por modos de polarización: DP-BPSK, DP-QPSK, DP-8QAM y DP-16QAM. La segunda columna de la tabla 3.1, perteneciente a la tasa de transmisión, se divide en dos secciones, la carga útil de la transmisión y la tasa de transmisión total empleando un FEC del 20% (con el fin de minimizar errores en la transmisión). Por tanto, las tasas de transmisión consideradas en el algoritmo van de 1 a 960 Gbps. Se hace mención de 960 Gbps y no de 480 Gbps (como aparece en dicha tabla) porque en realidad, con la solución de multisubcanales, pueden optimizarse parámetros para tasas de transmisión de hasta 960 Gbps. Cabe mencionar que los 960 Gbps fueron establecidos como máximo por razones físicas y por la densidad de dispositivos que se puede alcanzar. La tercera columna exhibe la distancia de transmisión libre de regeneradores (máximo alcance) en kilómetros que se puede alcanzar con cierta modulación, trabajando a la tasa de transmisión dada, haciendo posible que el algoritmo trabaje con una distancia mínima de 1 km y una distancia máxima de 5000 km.

Se considera que el transceptor también puede adaptar la tasa de símbolos que utiliza según sea necesario, para ello se toma como referencia las tasas mostradas en la cuarta columna (30, 60 y 75 Gbaud). Los bits por símbolo empleados (quinta columna) son determinados de acuerdo al formato de modulación seleccionado; así, para DP-BPSK se tienen 2 bits por símbolo, para DP-QPSK 4 bits por símbolo, para DP-8QAM 6 bits por símbolo y, finalmente, para DP-16QAM 8 bits por símbolo.

La columna número seis contiene el mínimo número de ranuras en frecuencia necesarias para cada trío: esquema de modulación, tasa de bits y distancia. Cada ranura es de 12.5 GHz según la recomendación ITU-T G.694.1. En el algoritmo, el número de ranuras (equivalentes al ancho de banda) se calcula con referencia a las mostradas en dicha tabla.

Finalmente, en la séptima columna, se expone el producto de la eficiencia espectral por la distancia de transmisión libre de regeneradores (*Spectral Efficiency -Distance-Product*, SEDP) cuyas unidades son $\text{km} \cdot \text{b/s/Hz}$. El SEDP fue calculado a partir de la tasa de bits (con FEC) y el ancho espectral que ocupan las ranuras que se reportan en la columna seis. El SEDP es relevante porque es un indicador que permite evaluar las capacidades generales del transceptor óptico. No sólo es importante saber que el formato de modulación generado tiene una alta eficiencia espectral, sino que también es capaz de llegar a largas distancias, resultando en que un mayor SEDP equivale a un mejor desempeño.

Para la solución de multicanales también se hace uso de la tabla 3.2 y la tabla 3.3. La tabla 3.2 es para velocidades de transmisión de hasta 480 Gbps. Contiene propuestas de agrupaciones de subcanales calculadas para cada velocidad de transmisión (carga útil) de la tabla 3.1, conjuntando los parámetros individuales mostrados en la misma. Se puso especial cuidado en cubrir distancias mayores a las asociadas a cada velocidad de transmisión en la tabla 3.1, haciendo uso del mínimo número de ranuras en frecuencia de 12.5 GHz. Cada canal propuesto y mostrado en la sección multicanales de la tabla 3.2 contiene el número de subcanales requeridos para formar el canal, con su respectiva tasa de transmisión, formato de modulación, total de ranuras en frecuencia de 12.5 GHz necesarias, la tasa de símbolos total y la máxima distancia que puede ser cubierta.

El siguiente proceso presentado es para conformar la solución de multicanales para 240 Gbps. Aunque el proceso es específico para esta tasa de bits, cabe aclarar que se llevó a cabo un desarrollo similar para las demás tasas presentadas. El procedimiento consiste en lo siguiente: primero se ubicó la distancia libre de regeneradores asociada a ella, o sea, 1700 km (en este caso la distancia es única, pero existen tasas de transmisión, como 100 Gbps, que pueden tener hasta tres distancias asociadas, cuando eso sucede, se toma la máxima); a partir de ella se buscaron tasas de transmisión menores y con mayor alcance: 48, 100 y 192 Gbps, éstas se agruparon de modo tal, que sumaran 240 Gbps o el número más cercano. La distancia que cada grupo puede cubrir, pertenece a la distancia mostrada en la tabla 3.1. Por ejemplo, para la primera solución de multicanales se tienen dos subcanales de 192 Gbps cuya distancia asociada, de acuerdo con la tabla 3.1, es 1900 km.

La tabla 3.3 se sugiere para dar solución a enlaces con velocidades de transmisión mayores a 480 Gbps acotados a 960 Gbps, por lo que podría verse como continuación de la tabla 3.2. La tabla contiene agrupaciones de subcanales calculadas también a partir de la carga útil de la tabla 3.1, por lo que las características consideradas son las mismas. Para constituir esta tabla se sigue un proceso similar al de la tabla 3.2.

Formato de Modulación	Tasa de Bits [Gbps]		Máximo Alcance [km]	Tasa de Símbolos [Gbaud]	Bits por Símbolo	Ranuras en Frecuencia [12.5 GHz]	SEDP [km*b/s/Hz]
	Carga útil	+FEC 20%					
DP-BPSK	48	60	5000	30	2	4	6000
DP-QPSK	100	120	1500	30	4	3	4800
DP-QPSK	100	120	2500	30	4	4	6000
DP-BPSK	100	120	3800	60	2	6	6080
DP-8QAM	144	180	1000	30	6	4	3600
DP-16QAM	192	240	300	30	8	3	1920
DP-16QAM	192	240	500	30	8	4	2400
DP-QPSK	192	240	1900	60	4	6	6080
DP-QPSK	240	300	1700	75	4	7	5828
DP-8QAM	288	360	800	60	6	6	3840
DP-16QAM	384	480	375	60	8	6	2400
DP-16QAM	480	600	350	75	8	7	2400

Tabla 3.1 Parámetros empleados para la integración óptima de súper canales [3].

Tasa de Bits [Gbps]	Multisubcanales					
48	---					
100	2x50/ DP-BPSK Total Gbaud: 60 Total de ranuras: 8 Hasta 5000 km					
144	2x100/DP-QPSK Total Gbaud: 60 Total de ranuras: 8 Hasta 2500 km	2x100/ DP-BPSK Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 12 Hasta 3800 km	3x48/ DP-BPSK Total Gbaud: 90 Total de ranuras: 12 Hasta 5000km			
192	2x100/DP-QPSK Total Gbaud: 60 Total de ranuras: 8 Hasta 2500 km	2x100/DP-BPSK Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 12 Hasta 3800 km	4x48/ DP-BPSK Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 16 Hasta 5000 km			
240	2x192/ DP-QPSK Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 12 Hasta 1900 km	3x100/ DP-QPSK Total Gbaud: 90 Total de ranuras: 12 Hasta 2500 km	3x100/ DP-BPSK Total Gbaud: 180 Total de ranuras: 18 Hasta 3800 km	5x48/ DP-BPSK Total Gbaud: 150 Total de ranuras: 20 Hasta 5000 km		
288	2x144/ DP-8QAM Total Gbaud: 60 Total de ranuras: 8 Hasta 1000 km	3x100/DP-QPSK Total Gbaud: 90 Total de ranuras: 9 Hasta 1500 km	2x192/DP-QPSK Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 12 Hasta 1900 km	3x100/DP-QPSK Total Gbaud: 90 Total de ranuras: 12 Hasta 2500 km	3x100/ DP-BPSK Total Gbaud: 180 Total de ranuras: 18 Hasta 3800 km	6x48/ DP-BPSK Total Gbaud: 180 Total de ranuras: 24 Hasta 5000 km
384	2x192/DP-16QAM Total Gbaud: 60 Total de ranuras: 8 Hasta 500 km	2x192/DP-QPSK Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 12 Hasta 1900 km	4x100/DP-QPSK Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 16 Hasta 2500 km	4x100/ DP-BPSK Total Gbaud: 240 Total de ranuras: 24 Hasta 3800 km	8x48/ DP-BPSK Total Gbaud: 240 Total de ranuras: 32 Hasta 5000 km	
480	2x288/ DP-8QAM Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 12 Hasta 800 km	2x240/DP-QPSK Total Gbaud: 150 Total de ranuras: 14 Hasta 1700 km	5x100/DP-QPSK Total Gbaud: 150 Total de ranuras: 20 Hasta 2500 km	5x100/ DP-BPSK Total Gbaud: 300 Total de ranuras: 30 Hasta 3800 km	10x48/ DP-BPSK Total Gbaud: 300 Total de ranuras: 40 Hasta 5000 km	

Tabla 3.2 Parámetros sugeridos para la solución de multisubcanales con tasas de transmisión de hasta 480 Gbps. Cada recuadro de la sección multisubcanales muestra el número de subcanales requeridos con su respectiva tasa de transmisión en Gbps, formato de modulación, tasa total de símbolos en Gbaud, total de ranuras en frecuencia de 12.5 GHz necesarias y la máxima distancia que puede ser cubierta.

Tasa de bits total [Gbps]	Formato de Modulación	Número de subcanales	Tasa de Bits [Gbps]	Máximo Alcance [km]	Tasa de Símbolos total [Gbaud]	Bits por Símbolo	Ranuras en Frecuencia [12.5 GHz]	SEDP [km*b/s/Hz]
960	DP-16QAM	2	480	350	150	8	14	2400
	DP-QPSK	5	192	1900	300	4	30	6080
	DP-QPSK	10	100	2500	300	4	40	6000
	DP-BPSK	10	100	3800	600	2	60	6080
	DP-BPSK	20	48	5000	600	2	80	6000

Tabla 3.3 Parámetros sugeridos para la solución de multisubcanales con tasas de transmisión superiores a 480 Gbps.

Para la integración de súper canales, el algoritmo fue diseñado para trabajar dentro del régimen de Generación de Onda Óptica Arbitraria (*Optical Arbitrary Waveform Generation, OAWG*). Se consideró que los canales resultantes de la solución simple y *spans* son generados ópticamente, mientras que los resultantes de la solución multisubcanales son generados electrónicamente para finalmente ser montados sobre una portadora óptica (tecnología más sofisticada), así se utiliza un transceptor virtual de ancho de banda variable (segmento) del transceptor segmentado de ancho de banda variable, teniendo tantos segmentos como número de canales, donde cada canal satisface las necesidades de un servicio de telecomunicaciones, por ejemplo, telefonía. El número máximo de canales no se limitó, sin embargo, se recomiendan 10 canales por súper canal.

3.3 Decisiones para el Proceso de Optimización

Como se mencionó, el algoritmo presenta tres soluciones para la integración de súper canales: solución simple, *spans* y solución de multisubcanales. El usuario debe otorgar los parámetros de entrada: velocidad de transmisión y distancia que se desea cubrir. Conociendo esto se procede a la optimización, cabe mencionar que los procesos descritos a continuación son ejecutados para cada uno de los canales que compondrán el súper-canal.

3.3.1 Solución Simple

En esta ruta, primero se compara la velocidad de transmisión introducida por el usuario (B_{in}) con todas y cada una de las velocidades de transmisión pertenecientes a la carga útil de la tabla 3.1 (B_{tabla}). Las velocidades de transmisión que sean mayores o iguales a la velocidad de entrada se establecen como posibles soluciones. Esta selección se ejemplifica con el grupo de velocidades de transmisión en color amarillo de la figura 3.4. En este ejemplo, el usuario introdujo una $B_{in} = 120$ Gbps y una distancia de transmisión $L_{in} = 400$ km.

Del nuevo grupo formado se hace una comparación de distancia. Como se aprecia en la misma figura, pero ahora en verde, las posibles soluciones ahora se reducen a aquellas en las que la distancia mostrada en la tabla (L_{tabla}) es mayor o igual a la distancia que requiere el usuario (L_{in}).

De éste último conjunto, se selecciona el par (velocidad de transmisión y distancia) que cumpla con el menor ancho de banda (BW_{min}), dado por el número de ranuras en frecuencia de 12.5 GHz y mostrado en

azul. En caso de existir dos o más soluciones, se procede a seleccionar el par que tenga el máximo valor del producto de la eficiencia espectral por la distancia de transmisión libre de regeneradores ($SEDP_{m\acute{a}x}$) con el fin de tener una solución (selección roja). El $SEDP_{m\acute{a}x}$ se establece como parámetro decisivo porque, como se mencionó en la sección anterior, es un parámetro que permite evaluar las capacidades generales del segmento del transceptor óptico. Entre mayor sea el $SEDP$, mejor es el desempeño del transceptor.

Con la tasa de símbolos ($R_{st\grave{a}bla} = 30$ Gbaud), los bits por símbolo ($F = 2$) y las ranuras en frecuencia de la solución ($S_{t\grave{a}bla} = 4$), se calculan la tasa de símbolos y el número de ranuras en frecuencia óptimos para el enlace que se desea optimizar. Para ello, primero se obtiene la tasa de bits total (con FEC de 20%) $R_b = B_{in} * 1.2$. Con ella se obtiene la tasa de símbolos (R_s) a la que debe adaptarse el segmento del transceptor óptico de ancho de banda variable responsable de generar el canal de acuerdo a $R_s = \frac{R_b}{F}$, donde F son los bits por símbolo que codifica el esquema de modulación seleccionado, en este caso 6 por tratarse de DP-8QAM. El número de ranuras en frecuencia (S) se obtiene mediante $S = \frac{R_s * S_{t\grave{a}bla}}{R_{st\grave{a}bla}}$. Obviamente, en caso de que el número de ranuras en frecuencia obtenido no sea entero, se utiliza el inmediato superior.

Finalmente, la tasa de bits con FEC, el esquema de modulación, la tasa de símbolos y el número de ranuras de 12.5 GHz recomendados para la conexión son presentados de forma visible en caso de que se satisfagan las condiciones anteriores. En caso contrario, se notifica al usuario y se ejecuta la solución *spans* y la solución de multisubcanales.

Formato de Modulación	Tasa de Bits [Gbps]		Máximo Alcance [km]	Tasa de Símbolos [Gbaud]	Bits por Símbolo	Ranuras en Frecuencia [12.5 GHz]	SEDP [km*b/s/Hz]
	Carga útil	+FEC 20%					
DP-BPSK	48	60	5000	30	2	4	6000
DP-QPSK	100	120	1500	30	4	3	4800
DP-QPSK	100	120	2500	30	4	4	6000
DP-8PSK	144	180	1000	60	2	6	3600
DP-8QAM	144	180	1000	30	6	4	3600
DP-16QAM	192	240	300	30	8	3	1920
DP-16QAM	192	240	500	30	8	4	2400
DP-QPSK	192	240	1900	60	4	6	6080
DP-QPSK	240	300	1700	75	4	6	5828
DP-8QAM	288	360	800	60	6	6	3840
DP-16QAM	384	480	375	60	8	6	2400
DP-16QAM	480	600	350	75	8	7	2400

Figura 3.4 Decisiones tomadas en el proceso de optimización para la solución simple.

3.3.2 Solución Spans

En este camino de optimización, del grupo formado con las velocidades de transmisión elegidas en la solución simple (aquellas que cumplen $B_{\text{tabla}} \geq B_{\text{in}}$), se selecciona la velocidad de transmisión que tenga el menor ancho de banda ($BW_{\text{mín}}$), como puede verse en azul en la figura 3.5. Dado el caso que exista dos o más soluciones, entonces se elige aquella que tenga un máximo SEDP para tener sólo una solución (selección roja).

Con la distancia asociada a la solución (L_s , mostrada en verde) se calcula el número de *spans* necesarios para el enlace. El algoritmo determina el número n de *spans* de acuerdo a la expresión $nL_s \geq L_{\text{in}}$. Continuando con el ejemplo del caso anterior, si en lugar de $L_{\text{in}} = 400$ km, se hubiera ingresado una distancia de $L_{\text{in}} = 2000$ km, la solución determinada por este algoritmo correspondería a DP-8QAM a 144 Gbps, formando dos *spans*, cada uno de 1000 km, tal como se indica en verde en la figura 3.5. Nótese, por ejemplo, que si la distancia requerida hubiera sido ligeramente menor, digamos $L_{\text{in}} = 1900$ km, la solución a base de *spans* no hubiera sido necesaria. En este caso, el algoritmo basado en la ruta simple hubiera convergido a la solución de DP-QPSK con carga útil de 192 Gbps. En otras palabras, tal y como ya se mencionó, el algoritmo que tiene prioridad sobre los otros dos es el simple. Los otros dos solamente se ejecutan cuando el primero no converge a una solución.

Por último, el programa discutido en esta sección, también muestra al usuario los parámetros recomendados a partir del algoritmo: tasa de bits con FEC, formato de modulación, tasa de símbolos y número de ranuras en frecuencia de 12.5 GHz (ambos calculados como se mencionó en la solución simple), así como el número de *spans* requeridos, su longitud y la máxima distancia que con éstos se puede alcanzar.

Formato de Modulación	Tasa de Bits [Gbps]		Máximo Alcance [km]	Tasa de Símbolos [Gbaud]	Bits por Símbolo	Ranuras en Frecuencia [12.5 GHz]	SEDP [km*b/s/Hz]
	Carga útil	+FEC 20%					
DP-BPSK	60	60	5000	30	2	4	6000
DP-QPSK	120	120	1500	30	4	3	4800
DP-QPSK	120	120	2500	30	4	4	6000
DP-8PSK	120	120	4000	60	2	6	6000
DP-8QAM	144	180	1000	30	6	4	3600
DP-16QAM	192	240	300	30	8	3	1920
DP-16QAM	192	240	500	30	8	4	2400
DP-QPSK	192	240	1900	60	4	6	6080
DP-QPSK	240	300	1700	75	4	6	5828
DP-8QAM	288	360	800	60	6	6	3840
DP-16QAM	384	480	375	60	8	6	2400
DP-16QAM	480	600	350	75	8	7	2400

Figura 3.5 Decisiones tomadas en el proceso de optimización para la solución spans.

3.3.3 Solución de Multisubcanales

Como se mencionó, la solución de multisubcanales se ejecuta bajo una de dos condiciones. La primera de ellas es que no exista solución simple para un enlace con velocidad de transmisión menor o igual a 480 Gbps. En este caso, del grupo resultante de la comparación $B_{\text{tabla}} \geq B_{\text{in}}$ se selecciona la tasa de bits igual o inmediata superior a la tasa de bits introducida por el usuario como puede observarse en la selección de color verde de la figura 3.6.

La tasa de bits seleccionada se busca entonces en la tabla 3.2 (selección verde de la figura 3.7). Después, se procede a comparar la distancia introducida por el usuario (L_{in}) con cada distancia de transmisión libre de regeneradores (L_{m}) asociadas a la tasa de bits B_{tabla} (selección roja). La solución, presentada en azul, será el conjunto de subcanales que cumple $L_{\text{m}} \geq L_{\text{in}}$ y cuyo número de ranuras en frecuencia es el menor. En caso de existir dos soluciones que satisfagan lo anterior, se elige la que tenga el menor número de subcanales.

Con los parámetros de la solución se calcula la tasa de bits con FEC por subcanal, la tasa de símbolos total (ambos subcanales) óptima a la que debe adaptarse el segmento del transmisor óptico y el número de ranuras en frecuencia que deben emplearse en la transmisión. El proceso seguido para dicho cálculo es el mismo que se explicó en la solución simple.

Formato de Modulación	Tasa de Bits [Gbps]		Máximo Alcance [km]	Tasa de Símbolos [Gbaud]	Bits por Símbolo	Ranuras en Frecuencia [12.5 GHz]	SEDP [km*b/s/Hz]
	Carga útil	+FEC 20%					
	60	5000	30	2	4	6000	
	120	1500	30	4	3	4800	
	250	2500	30	4	4	6000	
	380	3800	60	2	6	6080	
DP-8QAM	144	180	1000	30	6	3600	
DP-16QAM	192	240	300	30	8	1920	
DP-16QAM	192	240	500	30	8	2400	
DP-QPSK	192	240	1900	60	4	6080	
DP-QPSK	240	300	1700	75	4	5828	
DP-8QAM	288	360	800	60	6	3840	
DP-16QAM	384	480	375	60	8	2400	
DP-16QAM	480	600	350	75	8	2400	

Figura 3.6 Selección de la velocidad de transmisión en el proceso de optimización para la solución de multisubcanales.

Por último, el algoritmo presenta de forma visible al usuario los parámetros sugeridos: número de subcanales necesarios, tasa de bits total por subcanal en Gbps, formato de modulación para cada uno de ellos y total de Gbaud, así como el número total de ranuras de 12.5 GHz necesarias para el enlace.

Retomando el ejemplo que hemos analizado a lo largo de esta sección, donde $B_{in} = 120$ Gbps y $L_{in} = 2000$ km, se observa que efectivamente no hay solución simple y que se cumple con que $B_{in} < 480$ Gbps. De acuerdo con la figura 3.7, la solución propuesta por el algoritmo corresponde a la formación de un canal compuesto por dos subcanales, cada uno de 72 Gbps con FEC incluido (calculados a partir de los dos subcanales 100 Gbps sugeridos), cuyo alcance máximo es de 2500 km. Esto, efectivamente, representa una solución al problema.

Tasa de Bits [Gbps]	Multisubcanales					
48	---					
100	3. Conjunto de posibles soluciones					
144	2x50/ DP-BPSK Total Gbaud: 60 Total de ranuras: 8 Hasta 5000 km	2x100/ DP-BPSK Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 12 Hasta 3800 km	3x48/ DP-BPSK Total Gbaud: 90 Total de ranuras: 12 Hasta 5000km			
192	2x100/DP-QPSK	2x100/DP-BPSK	4x48/ DP-BPSK			
240	4. Parámetros elegidos que satisfacen: $BW_{mín}$ $L_m \geq L_{in}$					
288	2x100/DP-QPSK Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 8 Hasta 1000 km	2x100/DP-QPSK Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 9 Hasta 1500 km	2x192/DP-QPSK Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 12 Hasta 1900 km	3x100/ DP-BPSK Total Gbaud: 180 Total de ranuras: 18 Hasta 3800 km	5x48/ DP-BPSK Total Gbaud: 150 Total de ranuras: 20 Hasta 5000 km	
384	2x192/DP-16QAM Total Gbaud: 60 Total de ranuras: 8 Hasta 500 km	2x192/DP-QPSK Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 12 Hasta 1900 km	4x100/DP-QPSK Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 16 Hasta 2500 km	4x100/ DP-BPSK Total Gbaud: 240 Total de ranuras: 24 Hasta 3800 km	8x48/ DP-BPSK Total Gbaud: 240 Total de ranuras: 32 Hasta 5000 km	
480	2x288/ DP-8QAM Total Gbaud: 120 Total de ranuras: 12 Hasta 800 km	2x240/DP-QPSK Total Gbaud: 150 Total de ranuras: 14 Hasta 1700 km	5x100/DP-QPSK Total Gbaud: 150 Total de ranuras: 20 Hasta 2500 km	5x100/ DP-BPSK Total Gbaud: 300 Total de ranuras: 30 Hasta 3800 km	10x48/ DP-BPSK Total Gbaud: 300 Total de ranuras: 40 Hasta 5000 km	

Figura 3.7 Solución elegida en el proceso de optimización para la solución de multisubcanales.

Por otro lado, si la segunda condición (velocidad de transmisión del enlace es superior a 480 Gbps) se cumple (con lo cual automáticamente se cumple con que no hay solución simple), se procede inmediatamente a comparar la distancia del enlace (L_{in}) con todas y cada una de las distancias de transmisión libres de regeneradores (L_m) de la tabla 3.3.

Aquellas distancias de transmisión libres de regeneradores que cumplan $L_m \geq L_{in}$ se establecen como posibles soluciones, mostradas en amarillo en la figura 3.8. Del nuevo grupo formado se establece como solución (selección verde) el conjunto de subcanales con menor número de ranuras en frecuencia. El ejemplo mostrado en la figura 3.8 podría corresponder a una $L_{in} = 1700$ km. A partir de estos parámetros, se calcula la tasa de transmisión total en Gbps para cada subcanal.

Finalmente se indica al usuario los parámetros recomendados para el segmento del transmisor: número de subcanales necesarios, tasa de transmisión con FEC en Gbps para cada subcanal en Gbps, formato de modulación para cada uno de ellos, tasa de símbolos total en Gbaud y el número de ranuras de 12.5 GHz necesarias para el enlace (estos dos últimos calculados como ya se mencionó).

Tasa de bits total [Gbps]	Formato de Modulación	Número de subcanales	Tasa de Bits [Gbps]	Máximo Alcance [km]	Tasa de Símbolos total [Gbaud]	Bits por Símbolo	Ranuras en Frecuencia [12.5 GHz]	SEDP [km*b/s/Hz]
960	DP-16QAM	2	480	350	150	8	14	2400
	DP-QPSK	5	192	1900	300	4	30	6080
	DP-QPSK			2500	300	4	40	6000
	DP-BPSK			3800	600	2		6080
	DP-BPSK	20	48	5000	600	2		6000

Figura 3.8 Decisiones tomadas en el proceso de optimización para la solución de multicanales con velocidades de transmisión superiores a 480 Gbps.

3.3.4 Alcance del Proceso de Optimización

Como se mencionó, los métodos planteados optimizan parámetros para enlaces con tasa de bits máxima de 960 Gbps y alcance máximo de 5000 km. Para tasas de transmisión menores o iguales a 480 Gbps se da prioridad a la solución simple, en caso que ésta no sea viable se plantean las soluciones de *spans* y de multicanales con el fin de siempre obtener una solución al problema. Para tasas de transmisión superiores a 480 Gbps y de hasta 960 Gbps el problema es resuelto por medio de multicanales.

Cuando el algoritmo arroja dos soluciones (*spans* y multicanales para tasas de transmisión menores o iguales a 480 Gbps) existe la interrogante de cuál debe emplearse. Se decidió no dar prioridad a ninguna de ellas para que sea el usuario quien tome la decisión final, basada en la infraestructura de red por la que viajará el súper-canal. Esto se debe a que ésta puede estar formada por *spans* con las características resultantes en el proceso de optimización, en cuyo caso sería la mejor opción para usar. En caso contrario se recomienda optar por la opción multicanales.

3.4 Implementación del Algoritmo en un Lenguaje Gráfico de Programación: NI LabVIEW

Para presentar de manera gráfica el algoritmo es necesario implantarlo en un lenguaje de programación adecuado. Se requiere mostrar el algoritmo en una interfaz de usuario porque ésta representa un elemento indispensable en el diseño y operación de las redes ópticas flexibles. La interfaz debe permitir visualizar los parámetros ópticos requeridos en el transceptor óptico segmentado de ancho de banda variable.

Se optó por utilizar el software *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench* creado por *National Instruments* y conocido por sus siglas como LabVIEW. LabVIEW es un lenguaje de programación gráfico diseñado para áreas científicas y de ingeniería. En general, LabVIEW es usado mayormente para crear aplicaciones de control o para adquisición, análisis, presentación y almacenamiento de datos, pero dada su capacidad de desarrollo de programas, también se ha utilizado para la creación de sofisticados paquetes de simulación [5] Los programas creados en él son llamados Instrumentos Virtuales (*Virtual Instruments, VIs*) debido a que en apariencia y funcionamiento pueden imitar instrumentos reales [4].

Un VI consta de una interfaz interactiva de usuario y un diagrama de flujo de datos que hace las veces de código fuente. La interfaz interactiva se llama Panel Frontal (*Front Panel*) porque simula el panel frontal de un instrumento físico y puede contener una gran variedad de botones, gráficas, controles e indicadores para la entrada y salida de datos. El programa recibe las instrucciones a ejecutar del diagrama de flujo de datos llamado Diagrama de Bloques (*Block Diagram*) construido en lenguaje G.

Algunas de las características por las que se eligió este lenguaje se enuncian a continuación:

- Se pueden diseñar fácilmente aplicaciones complejas utilizando una estructura jerárquica y usando elementos comunes varias veces dentro de la aplicación. Dicha característica es muy importante para el desarrollo del algoritmo, ya que como se vio en la sección 3.3 existen procesos que se usan en más de una solución.
- Es capaz de ejecutar tareas simultáneas aprovechando las ventajas de tener múltiples procesadores. Esta propiedad es importante, ya que el algoritmo puede ejecutarse en paralelo.
- Una de sus peculiaridades es que muestra los resultados con interfaces de usuario personalizadas, lo que lo hace ideal para el algoritmo.
- Emplea lenguaje G. Las aplicaciones son creadas a partir de diagramas de bloques en lugar de líneas de texto.
- Fácil depuración de las aplicaciones creadas.
- Los programas creados son escalables.
- Es intuitivo y fácil de aprender.

3.4.1 Integrador de Súper Canales: Panel Frontal

Una de las partes del VI es el panel frontal, donde se encuentran los elementos interactivos necesarios para la entrada y salida de datos. La figura 3.9 pertenece a la interfaz gráfica creada para el algoritmo. Se aprecian tres secciones: parámetros de entrada, parámetros sugeridos por canal y parámetros sugeridos para la integración del súper-canal.

La sección parámetros de entrada contiene un controlador numérico llamado Número de Canales, cuya función es indicar al programa precisamente el número de canales que compondrán el súper canal, junto al él se encuentra un botón con la leyenda OK para indicar que el valor introducido es correcto. Dentro de esta sección también se encuentran dos controladores numéricos llamados tasa de bits [Gbps] y distancia [km] respectivamente. Por medio de ellos se introducen los valores tasa de bits y distancia para cada canal, al pulsar el botón OK se indica al programa que el par introducido es correcto. También se hace uso de un indicador cuya función es únicamente señalar al usuario el número de canal para el que se están introduciendo los valores. El valor de este indicador cambia cada vez que el segundo botón OK es pulsado, advirtiendo al usuario que puede ingresar los valores del siguiente canal.

La sección parámetros sugeridos por canal está compuesta a su vez de cuatro secciones, la primera indica la tasa de bits total (tasa de bits de entrada + 20% de FEC) del enlace, las siguientes tres contienen una de las soluciones descritas con anterioridad (simple, *spans* y multisubcanales). Se hace uso de indicadores en forma de cuadro de texto o LED para mostrar al usuario los resultados obtenidos en la optimización de

cada canal. Los valores mostrados cambian de acuerdo con el canal para el que se introdujeron los parámetros en la sección parámetros de entrada.

La sección parámetros sugeridos para la integración del súper-canal se dividió también en cuatro secciones: parámetros de entrada, tasa de bits total, solución simple / *spans* y solución multisubcanales. Esta sección muestra el conjunto de soluciones obtenidas para todos y cada uno de los canales que forman el súper-canal, por medio de arreglos de indicadores de cuadro de texto y arreglos de LEDs. Cabe mencionar que el conjunto de soluciones se muestra cuando se ha concluido con la introducción de parámetros para todos los canales.

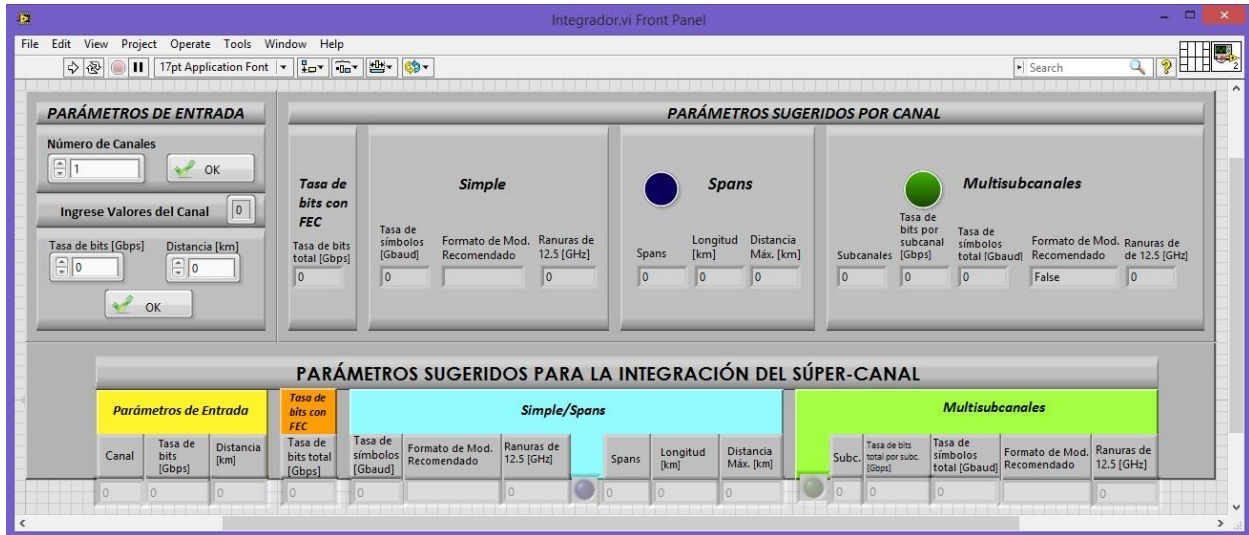


Figura 3.9 Panel frontal de la Interfaz gráfica creada en LabVIEW.

3.4.2 Integrador de Súper Canales: Diagrama de Bloques

Además del panel frontal, es necesario el diagrama de bloques con las instrucciones necesarias para la correcta ejecución del programa. La figura 3.10 muestra una parte del diagrama de bloques usado para la implantación del algoritmo en lenguaje G.

La figura pertenece a la parte del programa correspondiente a la comparación $B_{\text{tabla}} \geq B_{\text{in}}$. Como puede apreciarse se hace uso de un arreglo (Tasa de Bits) para almacenar las tasas de transmisión de la tabla 3.1. Para efectuar la comparación mencionada se emplea una estructura *case*, cuando la condición se cumple el programa ejecuta lo que se encuentra dentro de la etiqueta *true*, que es guardar la B_{tabla} que satisface la condición en el arreglo llamado $B_{\text{tabla}} \geq B_{\text{in}}$ y su índice en el arreglo llamado Index de B en tabla. Como se necesita verificar si la condición se cumple para todas las B_{tabla} se colocó un ciclo *for*. Además, en la misma sección se extraen las distancias asociadas a las B_{tabla} que cumplen la condición anterior y se guardan en el arreglo Distancias de Tasas. Las distancias de la tabla 3.1 están almacenadas en el arreglo Alcance Máx. Para crear los arreglos $B_{\text{tabla}} \geq B_{\text{in}}$, Index de B en tabla y Distancias de Tasas se ocupan las funciones de programación *Build Array* e *Index Array*.

Describir cada parte del programa sería demasiado extenso y tedioso, pero en general, se puede decir que las decisiones descritas en la sección 3.3 se basan en comparaciones y estructuras *case*. Para que estas comparaciones se ejecuten en repetidas ocasiones se colocaron en ciclos *for*. Los conjuntos de parámetros resultantes de cada comparación son guardados por medio de funciones de programación *Build Array*, *Index Array*, *Array Max & Min*, entre otras. Además, para lograr la estética presentada en la interfaz de usuario en el panel frontal, se requirió de numerosos arreglos de controles e indicadores dentro de estructuras *while*, *event*, *case* y *for*.

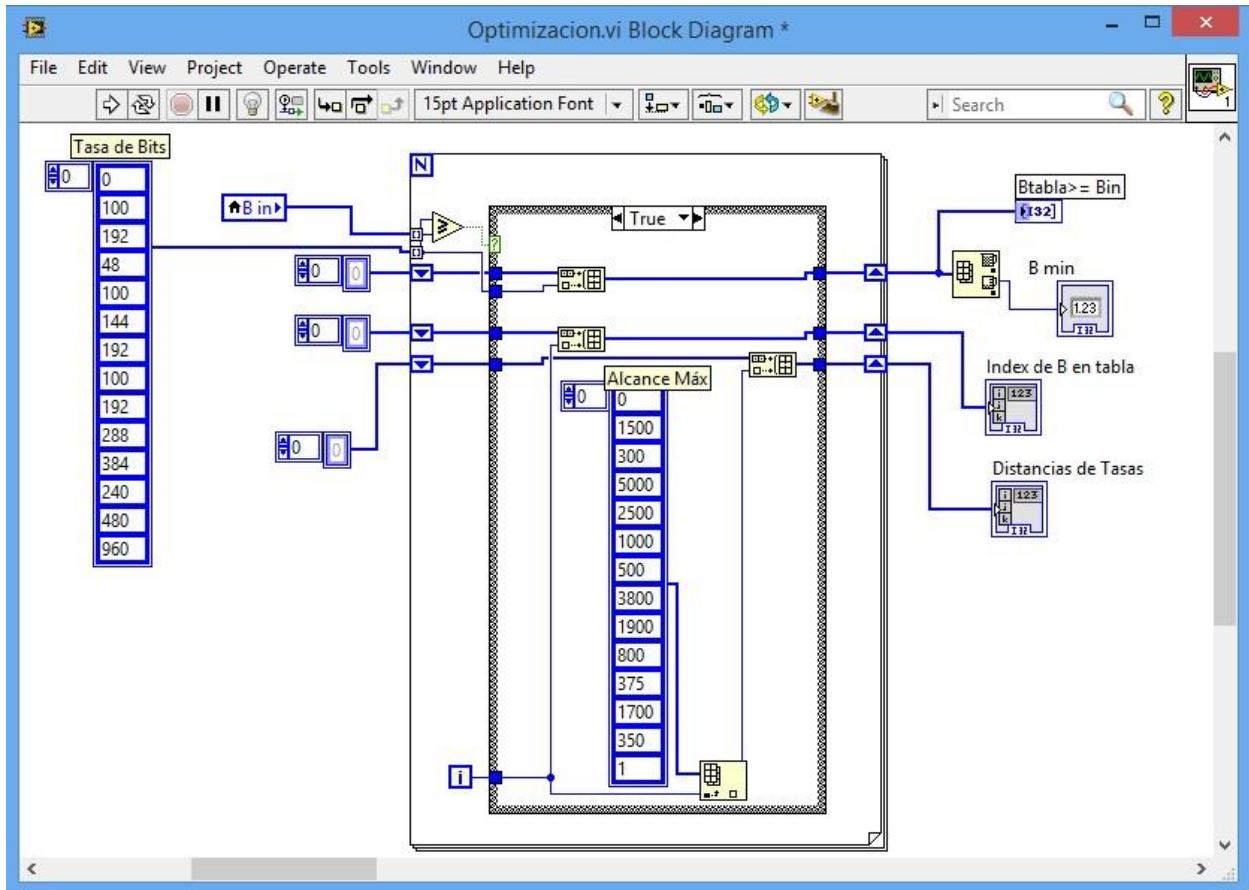


Figura 3.10 Diagrama de bloques de la Interfaz gráfica creada en LabVIEW.

Referencias

- [1] Yang Jing Wen, et al., *Advanced data modulation techniques for WDM transmission*, IEEE Communications Magazine, Vol. 44, No. 8, pp. 58-65, 2006.
- [2] Ramón Gutiérrez Castrejón, *Apuntes del curso: Sistemas ópticos de transmisión*, Instituto de Ingeniería, UNAM, 2014.
- [3] Brian T. Teipen, et al., *Flexible Bandwidth and Bit-Rate Programmability in Future Optical Networks*, 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1-4, 2012.
- [4] National Instruments, *LabVIEW User Manual*, National Instruments.
- [5] R. Gutiérrez-Castrejón, M. Duell; *Using LabVIEW for Advanced Nonlinear Optoelectronic Device Simulations in High-Speed Optical Communications*. Computer Physics Communications Vol. 174, p. 431-440, 2006.

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL ALGORITMO Y RESULTADOS

4.1 Validación del Algoritmo

En esta sección se presentan súper canales formados por un solo canal. Los ejemplos mostrados son meramente ilustrativos del funcionamiento del algoritmo implantado en LabVIEW, pues realmente un súper-canal está formado por varios canales. Este ejercicio, sin embargo, es útil para revisar y demostrar el correcto funcionamiento del programa desarrollado.

Para el primer ejemplo, en la interfaz de usuario se introdujeron los parámetros para un enlace con tasa de 40 Gbps y distancia de 1400 km. Obviamente, como el súper-canal es unicanal, el número de canales que se introdujo fue 1. Con base en la toma de decisiones tratadas en el capítulo anterior, se obtiene que la solución óptima para $B_{in} = 40$ Gbps y $L_{in} = 1400$ km, es la simple con dos ranuras de 12.5 GHz y modulación DP-QPSK, como se expone en la figura 4.1. De acuerdo a los resultados obtenidos, el transceptor debe adaptar la tasa de símbolos a 12 Gbaud para generar una señal óptica de 48 Gbps (40 Gbps de carga útil y 8 Gbps de FEC).



Figura 4.1 Optimización de parámetros para $B_{in} = 40$ Gbps y $L_{in} = 1400$ km.

Ahora, empleando la misma $B_{in} = 40$ Gbps, pero con una distancia 200 km mayor a la anterior, $L_{in} = 1600$ km, el algoritmo arroja los parámetros mostrados en la figura 4.2. En este caso, aunque la solución también pertenece a la solución simple, el algoritmo indica que los parámetros óptimos para el enlace son: modulación DP-BPSK y 4 ranuras en frecuencia. El transceptor óptico debe acondicionar la tasa de símbolos a 24 Gbaud para generar los 48 Gbps.

Cabe mencionar que de acuerdo con las decisiones presentadas en el capítulo 3, otra solución igualmente funcional sería emplear modulación DP-QPSK (puede cubrir los requerimientos del enlace empleando el mismo número de ranuras en frecuencia y mismo SEDP que DP-BPSK), como se muestra en la figura 4.3.

En éste y todos los casos similares se optó por el formato de modulación menos complejo, en este ejemplo DP-BPSK, porque el procesamiento que requiere la señal es más sencillo.

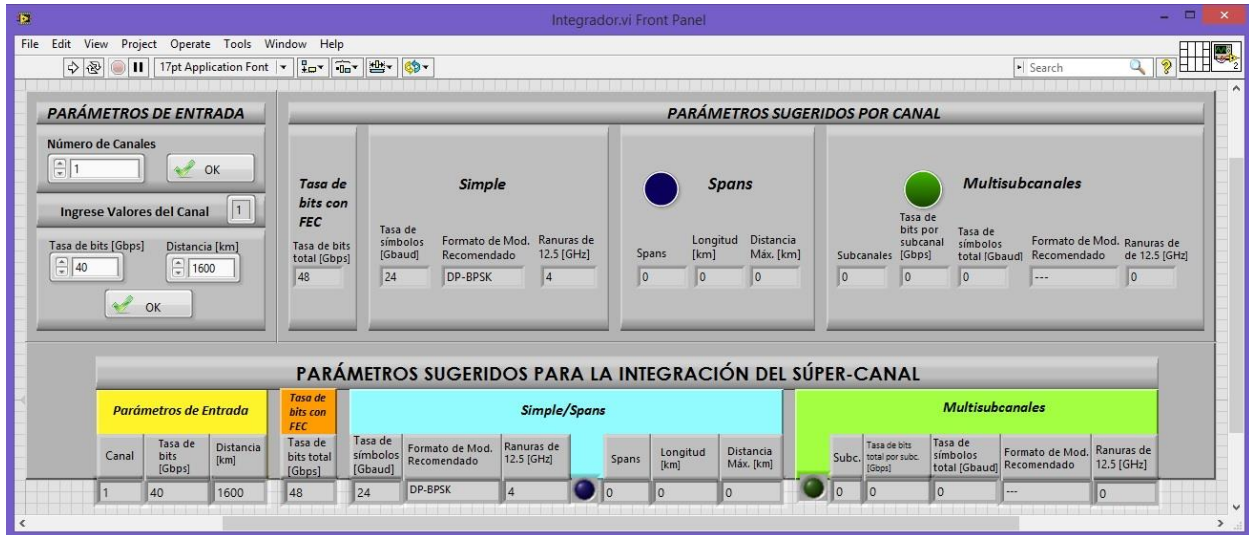


Figura 4.2 Optimización de parámetros para $B_{in} = 40$ Gbps y $L_{in} = 1600$ km.

Formato de Modulación	Tasa de Bits [Gbps]		Máximo Alcance [km]	Tasa de Símbolos [Gbaud]	Bits por Símbolo	Ranuras en Frecuencia [12.5 GHz]	SEDP [km*b/s/Hz]
	Carga útil	+FEC 20%					
DP-BPSK	48	60	5000	30	2	4	6000
DP-QPSK	100	120	1500	30	4	3	4800
DP-QPSK	100	120	2500	30	4	4	6000
DP-8PSK	100	120	3800	60	2	6	6080
DP-8QAM	144	180	1000	30	6	4	3600
DP-16QAM	192	240	300	30	8	3	1920
DP-16QAM	192	240	500	30	8	4	2400
DP-QPSK	192	240	1900	60	4	6	6080
DP-QPSK	240	300	1700	75	4	7	5828
DP-8QAM	288	360	800	60	6	6	3840
DP-16QAM	384	480	375	60	8	6	2400
DP-16QAM	480	600	350	75	8	7	2400

Figura 4.3 Decisiones en el proceso de optimización para $B_{in} = 40$ Gbps y $L_{in} = 1600$ km.

Es conveniente también presentar un ejemplo cuyos resultados contemplen el uso de *spans*. Uno de los tantos casos es cuando el usuario introduce una tasa de transmisión $B_{in} = 180$ Gbps y una distancia del enlace $L_{in} = 2000$ km. En efecto, como puede apreciarse en la figura 4.4, los LEDs azul y verde encendidos

en la interfaz gráfica indican que no existe solución simple y que se sugiere hacer uso de *spans* y multisubcanales.

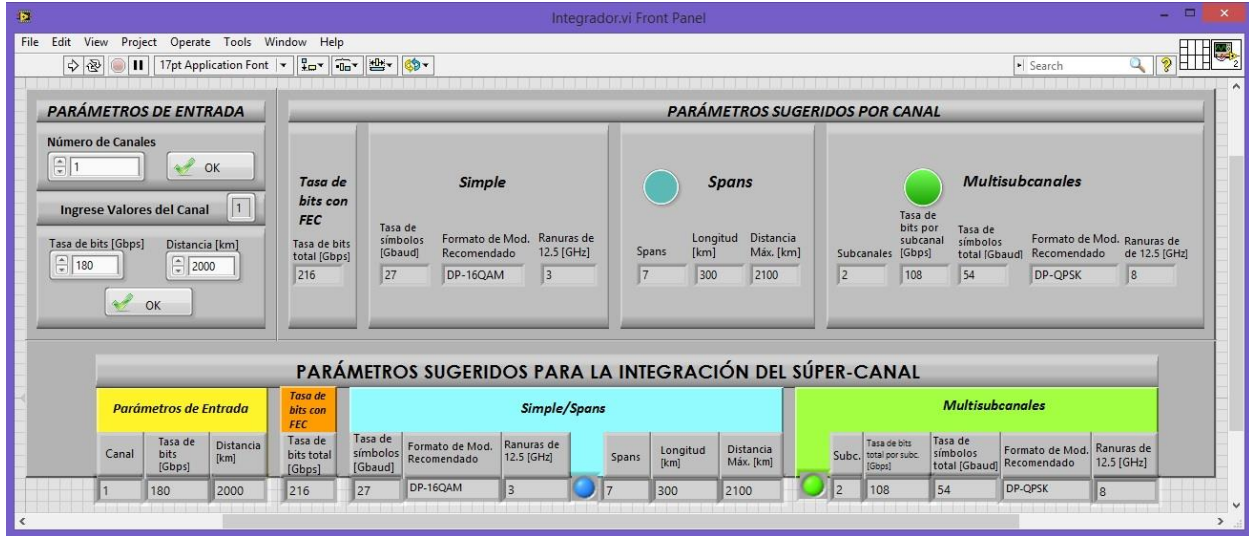


Figura 4.4 Optimización de parámetros para $B_{in} = 180 \text{ Gbps}$ y $L_{in} = 2000 \text{ km}$.

De acuerdo con lo obtenido en el proceso de optimización, el transceptor óptico necesita ajustar su tasa de símbolos a 27 Gbaud para generar una señal multiplexada en polarización con modulación de amplitud en cuadratura de 16 símbolos (DP-16QAM). La tasa de transmisión total, finalmente, será de 216 Gbps y su ancho espectral empleará 3 ranuras en frecuencia de 12.5 GHz. Para que la señal llegue a su destino, ésta debe viajar por siete subenlaces (uno tras de otro) de 300 km de longitud cada uno.

Por otro lado, para acomodar la tasa de bits de entrada, también pueden emplearse dos subcanales de 108 Gbps (FEC incluido) modulados con DP-QPSK. Haciendo uso de multisubcanales, el transceptor necesita adaptar su tasa de símbolos total a 54 por segundo para generar ambos subcanales paralela y electrónicamente, finalmente, los montará sobre una señal portadora óptica. El espectro del canal cubrirá 8 ranuras de 12.5 GHz.

Las soluciones *spans* y multisubcanales, no hubieran sido necesarias si la longitud del enlace requerido hubiera sido levemente menor, por decir $L_{in} = 1900$, en cuyo caso el algoritmo hubiera concluido que sí existe solución simple, tal y como se aprecia en la figura 4.5.

De haber sido este el caso, el transceptor óptico requeriría adecuar su tasa de símbolos a 54 Gbaud para codificar en DP-QPSK los 216 Gbps (180 Gbps de carga útil y 36 Gbps de FEC). El espectro de la señal óptica a la salida del transceptor abarcaría 6 ranuras en frecuencia.

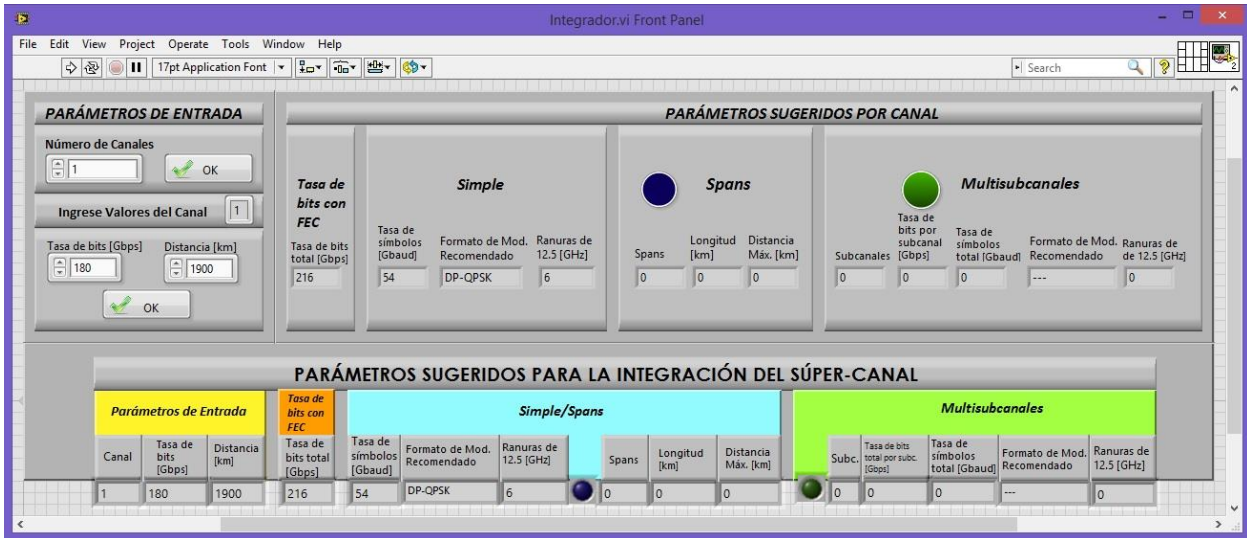


Figura 4.5 Optimización de parámetros para $B_{in} = 180$ Gbps y $L_{in} = 1900$ km.

Los ejemplos presentados hasta ahora no estarían completos sin un enlace que contemple una $B_{in} > 480$ Gbps. Los parámetros elegidos fueron $B_{in} = 800$ Gbps y $L_{in} = 300$ km. Los resultados de la optimización se observan en la figura 4.6.



Figura 4.6 Optimización de parámetros para $B_{in} = 800$ Gbps y $L_{in} = 300$ km.

Evidentemente, no existe solución simple ni solución a base de *spans* como había sido mencionado anteriormente. Los parámetros resultantes de la optimización son dos subcanales que haciendo uso de FEC de 20% resultan en 480 Gbps cada uno. Empleando modulación DP-16QAM el número de ranuras en frecuencia requerido es de 12. Para producir cada señal, el transceptor requiere trabajar a 120 Gbaud en total. Como en todas las soluciones a base de multisubcanales, el transceptor genera las señales electrónicamente y después las imprime sobre una señal portadora óptica.

Para finalizar esta serie de ejemplos unicanal, se triplicó la distancia $L_{in} = 300$ km del enlace anterior. Para cubrir un enlace con $B_{in} = 800$ Gbps y $L_{in} = 900$ km se necesitan cinco subcanales (figura 4.7). Cada uno de

ellos de 192 Gbps (FEC incluido). Las señales son generadas en paralelo a partir de tecnología de 48 Gbaud, para conseguir los 240 Gbaud totales necesarios. Se emplea modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (DP-QPSK), por lo que la señal a la salida del transceptor cubre un ancho espectral de 24 ranuras en frecuencia.



Figura 4.7 Optimización de parámetros para $B_{in} = 800$ Gbps y $L_{in} = 900$ km.

Hasta aquí se han presentado ejemplos representativos de cada posible solución exhibida en el algoritmo: simple, *spans* y multisubcanales.

4.2 Resultados

Una vez validado el algoritmo para todos y cada uno de los tipos de soluciones existentes en él, éste se empleará para la formación de súper canales con problemas que bien pueden ocurrir en el entorno de las redes ópticas flexibles. Los problemas a los que se decidió dar solución son para aplicaciones que van desde altas tasas de transmisión que deben cubrir una distancia del enlace muy pequeña y viceversa, hasta tasas de transmisión altas cuya longitud del enlace es muy extensa y también el caso contrario, tasas de transmisión pequeñas en largas longitudes de transmisión. Pasando también, obviamente, por puntos medios, representativos de la tecnología flexible tratada a lo largo de este trabajo.

4.2.1 Súper-Canal de Ocho Canales

El primer problema a solucionar es de un súper-canal que consta de ocho canales. Los parámetros de entrada para cada uno de ellos se encuentran en la tabla 4.1. Nótese que el canal número uno tiene una tasa de bits de únicamente 30 Gbps, la cual debe recorrer 4000 km para llegar a su destino. Por otro lado el canal número cinco pertenece a una conexión de 960 Gbps (la máxima contemplada en el algoritmo)

cuya longitud es de tan solo 40 km. Los canales restantes tienen tasas de transmisión entre 30 y 960 Gbps, y sus respectivas distancias se encuentran entre 40 y 4000 km.

Canal	B_{in} [Gbps]	L_{in} [km]
1	30	4000
2	200	1500
3	120	1100
4	240	500
5	960	40
6	260	1700
7	750	2000
8	300	1000

Tabla 4.1 Parámetros de entrada para el primer súper-canal.

La figura 4.8 muestra los resultados de la optimización. Se observa que los canales 1, 2, 3 y 4 tienen solución simple, mientras que los canales 6 y 8 tienen una solución a base de *spans* y multisubcanales. Los canales 5 y 7, con $B_{in} = 960$ Gbps y con $B_{in} = 750$ Gbps respectivamente, no presentan solución de ancho de banda mínimo ni solución *spans*, sino que la solución óptima es a base de multisubcanales.

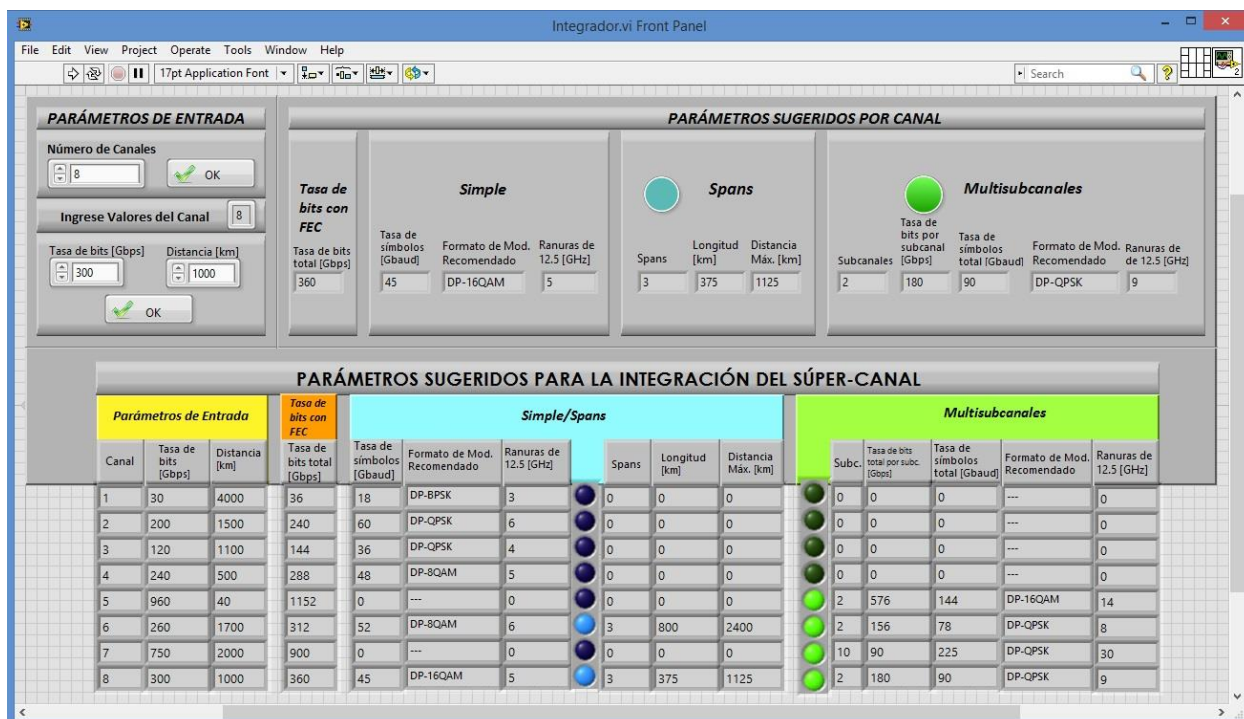


Figura 4.8 Optimización de parámetros para el primer súper-canal.

Las características a las que debe adecuarse el transceptor para generar los canales cuyos resultados de la optimización fueron la solución simple se muestran en la tabla 4.2. La tabla se divide en dos secciones, los parámetros de entrada (número de canal, B_{in} y L_{in}) y parámetros de salida (la tasa de bits total en Gbps, o sea, con FEC, la tasa de símbolos en Gbaud que debe emplear el transceptor, el formato de modulación recomendado y el número de ranuras en frecuencia de 12.5 GHz).

Simple						
Entrada			Salida			
Canal	B _{in} [Gbps]	L _{in} [km]	Tasa de bits total [Gbps]	Tasa de símbolos [Gbaud]	Formato de modulación recomendado	Ranuras en frecuencia de 12.5 GHz
1	30	4000	36	18	DP-BPSK	3
2	200	1500	240	60	DP-QPSK	6
3	120	1100	144	36	DP-QPSK	4
4	240	500	288	48	DP-8QAM	5

Tabla 4.2 Canales con solución simple del primer súper-canal.

La tabla 4.3 contiene los parámetros óptimos para los canales que requieren uso de subenlaces. En la tabla se muestran los parámetros de entrada (mismos que la tabla anterior) y los parámetros de salida donde además de la tasa de bits total (con FEC), la tasa de símbolos que debe emplear el transceptor, el formato de modulación recomendado y el número de ranuras en frecuencia, se incluye el número de *spans*, su longitud y la máxima distancia (ambas en km) que puede alcanzarse en la transmisión haciendo uso de ellos.

Spans									
Entrada			Salida						
Canal	B _{in} [Gbps]	L _{in} [km]	Tasa de bits total [Gbps]	Tasa de símbolos [Gbaud]	Formato de modulación recomendado	Ranuras en frecuencia de 12.5 GHz	Spans	Longitud [km]	Máxima dist. [km]
6	260	1700	312	52	DP-8QAM	6	3	800	2400
8	300	1000	360	45	DP-16QAM	5	3	375	1125

Tabla 4.3 Canales con solución a base de spans del primer súper-canal.

Los canales presentados en la tabla 4.3 también aparecen en la tabla 4.4, pero ahora con los parámetros óptimos necesarios para implementar la solución multisubcanales. En esta tabla también se muestran las soluciones para los canales que emplean tasas de transmisión mayores a 480 Gbps, como es el caso de los canales 5 y 7. Igual que las anteriores, la tabla está dividida en parámetros de entrada y parámetros de salida. Los parámetros de entrada son los mismos que en las tablas anteriores y los parámetros de salida son el número de subcanales, tasa de bits total en Gbps por subcanal, tasa de símbolos total en Gbaud, formato de modulación recomendado y el número de ranuras en frecuencia de 12.5 GHz.

Multisubcanales							
Entrada			Salida				
Canal	B _{in} [Gbps]	L _{in} [km]	Subc.	Tasa de bits por subcanal con FEC [Gbps]	Tasa de símbolos total [Gbaud]	Formato de modulación recomendado	Total de Ranuras en frec. de 12.5 GHz
5	960	40	2	576	144	DP-16QAM	14
6	260	1700	2	156	78	DP-QPSK	8
7	750	2000	10	90	255	DP-QPSK	30
8	300	1000	2	180	90	DP-QPSK	9

Tabla 4.4 Canales con solución a base de multisubcanales del primer súper-canal.

Dentro de los canales mostrados, el sexto merece una mención especial, pues si la L_{in} introducida para él hubiera sido 100 km menor, el algoritmo hubiera convergido al uso de dos *spans* (con los mismos parámetros) en lugar de tres. De haber sido ese el caso, la solución multisubcanales se hubiera mantenido igual.

Por otro lado, si la B_{in} introducida hubiera sido 20 Gbps menor ($B_{in} = 240$ Gbps), el uso de *spans* ni siquiera hubiera sido necesario, pues los parámetros óptimos pertenecerían a la solución simple con una tasa de bits total de 288 Gbps, la tasa de símbolos requerida en el segmento del transmisor encargado de este canal tendría que adecuarse a 72 Gbaud, la señal tendría que ser modulada en DP-QPSK y su espectro ocuparía 7 ranuras en frecuencia de 12.5 GHz. Obviamente, la solución multisubcanales tampoco hubiera sido requerida. Con este comentario se busca ejemplificar la gran capacidad de análisis que nos brinda el algoritmo, ya que permite estudiar diferentes escenarios de configuración de manera ágil durante el proceso de diseño de una red. También nos permite observar, cómo la variación de un parámetro de diseño, incluso por un ligero margen, puede llevar a soluciones diferentes, cada una de las cuales impacta de manera distinta en el presupuesto de la red.

4.2.2 Súper-Canal de Nueve Canales

El segundo problema se planteó para un súper-canal de nueve canales. Los parámetros de entrada se concentran en la tabla 4.5. A diferencia del problema anterior, en éste se tiene un canal con baja tasa de transmisión, cuya longitud del enlace es muy corta. El canal del que se habla es el tercero, con 12 Gbps y 10 km de longitud. La cota superior del súper-canal la marca el segundo canal, con una tasa de bits de 800 Gbps y una conexión de 4000 km de longitud. El resto de los canales presentan diversas tasas de transmisión superiores a 100 Gbps, consideradas preponderantes en redes ópticas flexibles. Las distancias para cada canal varían de 50 a 3850 (exceptuando los canales que establecen la cota superior y la cota inferior).

Canal	B_{in} [Gbps]	L_{in} [km]
1	220	1800
2	800	4000
3	12	10
4	400	3500
5	100	3850
6	350	2000
7	250	900
8	150	50
9	380	350

Tabla 4.5 Parámetros de entrada para el segundo súper-canal.

Los resultados obtenidos a través del proceso de optimización se muestran en la figura 4.8. Los canales 3, 8 y 9 resultaron tener solución simple. Los canales 1, 4, 5, 6 y 7 tienen tanto solución a base de *spans*, como solución a base de multisubcanales. El canal número 2, debido a la tasa de bits de entrada, presenta únicamente solución multisubcanales.

Los parámetros arrojados en el proceso de optimización se muestran en la tabla 4.6 para la solución simple, en la tabla 4.7 para *spans* y en la tabla 4.8 para multisubcanales, en cada una los parámetros se organizan como ya fue mencionado.

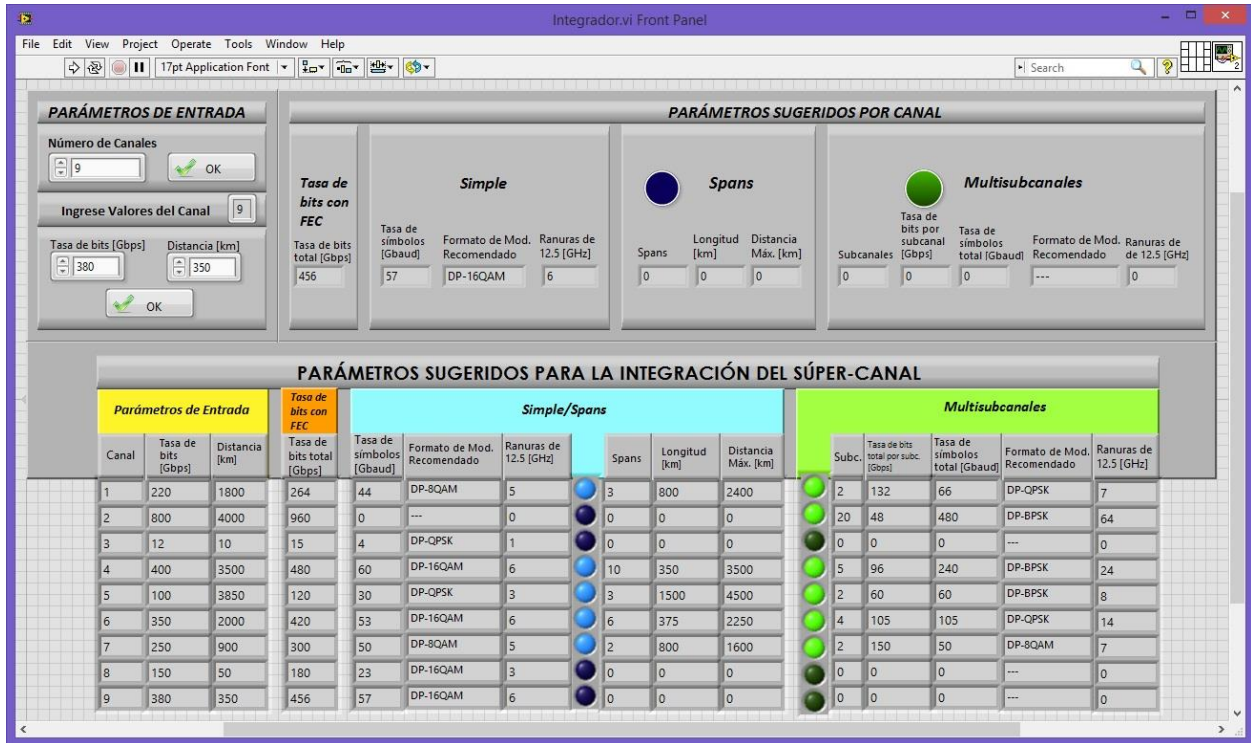


Figura 4.9 Optimización de parámetros para el segundo súper-canal.

Simple						
Entrada			Salida			
Canal	B_{in} [Gbps]	L_{in} [km]	Tasa de bits total [Gbps]	Tasa de símbolos [Gbaud]	Formato de modulación recomendado	Ranuras en frecuencia de 12.5 GHz
3	12	10	15	4	DP-QPSK	1
8	150	50	180	23	DP-16QAM	3
9	380	350	456	57	DP-16QAM	6

Tabla 4.6 Canales con solución simple del segundo súper-canal.

Spans									
Entrada			Salida						
Canal	B_{in} [Gbps]	L_{in} [km]	Tasa de bits total [Gbps]	Tasa de símbolos [Gbaud]	Formato de modulación recomendado	Ranuras en frecuencia de 12.5 GHz	Spans	Longitud [km]	Máxima dist. [km]
1	220	1800	264	44	DP-8QAM	5	3	800	2400
4	400	3500	480	60	DP-16QAM	6	10	350	3500
5	100	3850	120	30	DP-QPSK	3	3	1500	4500
6	350	2000	420	53	DP-16QAM	6	6	375	2250
7	250	900	300	50	DP-8QAM	5	2	800	1600

Tabla 4.7 Canales con solución a base de spans del segundo súper-canal.

Multisubcanales							
Entrada			Salida				
Canal	B_{in} [Gbps]	L_{in} [km]	Subc.	Tasa de bits por subcanal con FEC [Gbps]	Tasa de símbolos total [Gbaud]	Formato de modulación recomendado	Total de Ranuras en frec. de 12.5 GHz
1	220	1800	2	132	66	DP-QPSK	7
2	800	4000	20	48	480	DP-BPSK	64
4	400	3500	5	96	240	DP-BPSK	24
5	100	3850	2	60	60	DP-BPSK	8
6	350	2000	4	105	105	DP-QPSK	14
7	250	900	2	150	50	DP-8QAM	7

Tabla 4.8 Canales con solución a base de multisubcanales del segundo súper-canal.

En la tabla 4.7 existen canales cuyos parámetros de optimización merecen ser analizados individualmente. Tal es el caso del primer canal con $L_{in} = 1800$ km, los parámetros óptimos indican que se requieren tres subenlaces de diseño óptimo de 800 km cada uno de ellos, sin embargo, si la distancia de la transmisión hubiera sido $L_{in} = 1700$ km como máximo, la solución simple hubiera sido viable, para lo cual se emplearía una señal modulada con DP-QPSK generada por tecnología de 66 Gbaud. Los requerimientos de ancho de banda serían 7 ranuras en frecuencia de 12.5 GHz.

En el quinto canal sucede algo similar, si la L_{in} hubiera sido 50 km menor, es decir $L_{in} = 3800$ km, en lugar de los tres *spans* determinados por el algoritmo, el transmisor requeriría generar únicamente una señal de 60 Gbaud, con formato de modulación DP-BPSK para ocupar 6 ranuras en frecuencia (solución simple).

Nótese que esto no sucede en todos los canales, pues en algunos aunque la distancia introducida hubiera sido 100 km o 200 km menor, el algoritmo hubiera convergido a la misma solución. Por ejemplo, en el cuarto canal, si L_{in} hubiera sido de 3200 km, la solución seguiría siendo la misma, una señal DP-16QAM generada a partir de tecnología de 60 Gbaud, con 6 ranuras en frecuencia para el ancho de banda; además, el enlace seguiría estando compuesto por 10 *spans* de 350 km cada uno.

Por otro lado, si la L_{in} hubiera sido 3100 km, el algoritmo hubiera indicado que son necesario 9 subenlaces de diseño óptimo con los mismos parámetros. Cabe mencionar que en cualquiera de las dos modificaciones presentadas, la solución multisubcanales hubiera sido la misma, es decir, cinco subcanales de 96 Gbps cada uno con esquema de modulación DP-BPSK. El segmento del transmisor que generara la señal tendría que ser capaz de trabajar a una tasa de símbolos total de 240 Gbaud. El espectro de la señal seguiría abarcando las mismas 24 ranuras que se muestran en la tabla 4.8.

Es interesante utilizar el algoritmo de optimización para comparar las soluciones que presentan el esquema de múltiples *spans* con respecto a aquel basado en multisubcanales. Por ejemplo, en el caso del canal cuatro, en que $B_{in} = 400$ Gbps y $L_{in} = 3500$ km, el primer tipo de solución arroja un ancho de banda total para el súper canal de 6×12.5 GHz = 75 GHz, mientras que el segundo tipo de solución resulta en 24 ranuras, es decir, 300 GHz. La diferencia en términos de ancho de banda es considerable (4 veces mayor). En un sistema en que el ancho de banda se encuentre muy limitado, la solución basada en el uso de múltiples *spans* es la que se debe seleccionar. Sin embargo, se debe asumir el costo que representa tender 10 *spans* de 350 km cada uno, en lugar de un solo enlace de 3500 km. Aunque la longitud de la fibra es la misma, la segunda solución reduce notablemente el número de transceptores optoelectrónicos. En el caso del canal siete, la diferencia en términos de ancho de banda no es muy notable entre ambas soluciones. Cinco ranuras para la solución de múltiples *spans* y siete ranuras para la solución de

multisubcanales. En este caso, la ganancia en términos de ancho de banda que se logra al utilizar la primera solución no justifica en la mayoría de los casos el tender dos enlaces para cubrir la distancia total introducida.

4.2.3 Súper-Canal de Diez Canales

Para finalizar esta sección, se da solución a un súper-canal compuesto por diez canales. Este problema es interesante porque contempla un canal de 900 Gbps con la máxima distancia de transmisión considerada en el algoritmo (5000 km). Por otro lado también se ocupa un canal con una tasa de transmisión pequeña, 36 Gbps, cuya longitud del enlace es muy extensa, 4800 km. En la tabla 4.9 se encuentran los parámetros que se introdujeron en el programa para los diez canales de la conexión.

Canal	B _{in} [Gbps]	L _{in} [km]
1	420	850
2	900	5000
3	120	800
4	360	1850
5	256	80
6	36	4800
7	230	2650
8	96	1550
9	270	1700
10	40	2000

Tabla 4.9 Parámetros de entrada para el tercer súper-canal.

Tal y como se muestra en la figura 4.10, los canales 3, 5, 6, 8 y 10 tienen solución simple. La solución *spans* es para los canales 1, 4, 7 y 9. La solución multisubcanales es para estos últimos y el canal número 2.

En la tabla 4.10 se observan los parámetros resultantes de la optimización para los canales 3, 5, 6, 8 y 10 (solución simple), en la tabla 4.11 los parámetros para los canales 1, 4, 7, y 9 (solución *spans*) y en la tabla 4.12 los parámetros para los canales 1, 2, 4, 7, y 9 (solución multisubcanales). Todas las tablas están organizadas de la manera que ya se mencionó.

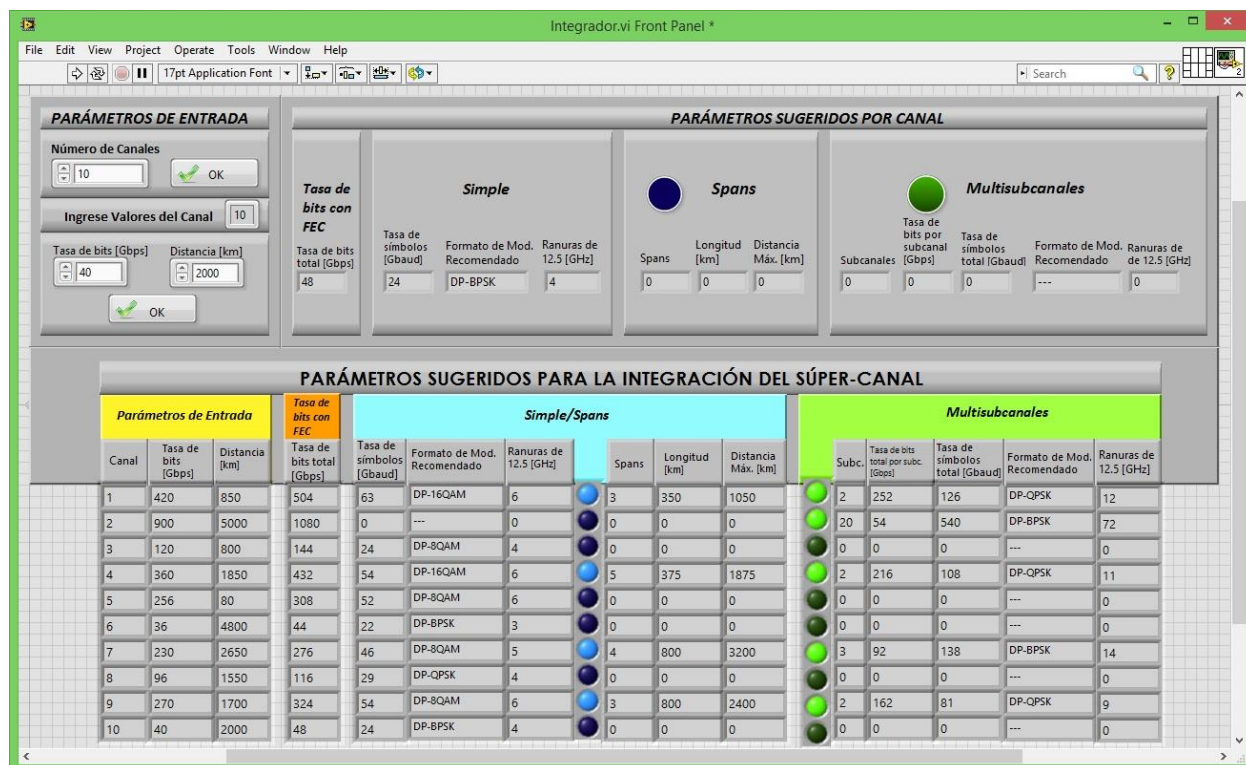


Figura 4.10 Optimización de parámetros para el tercer súper-canal.

Simple						
Entrada			Salida			
Canal	B _{in} [Gbps]	L _{in} [km]	Tasa de bits total [Gbps]	Tasa de símbolos [Gbaud]	Formato de modulación recomendado	Ranuras en frecuencia de 12.5 GHz
3	120	800	144	24	DP-8QAM	4
5	256	80	308	52	DP-8QAM	6
6	36	4800	44	22	DP-BPSK	3
8	96	1550	116	29	DP-QPSK	4
10	40	2000	48	24	DP-BPSK	4

Tabla 4.10 Canales con solución simple del tercer súper-canal.

Spans									
Entrada			Salida						
Canal	B _{in} [Gbps]	L _{in} [km]	Tasa de bits total [Gbps]	Tasa de símbolos [Gbaud]	Formato de modulación recomendado	Ranuras en frecuencia de 12.5 GHz	Spans	Longitud [km]	Máxima dist. [km]
1	420	850	504	63	DP-16QAM	6	3	350	1050
4	360	1850	432	54	DP-16QAM	6	5	375	1875
7	230	2650	276	46	DP-8QAM	5	4	800	3200
9	270	1700	324	54	DP-8QAM	6	3	800	2400

Tabla 4.11 Canales con solución a base de spans del tercer súper-canal.

Multisubcanales							
Entrada			Salida				
Canal	B_{in} [Gbps]	L_{in} [km]	Subc.	Tasa de bits por subcanal con FEC [Gbps]	Tasa de símbolos total [Gbaud]	Formato de modulación recomendado	Total de Ranuras en frec. de 12.5 GHz
1	420	850	2	252	126	DP-QPSK	12
2	900	5000	20	54	540	DP-BPSK	72
4	360	1850	2	216	108	DP-QPSK	11
7	230	2650	3	92	138	DP-BPSK	14
9	270	1700	2	162	81	DP-QPSK	9

Tabla 4.12 Canales con solución a base de multisubcanales del tercer súper-canal.

En este súper-canal, también hay canales específicos que debido a sus parámetros de entrada, deben ser explicados más a detalle. El primer canal es uno de ellos; en éste, si la L_{in} en vez de 850 km hubiera sido de solo 800 km, la solución a base de multisubcanales hubiera mostrado una solución a base de dos subcanales pasando de necesitar 12 ranuras en frecuencia a requerir sólo 9, utilizando modulación DP-8QAM en lugar de DP-QPSK, que es ligeramente más elaborada. La tasa de símbolos total, obviamente, hubiera también disminuido de 126 Gbaud a 84 Gbaud. En este caso, el número de subenlaces de diseño óptimo, así como sus características, no sufrirían modificación alguna.

En el séptimo canal se presenta una situación semejante. Aquí, si la L_{in} hubiera sido 150 km menor, los parámetros para multisubcanales arrojados en el proceso de optimización hubieran cambiado ligeramente. Para $B_{in} = 230$ Gbps y $L_{in} = 2500$ km el número de subcanales se hubiera mantenido constante y con ello la tasa de bits con FEC por subcanal (92 Gbps), sin embargo, la tasa de símbolos hubiera sido de 69 Gbaud empleando el formato de modulación DP-QPSK, con lo que el número de ranuras en frecuencia requerido hubiera sido de 10 y no de 14. Este es un ejemplo de cómo un pequeño ajuste en los parámetros de diseño, puede significar un ahorro interesante en términos de ancho de banda. Asimismo, la solución de *spans* se hubiera mantenido igual, una señal de 5 ranuras de 12.5 GHz, modulada con DP-8QAM, cuya trayectoria consta de 4 subenlaces de 800 km cada uno.

Otro de los canales que requiere especial atención, es el canal número cuatro. En este caso se introdujo una L_{in} de 1850 km. Pero si en este caso la distancia hubiera sido 100 km mayor (y no menor, como hasta ahora se ha manejado), la solución otorgada por el algoritmo hubiera cambiado. Primero, en el diseño del enlace a base de *spans* los parámetros dados por el algoritmo se mantendrían igual, a excepción del número de *spans*, ya que, al ser una distancia mayor, se requeriría de uno más para cubrir la longitud total de la conexión. También, la solución multisubcanales presentaría cambios, pues se requerirían de 4 subcanales cada uno de ellos a 108 Gbps en total y se emplearía el mismo esquema de modulación. También se modificaría el número de ranuras en frecuencia, en lugar de requerir 11, serían necesarias 15.

Volviendo al séptimo canal, es conveniente analizar los anchos de banda, obtenidos a través del proceso de optimización en el que se basa el algoritmo, para las soluciones *spans* y multisubcanales. Con $B_{in} = 230$ Gbps y $L_{in} = 2500$ km se obtienen, en el primer tipo de solución, se presentan 5 ranuras en frecuencia de 12.5 GHz, lo que equivale a 62.5 GHz. Por otro lado, en la segunda solución, son necesarios $14 \times 12.5 = 175$ GHz. La diferencia de ancho de banda de una solución a otra es notable, casi 3 veces mayor. Como en muchas situaciones en el área de telecomunicaciones, cuando un parámetro es disminuido, otro se ve forzosamente incrementado. En este caso, aunque el ancho de banda es reducido notablemente en la

primera solución, la necesidad de emplear 4 *spans* con sus respectivos regeneradores en la transmisión, aumenta considerablemente el costo del sistema.

De acuerdo con las pruebas realizadas, y en general, el empleo de la solución basada en múltiples *spans* reduce, en promedio, el ancho de banda necesario a la mitad. Esto, sin embargo, no es una regla y debe considerarse el alza de costos que éstos conllevan.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

5.1 Conclusiones

Del análisis del tema hecho a lo largo de este trabajo de tesis se encontró que es importante tener sólido conocimiento en cuanto a tecnología WDM. Si bien, esta tecnología en un futuro no muy lejano será desplazada con la tecnología tratada a lo largo de este trabajo, funge como base para los sistemas ópticos de siguiente generación. Estos nuevos sistemas, conocidos como redes ópticas flexibles (concepto recientemente acuñado), tienen como cometido obtener el mayor provecho de la capacidad que los sistemas de comunicaciones ópticas ofrecen, para suplir la creciente demanda de aplicaciones de datos. Con el enfoque de redes ópticas flexibles, se introducen nuevas tecnologías y nuevos conceptos esenciales: grid flexible (establecido actualmente en la recomendación G.694.1 de la ITU-T), BVTs y BVTs segmentados, súper canales, ROADMs elásticos, desfragmentación de espectro y algoritmos de asignación de espectro.

Una de los conceptos esenciales en este trabajo son los súper canales. Los súper canales son una medida utilizada para satisfacer la necesidad de cubrir grandes tasas de bits. Nacieron debido a las limitaciones que existen en cuanto a electrónica, ya que ésta es incapaz, hoy en día, de trabajar a altas tasas de símbolos. La separación entre canales que forman el súper-canal puede ser nula, dependiendo de la técnica que se use para su implementación. El número de canales del súper-canal también es un punto a considerar, porque cada canal necesita sus propios dispositivos para su procesamiento. Para implementar súper canales en las redes ópticas flexibles del futuro se considera que la técnica por excelencia será OAWG. Sin embargo, en primera instancia dos de las técnicas que se pretenden emplear son Nyquist WDM y OFDM.

El producto más importante de esta tesis es un algoritmo de optimización para la integración de súper canales en redes ópticas flexibles. El propósito del algoritmo diseñado es que el transceptor óptico de ancho de banda variable emplee los parámetros más adecuados para la transmisión. La trascendencia de éste, es que las señales generadas para formar el súper-canal utilicen el ancho de banda mínimo, al mismo tiempo que se maximiza la eficiencia espectral. La optimización de parámetros se lleva a cabo con base en la tasa de transmisión y la distancia del enlace óptico y de acuerdo a éstos se tienen tres caminos de optimización, denominados simple, *spans* y multisubcanales.

Dicho algoritmo, después de ser diseñado, se implantó en un lenguaje gráfico de alto nivel. Se decidió utilizar LabVIEW por las características que presenta, como empleo de estructuras jerárquicas, ejecución de tareas en simultáneas en paralelo, escalabilidad de las aplicaciones creadas e interfaces de usuario personalizadas. La validación se llevó a cabo con problemas simbólicos en redes ópticas flexibles, y se usó además para obtener resultados representativos de problemas admisibles en este entorno. Con base en el uso del programa se concluye que:

- Si bien, existen muchos parámetros a considerar a la hora de elegir un sistema de comunicaciones, un primer buen paso es comparar la tasa de transmisión y distancia requeridas en el enlace con

la máxima tasa de transmisión y la máxima distancia libre de regeneradores que dicho sistema es capaz de soportar.

- Es importante contar con un algoritmo (y el *software* que lo ejecute) que establezca automáticamente los parámetros necesarios (como formato de modulación y ancho de banda) en un BVT para cada conexión de acuerdo con la cantidad de tráfico que exista en la red, con el fin de cumplir el cometido que las redes ópticas flexibles tienen.
- Si bien, el *grid* flexible es un punto clave para la introducción de las redes flexibles y su inclusión en la recomendación G.694.1 de la ITU-T es un buen avance, es necesario que la granularidad de éste sea aún más pequeña que la ya establecida (12.5 GHz), con el fin de asignar el ancho espectral estrictamente necesario a cada canal, acorde con las características del enlace. Más aún, se debe buscar en un futuro, aunque no sea una tarea fácil, eliminar su existencia con el fin de tener redes totalmente flexibles.
- La capacidad de análisis del algoritmo propuesto permite estudiar diferentes escenarios de configuración durante el proceso de diseño de una red de comunicaciones, por lo que es una herramienta muy poderosa en el diseño de sistemas ópticos.
- La elección de parámetros para un BVT segmentado es compleja, porque éstos, idealmente, deben ser medidos bajo las mismas condiciones para poder ejecutar una comparación entre ellos y elegir la mejor opción para una aplicación dada.
- El algoritmo permite también observar que con la variación de un parámetro de diseño, ya sea tasa de transmisión o distancia del enlace, incluso por un pequeño margen, puede resultar en la constitución de un súper-canal muy diferente, impactando de manera distinta el presupuesto de la red.
- Ante la obtención de ambas soluciones en el algoritmo (*spans* y multisubcanales), en un sistema en el que el ancho de banda se encuentre muy limitado, la solución basada en el uso de múltiples *spans* es la que se debe seleccionar. Sin embargo, debe considerarse el costo-beneficio que éstos representan, pues éste debe ser justificado con un considerable ahorro en ancho de banda.
- Con el *grid* flexible, los formatos de modulación avanzados y los transceptores ópticos segmentados de ancho de banda variable se logra equilibrio entre distancia y eficiencia espectral al ser estos últimos capaces de ajustar el formato de modulación que emplearán para ocupar la menor cantidad de ancho de banda posible, permitiendo asignar el espectro no empleado a otros canales. En general, para conexiones de pequeña longitud se eligen formatos de modulación complejos como DP-16QAM cuyo ancho de banda es pequeño. Esto es porque la señal viaja por una distancia corta, afectando en menor medida las condiciones necesarias para una buena recepción de la señal. Por otro lado, para conexiones de gran extensión se emplean formatos de modulación más sencillos como DP-BPSK, pues con ellos la señal se ve menos afectada durante la transmisión.
- Con el uso de FEC la tasa de bits se incrementa notablemente. Sin embargo, éste es necesario para minimizar errores en la transmisión y alcanzar el BER requerido por el sistema, al mismo tiempo que disminuye los requisitos de potencia para la transmisión.

5.2 Trabajo a Futuro

La propuesta de redes ópticas flexibles surgió en 2008, por lo que se puede considerar que es un enfoque relativamente nuevo, y se encuentra aún a nivel laboratorio. Como consecuencia queda mucho trabajo por hacer en todas las áreas de las redes de siguiente generación para poder llevarlas a nivel comercial.

En este trabajo, obviamente, existen muchos puntos a los que se les puede dar seguimiento, algunos de ellos mencionados a continuación.

El primero de ellos es realizar simulaciones en algún paquete que permita evaluar el desempeño de los sistemas de comunicaciones ópticos, como *Virtual Photonics Inc. (VPI)*, para tener una mejor aproximación de los parámetros considerados en el algoritmo, como la máxima distancia de transmisión libre de regeneradores, el ancho de banda o la eficiencia espectral. Se recomienda que se seleccionen un conjunto de situaciones representativas de las redes ópticas flexibles y se hagan las simulaciones tanto para canales aislados como para súper canales con el fin de conocer el impacto que tiene minimizar el espacio entre canales en el desempeño del sistema. Existen una variedad de efectos físicos, de comportamiento lineal y no lineal, tales como diafonía, que deben ser tomados en cuenta para un correcto análisis y diseño de los enlaces que forman las redes en cuestión.

También se podría estudiar la repercusión que tienen los efectos de dispersión (tanto PMD y DGD). Además del mezclado de cuatro ondas y modulación cruzada de la fase en la transmisión de súper canales. El estudio de efectos no lineales en los sistemas de comunicaciones ópticas no es una tarea fácil, pero es importante conocer cómo alteran el sistema, ya que algunos de ellos se presentan cuando la potencia de transmisión es alta y/o el espacio entre canales es muy pequeño (como se busca en la formación de súper canales). Además, dependen en gran medida de la extensión de la trayectoria del enlace, pues se presentan cuando ésta es larga y hay una notable presencia de amplificadores ópticos.

Finalmente, se podrían plantear problemas más ambiciosos, pero conociendo a detalle la infraestructura de red por la que viajará la señal y con base a algoritmos RSA. En este trabajo se esbozan tres rutas de optimización, no obstante, cuando se dan los resultados de las soluciones *spans* y multisubcanales, el usuario es quien tiene la decisión final. Sin embargo, conociendo la infraestructura de la red, podría ampliarse el algoritmo para que sea él quien lleve a cabo un proceso de decisión que indique con base en un análisis cuantitativo cuál es la solución más conveniente.