



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
VALPARAÍSO



**Sebastián Rafel Manríquez Beyer**

## **Laboratorio de sistemas y redes ópticas flexibles basado en WSS**

**Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico**



**Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Facultad de Ingeniería**

**Valparaíso, 24 de julio de 2017**



# Laboratorio de sistemas y redes ópticas flexibles basado en WSS

Sebastián Rafael Manríquez Beyer

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico,  
aprobada por la comisión de la  
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la  
Facultad de Ingeniería de la  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
conformada por

Sr. Ariel Edgardo Leiva López  
Profesor Guía

Sra. Alejandra Eliana Beghelli Zapata  
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann  
Secretario Académico

Valparaíso, 24 de julio de 2017

*A mis padres, Carolo y Cristina  
a mis hermanos, Paulina y Agustín  
y a mi amada Paola*

# Agradecimientos

Aún recuerdo cuando llegué desde Puerto Varas a esta ciudad, viajando de tan lejos, para cumplir con un objetivo impuesto por mí mismo: ser un ingeniero civil electrónico. Debo admitir que esta ciudad no me gusta para nada (excepto los trollebuses... ¡Son geniales!), pero de todo lo malo que puedo, sigo y seguiré encontrando, he tenido la gran oportunidad de forjar grandes amistades.

Partiré agradeciendo a todos los profesores con los que he tenido clases, en especial al Dr. Leiva, quien fue mi profesor guía. Me has brindado buenas oportunidades, las cuales siempre recordaré y agradeceré. Pese a ser terco y porfiado a veces (como todos), siempre lograste guiarme hacia el camino adecuado con tus indicios y/o sugerencias, dejando que disfrute de las respuestas logradas mientras te das la vuelta tratando de esconder esa sonrisa de ¡Por fin lo está logrando!

Lamentablemente no caben todas mis amistades acá, pero siempre están allí. Demicio, eres de aquellas personas que han estado en todas con uno: hemos reído y peleado... y, aun así, podremos no saber el uno del otro durante meses y siempre nos sentimos a gusto con esas largas conversaciones. A Daniel (Bear), por tu paciencia. Créeme que con los gestos que has realizado, he aprendido mucho. Rodrigo (Yoyo), tú me has enseñado a no meterme en las patas de las yeguas y que siempre hay una forma más simple de hacer las cosas. Diego (Dolguin), por estar en todas dando tu característico apoyo. Ignacio (Piñal) y César (Chechal), ese viaje a Valdivia fue memorable. Espero que al cabo de algún tiempo podamos desclasificar información en esa misma ciudad. Sebastián (Jimmy), siempre apoyando las ideas locas y sacarlas a flote como sea. Ignacio (Nacho), te agrego por la devuelta de mano.

Seguiré con mi familia, partiendo con Carolo. Más allá de un papá, eres un gran amigo y una gran persona. Hemos peleado, reído, llorado y hecho las paces... y aun así siempre estás allí con tus interminables historias que siempre disfruto. Como bien he aprendido de ti: *Immer hoch, Immer weiter!* A mi hermana Paulina, si bien es cierto que iniciaste una nueva vida, sólo te puedo decir que no descuides el núcleo familiar. Es y será siempre lo más importante. A ti, cómo no Agustín, si no me hubieses ayudado, creo que estaría todavía otro año más en la Universidad.

Finalmente, quisiera agradecer a la persona que más amo en mi vida, guardándome las últimas líneas. Tú, Paola, me has enseñado un sentimiento muy valioso y a ver las cosas desde otra perspectiva. Y es por eso que, gracias a tu gran apoyo en los altibajos, es que estoy realizando cosas en pos de nosotros y de los que vendrán.

*Valparaíso, 24 de julio de 2017*

S. R. M. B

## Resumen

El presente informe inicia con las redes ópticas de transporte para dar cabida a las nuevas tecnologías de redes ópticas flexibles debido a la problemática presente en la red de rejilla fija usada en la actualidad. El problema en cuestión hace referencia al uso poco eficiente del ancho de banda de la red de rejilla fija, generando espacios vacíos (llamados espectros ociosos) y a la restricción de los espectros ante una división del canal para su transmisión. Para hacer frente al tema propuesto, se plantea la posibilidad de realizar una migración a las redes ópticas flexibles, las cuales aprovechan eficientemente el ancho de banda. Además, eliminan los espectros ociosos producidos por la rejilla fija y permite espectros de distintos anchos, logrando una mejora sustancial respecto a la eficiencia del uso del medio. Como las redes flexibles son una potencial propuesta de cambio, surge además una necesidad de enseñanza a los estudiantes interesados en el área de las telecomunicaciones ópticas.

De esta forma, para demostrar las capacidades de las redes de rejilla flexibles, se propone la realización de un laboratorio de sistemas y redes ópticas basadas en WSS flexibles. Ello implica la propuesta de experiencias de laboratorio para dar a conocer las diversas formas de configuración de una red de rejilla flexible, usando un WSS flexible 1x9 de Finisar.

Este dispositivo, al ser empleado en un ambiente de laboratorio, permitiría a los alumnos visualizar didácticamente el funcionamiento de este, empleando diversas configuraciones propuestas. Estas pueden ser: MUX, DEMUX, conmutador de 9x9 o como un nodo *ADD-DROP*. Por supuesto, las experiencias previamente mencionadas requerirían de una anterior caracterización de los elementos de laboratorio a usar.

Finalmente, la PUCV sería la primera universidad a nivel nacional en poseer un laboratorio de semejantes características con experiencias como las propuestas en este informe. Así, resulta en una interesante y potencial proposición para ellos y para la Universidad misma. Por otra parte, serán los alumnos quienes puedan visualizar, experimentar y aprender de sistemas y redes ópticas flexibles basadas en WSS.

Palabras claves: redes ópticas flexibles, LCoS, WSS, experiencias de laboratorio.

# Abstract

The present report begins with the optical transport networks to accommodate the new technologies of flexible optical networks due to the problems present in the network of fixed grid used today. The problem in question refers to the inefficient use of the bandwidth of the fixed grid network, generating empty spaces (called idle spectra) and the restriction of the spectra before a division of the channel for transmission. In order to address the proposed topic, the possibility of migrating to flexible optical networks, which efficiently leverage bandwidth, is proposed. In addition, they eliminate the idle spectra produced by the fixed grid and allow spectra of different widths, achieving a substantial improvement with respect to the efficiency of the use of the medium. As flexible networks are a potential change proposal, there is also a need for teaching students interested in optical telecommunications.

Thus, to demonstrate the capabilities of flexible grid networks, it is proposed to develop a flexible WSS-based optical systems and networks laboratory. This implies the proposal of laboratory experiences to make known the various forms of configuration of a flexible grid network, using a flexible WSS 1x9 from Finisar.

This device, when used in a laboratory environment, would allow students to visualize the operation of this, using different configurations proposed. These can be: MUX, DEMUX, 9x9 switch or as an ADD-DROP node. Of course, the previously mentioned experiences would require an earlier characterization of the laboratory elements to be used.

Finally, the PUCV would be the first university at the national level to possess a laboratory of such characteristics with experiences such as those proposed in this report. Thus, it results in an interesting and potential proposition for them and for the University itself. On the other hand, the students will be able to visualize, experiment and learn from flexible optical systems and networks based on WSS.

Key words: flexible optical networks, LCoS, WSS, laboratory experiments.

# Índice general

Introducción.....	1
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
1 Redes ópticas de transporte.....	4
1.1 WDM .....	5
1.2 Redes ópticas según el tipo de conexiones.....	7
1.3 Redes según el tipo de asignación del espectro .....	8
2 Estado del arte .....	11
2.1 Ventajas de redes flexibles.....	11
2.2 Implementos de laboratorio para redes ópticas en universidades .....	11
3 Tecnología LCoS .....	15
3.1 Cristal Líquido .....	15
3.2 Combinación con matriz CMOS.....	17
3.3 Funcionamiento.....	18
4 Características del WSS .....	19
4.1 Especificaciones.....	19
4.2 Canales.....	21
4.3 Esquema funcional .....	22
5 Programación del WSS .....	24
5.1 Comandos entregados por el fabricante.....	24
5.2 Definición de canales personalizados.....	26
5.3 Asignación de canales a puertos.....	28
5.4 Visualización de la configuración respecto a la asignación de canales a puertos.....	30
5.5 Bloqueo por puerto y bloqueo por atenuación .....	30
5.6 Guardar las configuraciones .....	31
6 Experiencias propuestas .....	32
6.1 Experiencia 1: Conociendo al WSS flexible (guía profesor).....	32

6.2 Experiencia 2: MUX + filtrado (guía profesor) .....	39
6.3 Experiencia 3: DEMUX + filtrado (guía profesor).....	43
6.4 Experiencia 4: Conmutador óptico 9x9 (guía profesor).....	47
6.5 Experiencia 5: Nodo ADD-DROP (guía profesor).....	51
Discusión y conclusiones.....	55
Bibliografía .....	58

# Introducción

Las comunicaciones, a lo largo de la historia del hombre, han sido de vital importancia, donde la necesidad de comunicación se incrementa considerablemente a lo largo de los años [1]. Esto requiere adecuar continuamente los medios de comunicación disponibles o, en su defecto, desarrollar otros que abarquen las expectativas que así lo determinen.

En Chile, el aumento del tráfico en las telecomunicaciones [2] también se hace presente, al igual que en el resto del mundo. Debido a este aumento de demanda, es que se han desarrollado distintas tecnologías capaces de soportar el tráfico de datos a nivel mundial, siendo la fibra óptica el medio de transmisión de información más utilizada para las comunicaciones a larga distancia [3]. Es por este aumento en las necesidades de datos de los usuarios y a la importancia que tienen las redes ópticas en las comunicaciones, que se hace necesario tener ingenieros con conocimiento amplio en las telecomunicaciones [4], dando énfasis en lo que es la fibra óptica como tecnología y en su aplicación a las redes.

En los enlaces de grandes distancias y de gran capacidad, donde se efectúan comunicaciones con multiplexación por longitudes de onda densas o DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), se ofrecen tasas de transmisión por portadora de hasta 100 Gbps cada una. Acorde a la normativa de la ITU-T (*International Telecommunication Union, Telecommunications normalization sector*) existen dos posibles formas de operar: mediante red de rejilla fija y red de rejilla flexible.

La red de rejilla fija es la que se usa en la actualidad, donde el espectro se divide en partes iguales para que se pueda enviar la información. Estas separaciones uniformes [5] pueden ser de 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz o 100 GHz. Claro está, dicha división tiene como limitante el ancho de banda del medio, por lo que se puede transmitir hasta una determinada cantidad de canales, dependiendo de la separación ya mencionada.

Sin embargo, el problema de la arquitectura para la rejilla fija es que se genera espectro ocioso debido a que el ancho espectral está delimitado a una determinada frecuencia, provocando que, si la señal tiene un espectro menor, el sobrante se pierde [6]. Ello resulta en una ineficiencia para el transporte de información. Es decir, dicho espectro sin uso (espectro ocioso) se podría usar con otras portadoras, aprovechando de mejor manera el ancho del canal. Ello provoca un bajo rendimiento del ancho de banda disponible, por lo que demandas posibles del espectro podrían

verse afectadas ya que saturaría el espectro disponible del medio. Ello da cabida a un aumento de la tasa de rechazos a nuevas peticiones de establecimiento de conexión, es decir, que no exista flujo de información y, por ende, un eventual colapso de la red.

La segunda, red de rejilla flexible, es la nueva opción donde se emplea tecnología de redes de transportes denominado *elastic optical networks* o redes ópticas elásticas. Este tipo de tecnologías permite enviar información, utilizando de mejor manera el medio, gracias a la variabilidad del ancho de banda. Así, se eliminan los espectros ociosos generados, logrando incorporar mayor cantidad de información por el mismo medio.

En el desarrollo de dispositivos aptos para esta posibilidad de variabilidad de ancho de banda, existen empresas que han desarrollado conmutadores selectores de longitudes de onda WSS flexibles (*Wavelength Selective Switching*) [7]. Este tipo de dispositivo permite la asignación del ancho de banda de canales definidos arbitrariamente. Actualmente, existen empresas que se dedican al desarrollo y venta de WSS flexibles, como son Finisar y JDSU. En dichos casos, cada una de estas empresas tienen patentes de WSS flexibles distintos, por lo que emplean tecnologías distintas. En el caso de Finisar, emplea el cristal líquido sobre silicio (LCOS), lo que permite una configuración del equipo en estado sólido, es decir, sin piezas móviles. Para la empresa JDSU [8], ellos emplean tecnología MEMS para lograr el mismo fin.

Producto de una potencial migración hacia las redes ópticas flexibles, surge la necesidad de enseñanza de estas nuevas tecnologías, tanto teóricas como prácticas. Así, resulta relevante que en el aspecto universitario exista un estudio y manipulación de diversos dispositivos que cumplan con funciones de asignación del espectro de señales por fibra óptica. Lamentablemente, en el caso de Chile, son muy pocas las casas de estudio que disponen de laboratorios de sistemas y/o redes ópticas flexibles, ya que aún están inmersas en la red de rejilla fija. Más aún, si se trata específicamente de laboratorios de redes ópticas y flexibles basadas en conmutadores selectores de longitud de onda, no existen.

Debido a que las redes flexibles se encuentran en desarrollo (además de ser una potencial tendencia en la actualidad), requiere de especial atención para los futuros ingenieros civiles electrónicos que se quieran especializar en el área de telecomunicaciones. En el caso de Chile, universidades tales como: Universidad Técnica Federico Santa María, Universidad de Concepción, Universidad Austral de Chile, Universidad de Los Andes y, cómo no, la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, cuentan con laboratorios y/o cursos de redes ópticas, pero no en redes flexibles.

Este proyecto está basado en un componente fundamental para lograr la flexibilidad óptica de la red, el cual es el WSS (*Wavelength Selective Switching*) flexible basado en tecnología LCoS (*Liquid Crystal over Silicon*) el que permite (de)multiplexar acorde a los parámetros que uno desee. El propósito de comprender el funcionamiento de dicha tecnología es para desarrollar un laboratorio de redes ópticas flexibles basadas en este WSS para la enseñanza universitaria de las carreras que correspondan.

La propuesta que se desarrolla es el diseño de experiencias de laboratorio de sistemas y redes flexibles basadas en WSS para hacer frente a las redes de rejilla fija que operan en la actualidad, demostrando todas las ventajas de las rejillas flexibles operadas desde un módulo WSS flexible. Como se nombra en el párrafo anterior, se requiere de un estudio previo respecto a la tecnología de cristal líquido sobre silicio (LCoS) ya que, en la actualidad, los únicos elementos comercialmente disponibles con dicha tecnología, son los WSS flexibles de Finisar.

### **Objetivo general**

- Diseñar e implementar experiencias de laboratorio de sistemas y redes ópticas usando *Wavelength Selective Switching* (WSS) flexibles.

### **Objetivos específicos**

- Evaluar características, operación y control de WSS flexible de Finisar.
- Diseñar e implementar experiencias de laboratorio usando WSS flexible.

# 1 Redes ópticas de transporte

Dado que el intercambio de información es importante para las telecomunicaciones, la cantidad y velocidad a la que se transmite, también lo es. Esto ha dado como resultado la globalización de las redes comunicacionales, tal como se aprecia en la Figura 1-1. En dicha figura se puede observar todas las conexiones ópticas submarinas a nivel mundial [1].

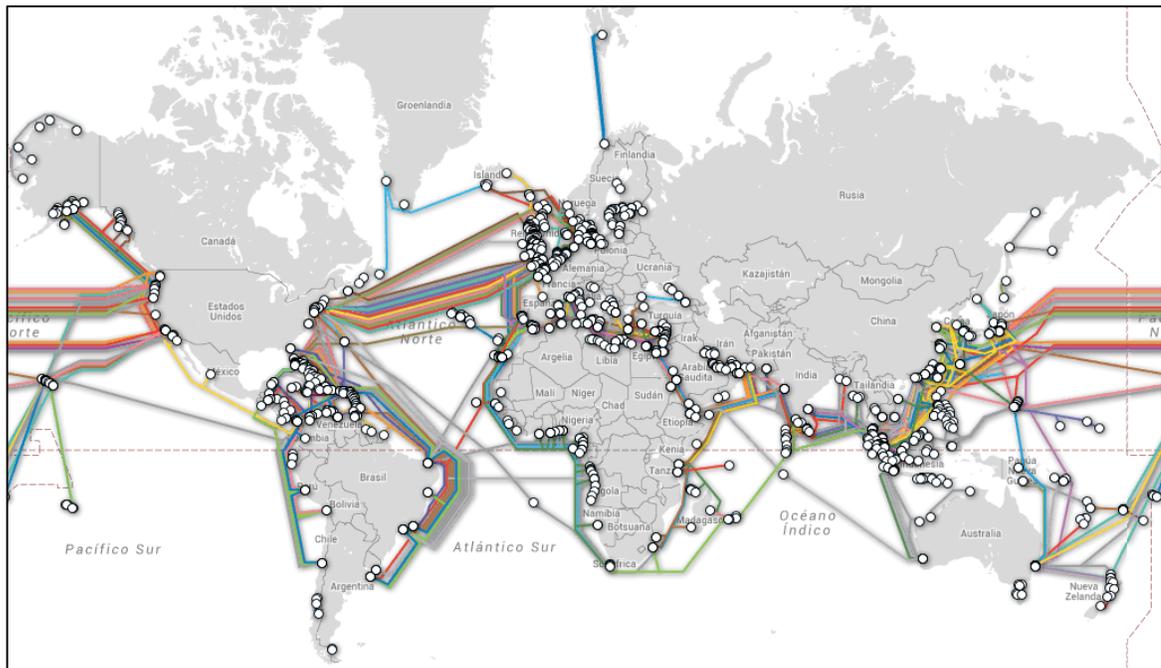


Figura 1-1: Mapa de conexiones submarinas mundiales

El enlace más común de encontrar, es el punto a punto, como el mostrado en la Figura 1-2 [9], donde el *Multiplexing Terminal* (terminal de multiplexación) es aquel que recibe todas las longitudes de onda de los distintos canales para multiplexarlas. A continuación de la etapa del multiplexado, son enviadas por el enlace o medio. Dependiendo de la distancia del tramo, se pueden o no utilizar amplificadores para la línea óptica.

Finalmente, se deben separar las longitudes de onda en los canales respectivos en el orden en que llegaron, empleando el *Demultiplexing Terminal* (terminal de demultiplexación). De esta forma,

las señales ópticas pueden viajar desde un nodo a otro. Para enlaces de más nodos, el principio es el mismo.

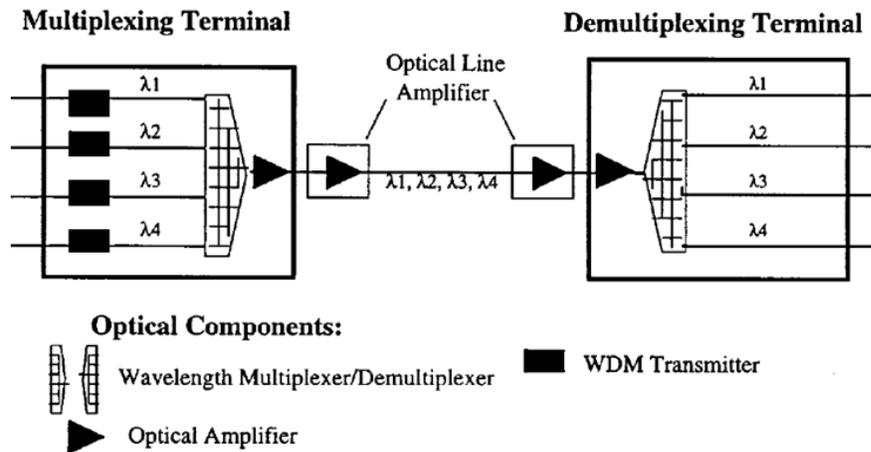


Figura 1-2: Enlace punto a punto

## 1.1 WDM

WDM corresponde a las siglas en inglés de *Wavelength Division Multiplexing* o multiplexación por división de longitud de onda. Es una técnica que permite la transmisión de varias portadoras ópticas de varios canales por un único canal [10]. WDM es una de las técnicas más comunes de encontrar para el transporte de información por un medio óptico, la cual está regida por estándares de la *International Telecommunication Union* (ITU). Por otra parte, la ITU establece una rejilla de longitudes de onda para los canales WDM que corresponde a la llamada tercera ventana (bandas L, C y S) por ser la región con la menor atenuación para las fibras [11], tal como se aprecia en la Figura 1-3 [12]. La Figura 1-4 muestra su funcionamiento, donde  $\lambda$  corresponde a la longitud de onda y  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  y  $\lambda_3$  a distintas longitudes de onda para ser enviadas a través de la fibra óptica. El dispositivo que permite la unión de estas señales en la parte transmisora se denomina multiplexor, mientras que el que las separa recibe el nombre de demultiplexor.

Mayoritariamente, las redes WDM funcionan con una rejilla fija con separación de frecuencia de 50[GHz] entre ellas, definida por el estándar de la ITU-T G.694.1 [5]. Así, el resultado de esto es apreciado en la Figura 1-5 [10], donde el eje horizontal representa la frecuencia y el eje vertical, a la amplitud de las portadoras.

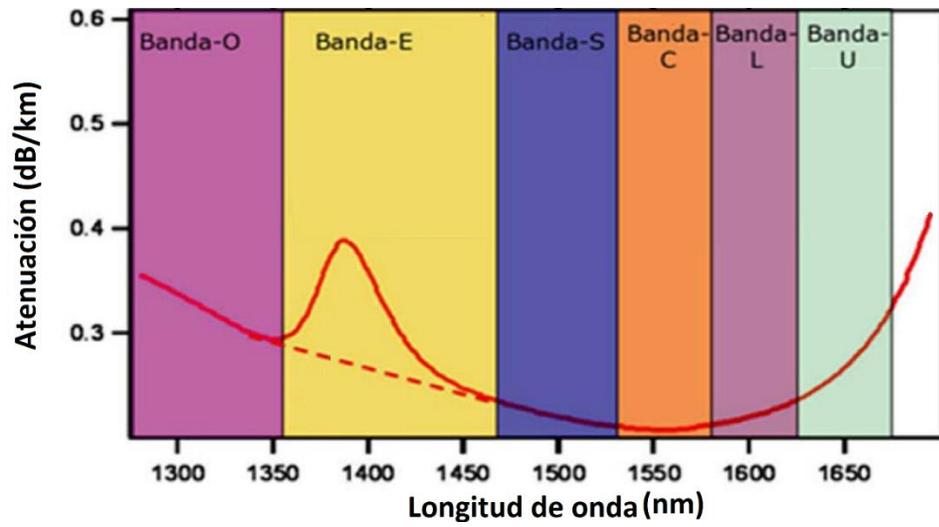


Figura 1-3: Ventanas ópticas

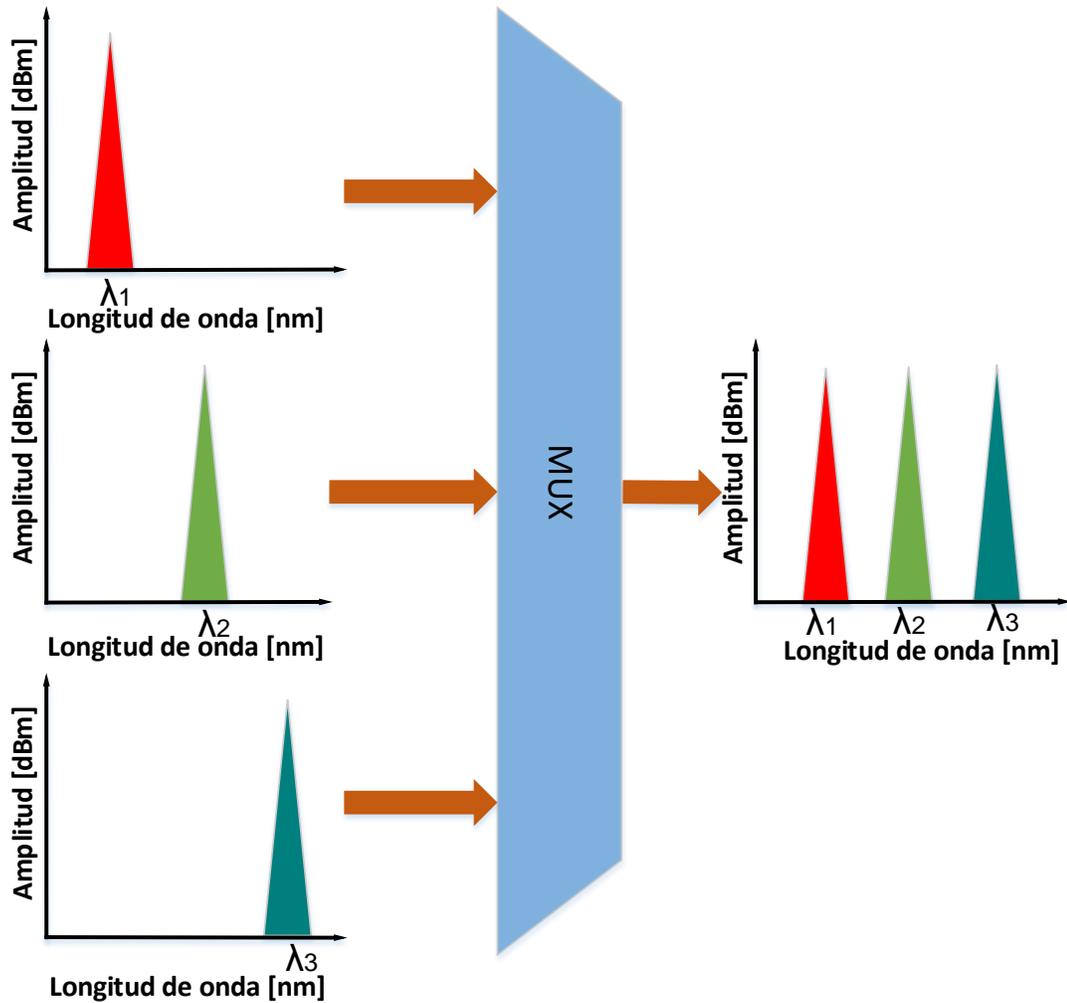


Figura 1-4: Varias portadoras por canales distintos, multiplexadas a un solo canal

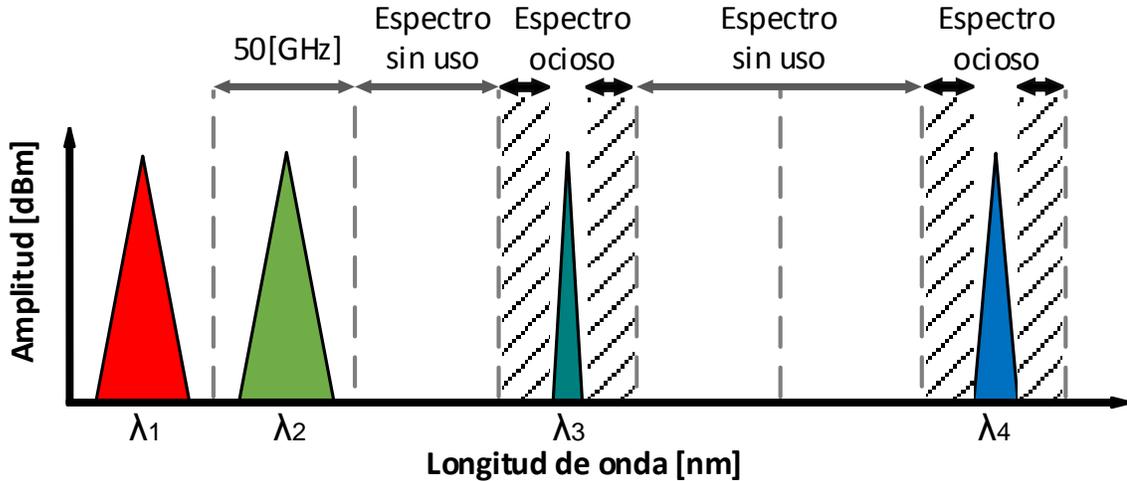


Figura 1-5: Separación espectral

La técnica de WDM surgió con la finalidad de optimizar la transmisión de datos por medio de los cables de fibra óptica, es decir, pasar de la transmisión en paralelo a la transmisión en serie. Esto provoca que no se empleen tantos cables de fibra óptica para enviar información. Implica un ahorro en cuanto a materiales y, consecuentemente, a dinero<sup>1</sup>. Además, como la fibra óptica posee un mayor ancho de banda en comparación a una conexión cableada metálica (cables de cobre, por ejemplo), el primero es ampliamente aceptado para el envío de grandes volúmenes de información. Esta ventaja es porque puede transportar datos en el orden de los cientos de Gigabytes (inclusive Terabytes). Por otra parte, el segundo sólo puede transportar información en el orden de los cientos de Megabytes.

## 1.2 Redes ópticas según el tipo de conexiones

### Red WDM de operación estática

En la Figura 1-6 se presenta una red WDM estática [13], la cual está conformada por nodos y enlaces. Como se aprecia en la figura mencionada, al paso del tiempo, la configuración de esa red no varía por lo que supone un problema en el caso de que exista saturación en alguno de los enlaces según la ruta que se establezca.

### Red WDM de operación dinámica

Como se expuso en la red WDM estática, el problema que tiene es que al paso del tiempo la ruta es siempre la misma (no varía). Para el caso de la red dinámica, al paso de un determinado tiempo, la configuración de la ruta puede cambiar a petición de un controlador, tal como se enseña en la Figura 1-7 [13]. De esta manera, un cambio en la ruta implica que los enlaces que la conforman puedan quedar con menor tráfico a que si la red sea exclusivamente estática.

<sup>1</sup> Si bien es cierto este es un medio eficiente, también es caro, al igual que su instalación.

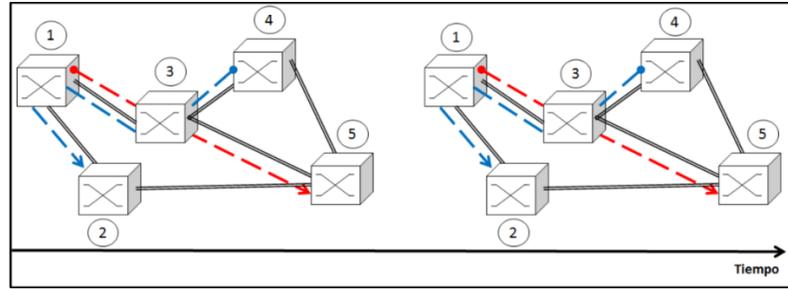


Figura 1-6: Red WDM de operación estática

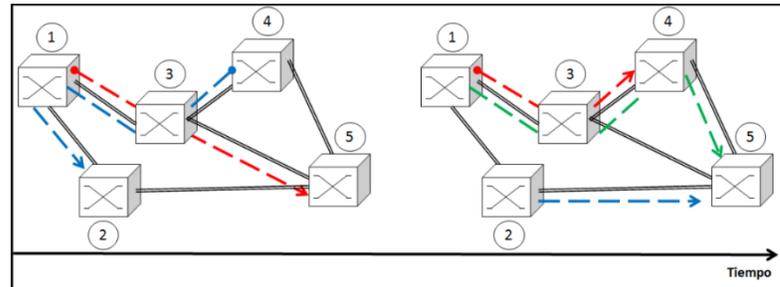


Figura 1-7: Red WDM de operación flexible

### 1.3 Redes según el tipo de asignación del espectro

El objetivo de las redes ópticas flexibles de rejilla flexible es la asignación del espectro acorde a la demanda. En la Figura 1-8 [14] se refleja dicha situación, donde en (a) muestra el espectro con rejilla fija de 50[GHz]. En este se plasman diversos anchos de espectro óptico de acuerdo a la tasa de bit que posea dicha figura. En Figura 1-8(b) se enseñan los mismos espectros, pero esta vez en una red óptica de rejilla flexible, en el cual se suprime el espectro sin usar (también llamado espectro ocioso).

Como consecuencia, al ocurrir este espaciado flexible, permite un uso más eficiente de la red, ya que la rejilla flexible permite ajustar los espectros de modo que se puedan incorporar más. El límite, por supuesto, es el ancho de banda que podrá soportar el canal empleado.

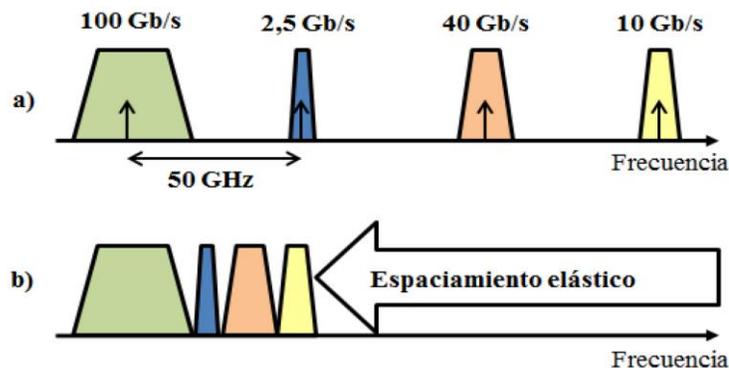


Figura 1-8: (a) con separación fija y (b) elástica/flexible entre canales

En la Figura 1-9, se muestra un nodo ADD-DROP flexible, el cual tiene como componentes internos los WSS flexibles, lo que permiten seleccionar determinadas longitudes de onda. En la etapa de entrada se dispone de *splitters* para dividir la potencia de la señal incidente en partes iguales. Posteriormente, en la etapa de DROP ingresan una de las salidas de cada *splitter* de la etapa de entrada para luego ser administradas por WSS flexibles hacia los receptores. Análogamente para el ADD, los transmisores entregan la señal a WSS y, estos a su vez, otorgan la señal administrada a los *splitters* los cuales se encargan de agrupar todas las señales para ser derivadas a la etapa final de salida. La etapa de salida está controlada por WSS flexibles, los que pueden realizar un filtro y/o atenuación final según sea requerido.

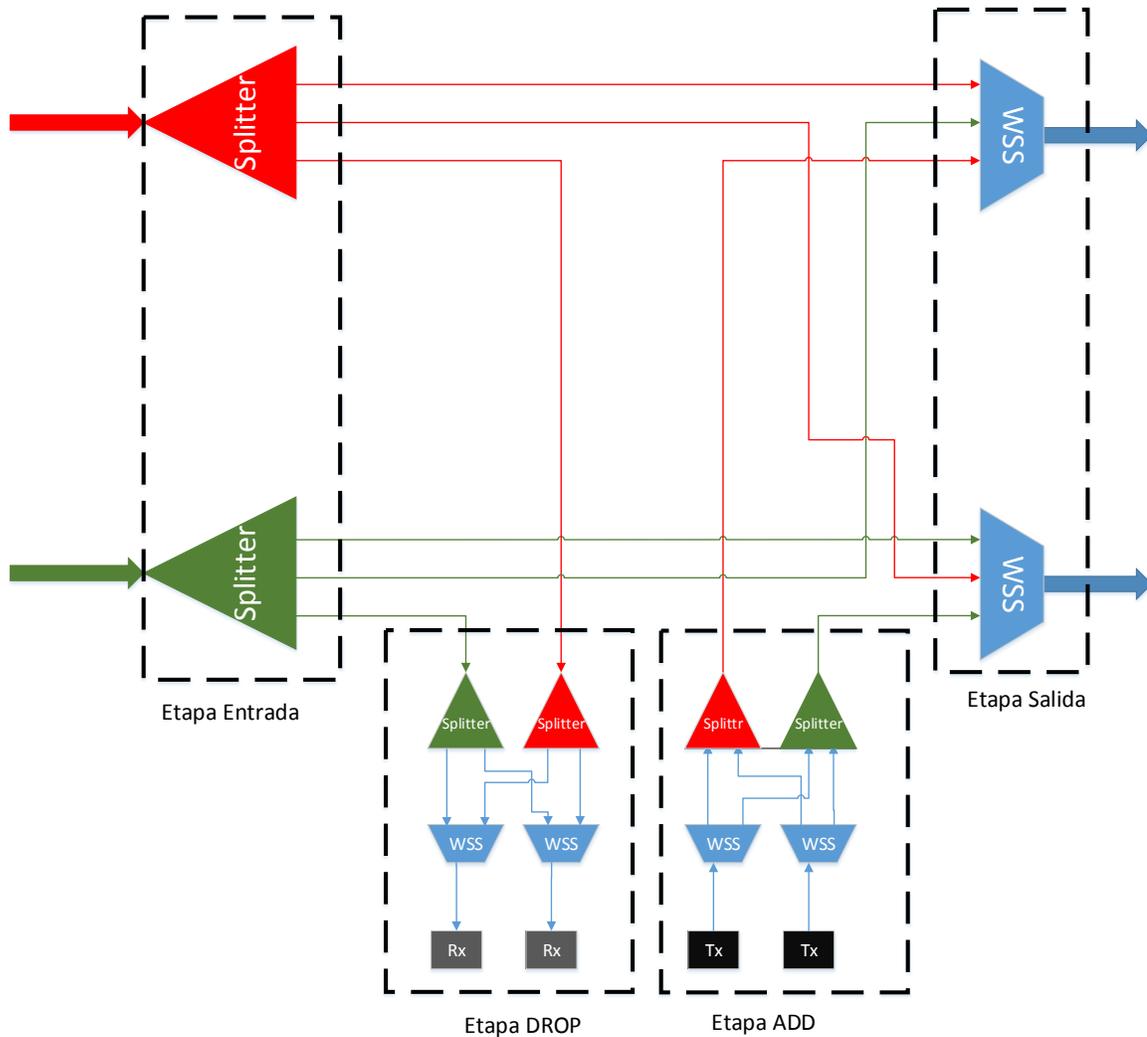


Figura 1-9: Nodo que usa WSS flexibles

Dentro de las tecnologías de las redes ópticas flexibles, se encuentra la de WSS Flexible (*Wavelength Selective Switching*), el cual permite escoger qué longitud(es) de onda(s) recorrerá(n) en un determinado canal, tal como se aprecia en la Figura 1-10. De esta manera, se puede dar una solución respecto a señales que posean un mayor ancho espectral, proporcionando un espaciamiento adecuado sin irrumpir con los espectros de las otras señales.

La tecnología que se emplea para lograr la selección de longitud de onda es la de LCoS [7]. Esta permite ajustar los parámetros espectrales ópticos. Además, Finisar dispone de equipos WSS como el mostrado en la Figura 1-11.

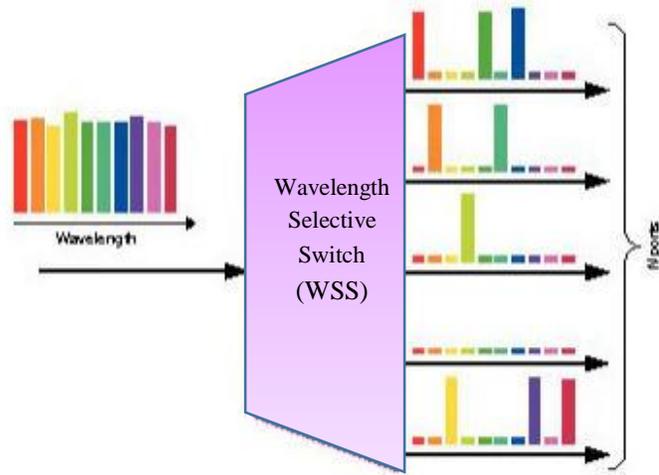


Figura 1-10: Esquema<sup>2</sup> de funcionamiento de un WSS [15]



Figura 1-11: WSS de Finisar [16]

<sup>2</sup> Este esquema sólo muestra el funcionamiento como MUX. Pero también se puede usar como DEMUX

## 2 Estado del arte

Este capítulo trata respecto a la eventual deficiencia de la red y a las otras casas de estudio a nivel nacional, respecto a laboratorios de sistemas y/o redes ópticas.

Lamentablemente, no hay indicios de laboratorios de redes ópticas y flexibles basadas en WSS en Chile, por lo que en este capítulo se dan a conocer las deficiencias de una red WDM comparándola con una red flexible. Además, se dan a muestran los implementos de las universidades que disponen de algún tipo de laboratorio referida al tema de este documento.

### 2.1 Ventajas de redes flexibles

Las redes ópticas flexibles presentan ventajas por sobre las redes de rejilla fijas, como las siguientes:

- División flexible del espectro óptico según el ancho de banda de la demanda requerida. Es la asignación que posee, reduciendo el espectro ocioso dentro de cada canal.
- Reducción de bandas de guarda: es la separación mínima requerida entre las señales para que no ocurra un solapamiento o sobreposición entre las señales.
- Mayor eficiencia espectral: por lo nombrado en los dos puntos anteriores, el canal es utilizado de manera eficiente, aumentando la capacidad de la demanda.

Dichas ventajas listadas hacen referencia a las eventuales deficiencias de una red WDM. Por lo tanto, resultaría provechoso un cambio en la tecnología para optimizar el espectro que se asigna.

### 2.2 Implementos de laboratorio para redes ópticas en universidades

Para implementar redes ópticas flexibles se debe contar con laboratorios de investigación adecuados para ello. En Chile, las universidades que disponen de laboratorios o asignaturas teóricas de redes ópticas, son:

- V región de Valparaíso:
  - Universidad Adolfo Ibáñez (UAI)
  - Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM)
- Otras regiones:
  - Universidad de Los Andes

- Universidad de Santiago de Chile (USaCh)
- Universidad de Concepción (UdC)
- Universidad Austral de Chile (UACH)

De las universidades listadas, todas tienen implementos para establecer redes ópticas con tecnología WDM a nivel de laboratorio, pero no del tipo que se propone en el título de este documento. De esta manera, resulta evidente la necesidad de implementar un laboratorio de redes ópticas flexibles para la enseñanza en la educación superior. Esta necesidad surge porque no existen universidades que dispongan este tipo de laboratorios de redes ópticas flexibles y para que los posteriores profesionales tengan una mejor noción del estado de las redes ópticas en un futuro.

A continuación, se presenta una tabla que resume el equipamiento disponible en las universidades de la quinta región nombradas en el párrafo anterior:

Tabla 2-1: Lista de componentes disponibles de algunas universidades de la V Región [6]

<b>Componente</b>	<b>Cantidad disponible</b>	<b>Universidad</b>
Convertor de medios Fibra Ethernet	4	UAI
<i>Transceiver</i> SFP	4	UAI
Interruptor óptico	10	UAI
MUX/DEMUX DWDM	12	UAI
Atenuador variable	2	UAI
<i>Splitters</i> ópticos		UAI
Conmutadores MEMS de 2x2		UAI
Fuentes ópticas fijas		UAI
Convertidores electro ópticos		UAI
OSA <sup>3</sup>	1	UTFSM
OTDR con OPM incluido	1	UTFSM
TOS <sup>4</sup>	1	UTFSM
Kit fibra óptica	1	UTFSM

<sup>3</sup> *Optical Spectrum Analyzer* (Analizador de Espectro Óptico)

<sup>4</sup> *Tunable Optical Source* (Fuente Óptica Sintonizable)

<b>Componente</b>	<b>Cantidad disponible</b>	<b>Universidad</b>
POA <sup>5</sup>	1	UTFSM
<i>Transceiver</i> óptico	1	UTFSM
Amplificador óptico EDFA	1	UTFSM
Kit experimental de fibra óptica	1	UTFSM
Carretes de fibra óptica (25[km])	2	UTFSM
Fuente láser	1	UTFSM
Controlador de temperatura	1	UTFSM
Controlador de corriente	1	UTFSM
Sistema de montaje láser	1	UTFSM
Dispositivos ópticos pasivos		UTFSM
<i>Patch panel</i>	1	UTFSM
<i>Splitter</i> monomodo 50/50	2	UTFSM
<i>Splitter</i> monomodo 10/90	1	UTFSM
MUX/DEMUX WDM	5	UTFSM
Convertor de medios Fibra Ethernet	4	PUCV
OTDR	1	PUCV
<i>Transceiver</i> SFP	4	PUCV
Interruptor óptico	3	PUCV
<i>Splitter</i>	10	PUCV
MUX/DEMUX	2	PUCV
Sistema DWDM punto a punto	1	PUCV

---

<sup>5</sup> *Programmable Optical Attenuator* (Atenuador Programable Óptico)

De la Tabla 2-1 se agrega la PUCV debido a que cuenta con implementos pero no con las respectivas asignaturas de laboratorios de redes ópticas. Por otra parte, resulta evidente que, de la totalidad de componentes anteriormente listados, todos ellos son útiles para la realización de pruebas de redes<sup>6</sup> de rejilla fija.

De esta manera, al incluir un elemento como un WSS flexible, ya se pueden desarrollar experiencias de laboratorio para rejilla flexible. Esto permite solucionar el problema de necesidad de educación explicado en la introducción de este documento, incorporando para el alumnado interesado, experiencias de laboratorio para redes ópticas flexibles basadas en WSS.

---

<sup>6</sup> Considerando la implementación de dos WSS flexibles 1x9, se puede llegar a concretar un pequeño nodo de grado nodal 2.

## 3 Tecnología LCoS

Este capítulo da a conocer el funcionamiento interno de un WSS flexible basado en LCoS (*Liquid Crystal over Silicon*), donde se indica el principio físico que hay de por medio para tener una idea de las limitaciones generales de este dispositivo. Este dispositivo se encuentra disponible en el laboratorio de telecomunicaciones de la Escuela de Ingeniería Eléctrica (EIE) de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV)

Primero se explica el uso del cristal líquido y polarización, luego la combinación con la matriz de silicio y el funcionamiento en general.

### 3.1 Cristal Líquido

El cristal líquido (LC por sus siglas en inglés) es un material que presenta una fase intermedia entre el estado líquido y el sólido. Este cambio de estado se puede alterar por temperatura, diferencia de potencial o la aplicación de un campo magnético.

Para controlar la posición de las moléculas de cristal líquido se aplica, preferiblemente, un campo eléctrico. De esta manera, su vector director<sup>7</sup> cambia de dirección de modo que se realiza una desviación del haz de luz incidente en dos dimensiones<sup>8</sup> [17], como se aprecia en la Figura 3-2. Esa misma figura, además de mostrar la posición del haz, también muestra la polarización de la pantalla de cristal líquido.

#### Modulación espacial de luz

La modulación espacial de luz o SML (*Spacial Light Modulators*) se logra al poder controlar el cristal líquido, como se menciona en 3.1. Posteriormente, se puede incorporar otras tecnologías acordes a la finalidad que se requiera. Para el caso del WSS de FINISAR, éste se basa en cristal líquido sobre silicio (LCoS).

---

<sup>7</sup> Se entiende por vector director a aquella línea recta que define la dirección y orientación de todas las moléculas del LC.

<sup>8</sup> Estas dimensiones se entenderán como dirección vertical y horizontal.

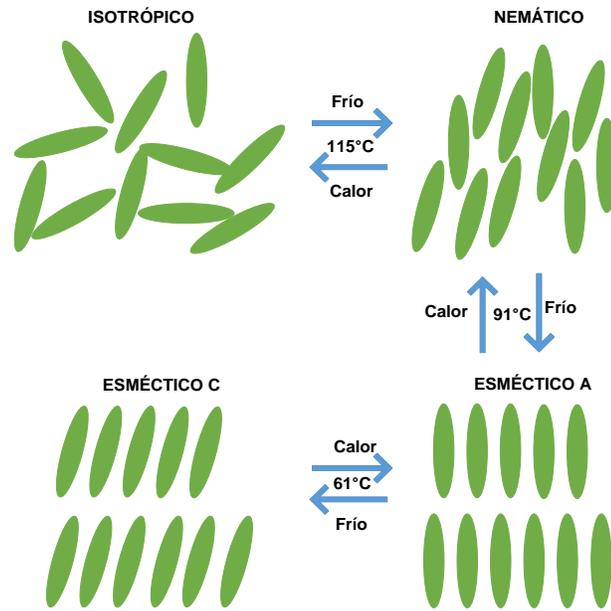


Figura 3-1: Estados comunes del LC respecto a su temperatura

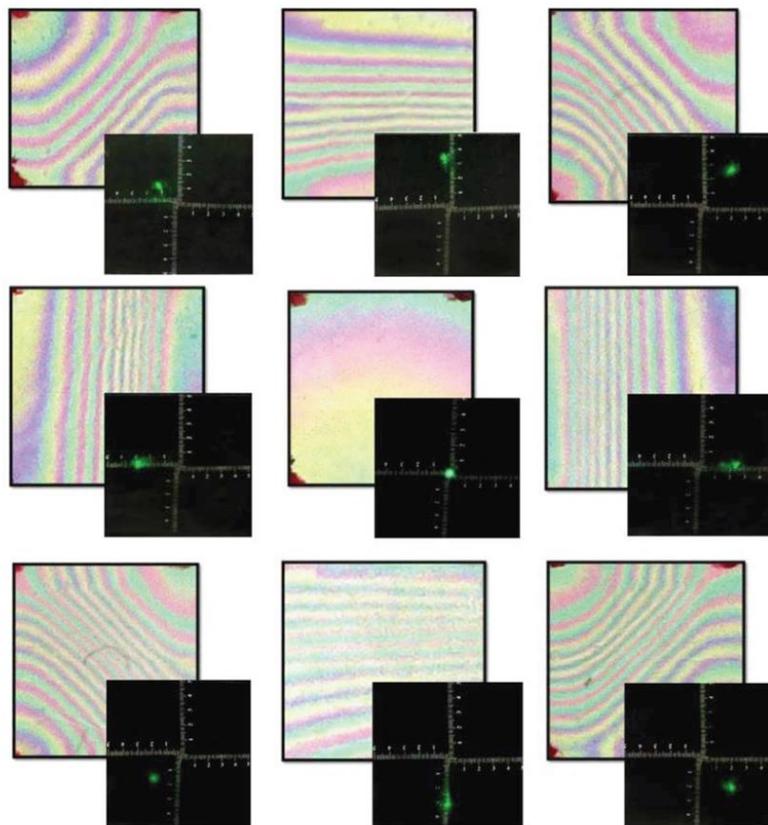


Figura 3-2: Posiciones del haz de luz junto con la polarización del cristal líquido al someterlo a distintas tensiones [17]

### 3.2 Combinación con matriz CMOS

Con la modulación espacial de luz lista, para que el WSS cumpla con su función se requiere de una pantalla transistorizada o matriz CMOS. Esta matriz puede, además, ser usada como filtro: permite pasar o no un haz de luz, oscureciendo o aclarando una porción de píxeles respectivamente, tal como se aprecia en la Figura 3-3.

Cabe mencionar que la Figura 3-3 sólo hace referencia para una única longitud de onda. Para incorporar más longitudes de onda, el principio es el mismo con la salvedad de que es menester el uso de elementos tales como: un polarizador óptico (adecúa el haz de luz); una rejilla de difracción (actúa como un dispersor de la luz, Figura 3-4). Esta rejilla de difracción dispersa angularmente la luz, por lo que cada longitud de onda es enviada a una porción del LCoS según el eje horizontal); un espejo y la matriz LCoS de dos dimensiones ya mostrada y explicada (Figura 3-3).

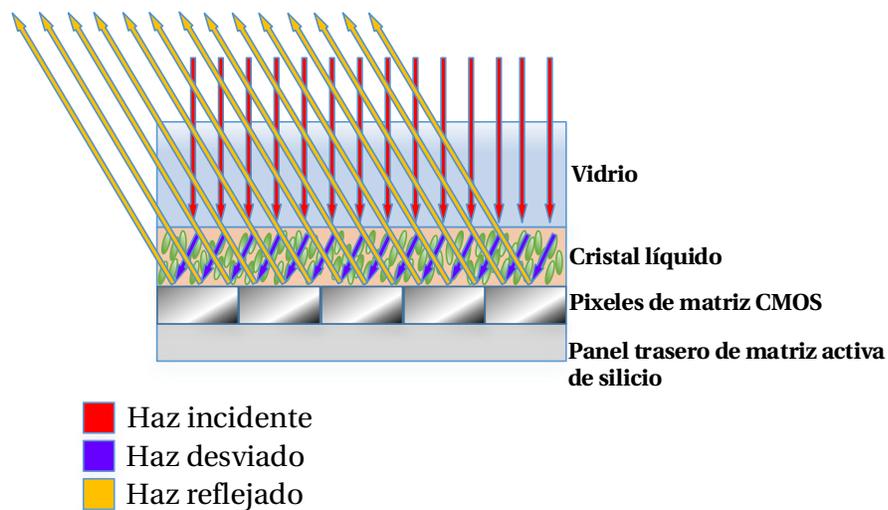


Figura 3-3: Funcionamiento de una fila de la matriz de LCoS

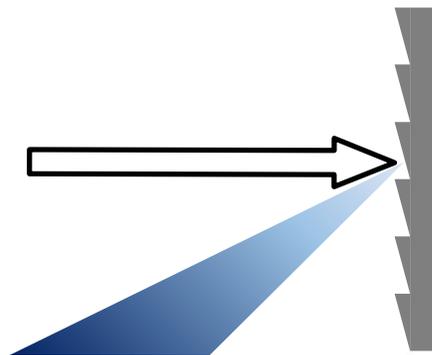


Figura 3-4: Rejilla de dispersión

### 3.3 Funcionamiento

La Figura 3-5 muestra el funcionamiento interno completo del WSS. A continuación, se explica las etapas por las que debe pasar la luz del láser para ser tratada por este dispositivo.

El elemento activo del WSS es la matriz de pixeles de dos dimensiones de LCoS ya explicado. La luz es enviada desde una matriz de fibras (Figura 3-6, (a)) a través de un polarizador (Figura 3-6(b)), el cual físicamente separa y alinea los estados de polarización ortogonal. Posteriormente, el haz es reflejado por un espejo (Figura 3-6(c)) hacia una óptica de imagen (Figura 3-6(d)) y luego por una rejilla de difracción (Figura 3-6(e)), para finalmente llegar a la matriz LCoS 2D (Figura 3-6(f)) la cual se encarga de desviar, filtrar y/o atenuar este haz según corresponda [18]. Finalmente, el haz debe realizar el camino inverso para salir por el mismo canal u otro, según lo desee el usuario.

Para la atenuación de alguna longitud de onda, lo que se hace es modificar el contraste de una determinada fila de la matriz de LCoS pasando desde contraste completo (refleja el haz) hasta sin contraste (absorbe al haz).

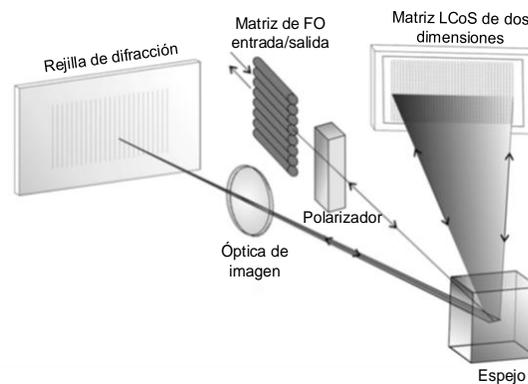


Figura 3-5: Esquema del funcionamiento interno del WSS basado en LCoS de FINISAR

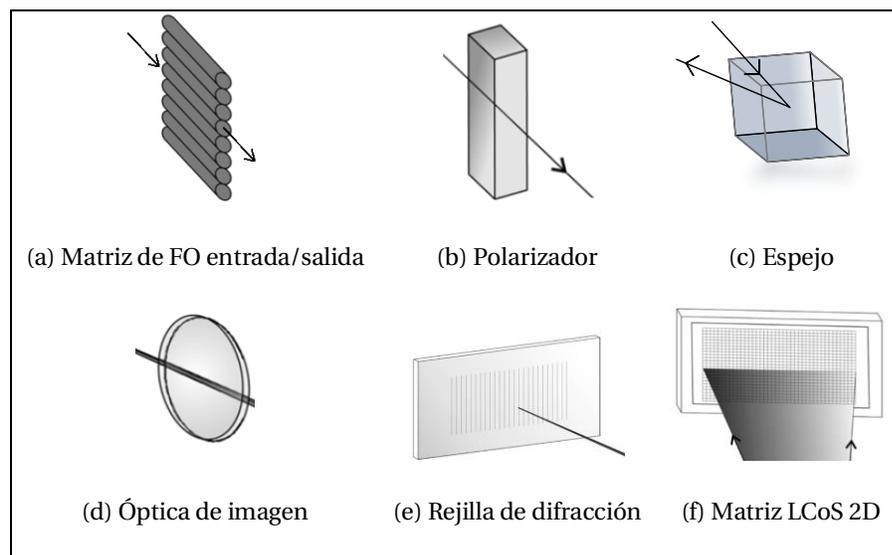


Figura 3-6: Elementos que componen el WSS

## 4 Características del WSS

El WSS basado en cristal líquido sobre silicio (WSS LCoS<sup>9</sup> [19]) es un dispositivo que no posee partes mecánicas. Ello ofrece una ventaja por ser menos propenso a fallos de ese tipo, y un tiempo de respuesta mejor respecto a otros dispositivos de la competencia. Otra empresa, como JDSU [20], desarrollan WSS en base a MEMS<sup>10</sup>.

El WSS adquirido permite configurarlo, mediante conexión serial, empleando un computador. Además, antes de realizar cualquier manipulación, es menester conocer datos básicos, pero importantes, referentes a sus capacidades, límites físicos y esquema funcional, con el propósito de no dañarlo por mal uso.

### 4.1 Especificaciones

El WSS posee configuración 1x9, es decir, un canal de entrada y nueve de salida (si es que funciona como multiplexor). Dentro de las especificaciones técnicas de este producto, están las que se muestran en la Tabla 4-1 [21].

Tabla 4-1: Características relevantes del WSS flexible de Finisar

Característica	Descripción
Voltaje de alimentación	4,75~5,25 V
Potencia óptica máxima total de entrada	27 dBm
Ancho del canal	12,5 GHz
Número de porciones	386 canales @12,5 GHz, 96 canales @50 GHz y 48 canales @100 GHz

<sup>9</sup> *Liquid Crystal over Silicon* o cristal líquido sobre silicio. Esta tecnología consiste en la polarización del cristal líquido por medio de una matriz transistorizada.

<sup>10</sup> *MicroElectroMechanical Switching* o conmutadores microelectromecánicos. Son efectivos, al igual que LCoS, pero propensos a fallas mecánicas.

Tabla 4-2: Especificaciones más significativas del WSS

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Pérdidas por inserción <sup>11</sup>	2~6,5 dB
Tráfico soportado	10 Gb/s hasta 400 Gb/s [22] para canales ópticos definidos según la ITU

### Límites de potencia

El WSS posee una potencia óptica de entrada total de, a lo más, 27 dBm y una potencia óptica de entrada de, a lo más, 9 dBm por cada ranura de 12,5 GHz. En la Tabla 4-3, se resumen los tipos de atenuación y sus rangos.

Tabla 4-3: Pérdidas relevantes en el WSS

<b>Tipo de pérdida</b>	<b>Valor mínimo dB</b>	<b>Valor máximo dB</b>
Inserción	2	6,5
Inserción uniforme por puerto		1,5

### Puertos

El WSS LCoS de Finisar adquirido posee 10 puertos, de los cuales 9 corresponden a puertos conmutables y el restante a un puerto común. Dependiendo de cómo se necesite usar este dispositivo, los puertos pueden funcionar como entradas o como salidas. La Figura 4-1 enseña los 10 puertos del WSS, ordenado de a pares. La Figura 4-2, muestra una vista del WSS ya instalado y funcionando en un rack. La decisión de montarlo sobre un rack se debe a la fragilidad de los componentes y, por ende, evitar dañarlo por algún error humano.

<sup>11</sup> Como todo dispositivo óptico, cada conexión tiene una pérdida asociada. La inserción como tal, corresponde a aquella pérdida relacionada con las conexiones internas del dispositivo. Las pérdidas por inserción uniforme por puerto hacen referencia al conector mismo destinado para ser puesto en un *patch panel*.

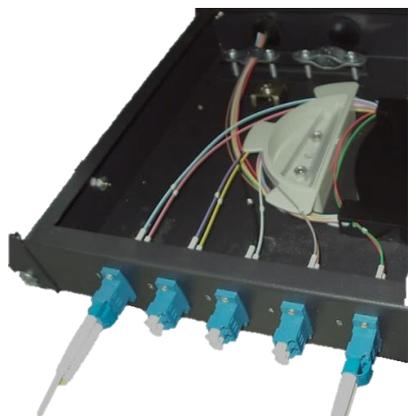
Figura 4-1: Puertos del WSS en un *patch panel*

Figura 4-2: Vista lateral del módulo completo ya instalado y funcionando

## 4.2 Canales

Al emplear tecnología *Flexigridd* [23] [24], el WSS permite adaptar manualmente el ancho de banda de los canales para dar paso a las señales entrantes/salientes. El usuario puede definir arbitrariamente la configuración de los canales, al igual que su ancho de banda.

El WSS opera entorno a la banda C, que va desde los 191,3 THz hasta los 196,1 THz. El ancho de banda mínimo que se puede usar es de 12,5 GHz por ranura [5], mientras que el más grueso alcanza los 100 GHz. En la Tabla 4-4, se enseña la cantidad de canales disponibles acorde a una de las posibles configuraciones, si se mantiene un ancho de banda fijo por ranura. También se pueden establecer anchos variables por cada canal, según la preferencia del usuario o de los requerimientos de la red.

Tabla 4-4: Resumen de canales por BW según ranura elegida

Canal	Frecuencias disponibles para ancho de banda de 12,5 GHz por ranura	Frecuencias disponibles para ancho de banda de 50 GHz por ranura	Frecuencias disponibles para ancho de banda de 100 GHz por ranura
0 <sup>12</sup>	191,3000	191,3000	191,3000
1	191,3125	191,3500	191,4000
⋮	⋮	⋮	⋮
48	191,9000	193,7000	196,1000
⋮	⋮	⋮	⋮
96	192,5000	196,1000	-
⋮	⋮	⋮	⋮
386	196,1000	-	-

<sup>12</sup> El canal 0 corresponde a la frecuencia de partida

***Flexigrid* [24]**

*Flexigrid* está basado en la noción de ubicar pequeñas ranuras espectrales para construir un número de canales en el dispositivo WSS. Los canales resultantes pueden ser fijos o de ancho variable. Los bordes de la ranura espectral corresponden a los centros de longitudes de onda establecidos por la ITU [5]. Las ranuras son ubicadas desde la frecuencia más baja hasta la más alta. Una vez ubicados, estos canales podrán ser tratados y operados por el usuario acorde al plan que elija.

**4.3 Esquema funcional**

Este es el aspecto más relevante [25], ya que permite entender a cabalidad las limitantes operativas de este dispositivo. Tal como se aprecia en la Figura 4-3, ingresan al dispositivo todas las FSU<sup>13</sup> de la red, representadas con distintos colores para diferenciarlas. Posteriormente, pasan por tres etapas denominadas DEMUX FSU, atenuación, conmutación y MUX FSU, respectivamente.

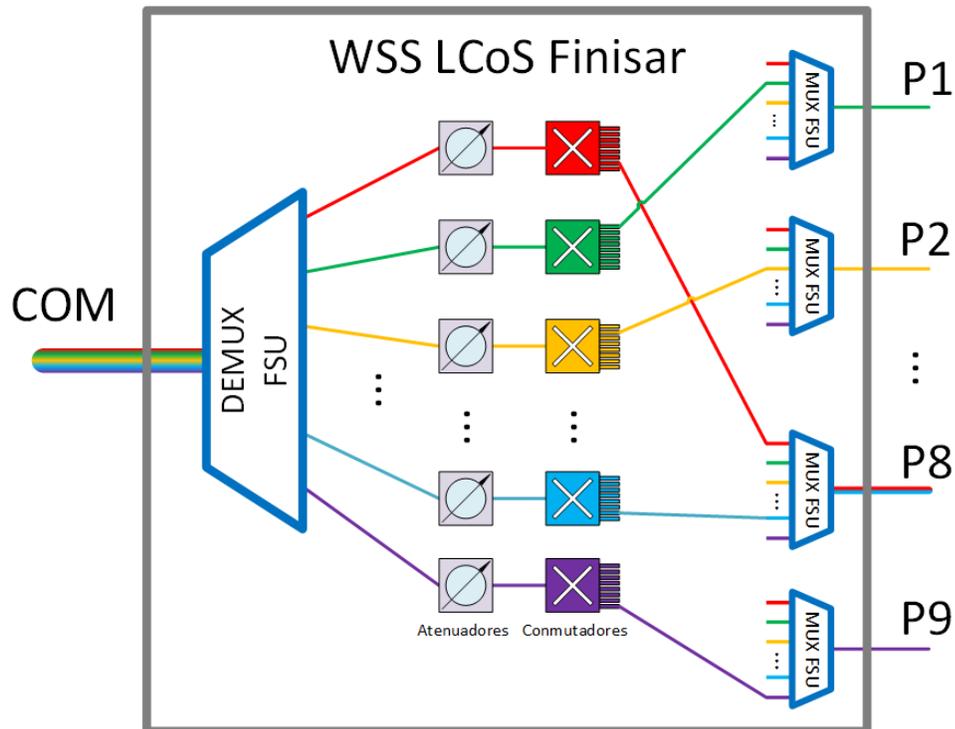


Figura 4-3: Esquema funcional WSS FINISAR

<sup>13</sup> *Frequency Slot Unit* o unidad de ranura de frecuencia. Corresponde a una pequeña franja del espectro, equivalente a 12,5 GHz

## **DEMUX FSU**

Es programado desde un PC para realizar la discriminación de canales. Es decir, se requiere previamente la asignación de un plan de canales para hacer coincidir las FSU que ingresan con las que se deseen tratar.

## **Atenuación**

Con los FSU ya separados en sus canales respectivos, continúa con la etapa (opcional) de atenuación. Se sabe que la tendencia es a amplificar las señales, pero esta característica es de utilidad si es que se conectan en cascada dos o más WSS ya que poseen limitantes de potencia óptica por FSU. FINISAR indica que la máxima potencia óptica que puede soportar un canal de 1 FSU es de 9 dBm. Además, la potencia óptica máxima para un conjunto de canales (varios grupos de FSU) para un único puerto es de 27 dBm [24].

## **Conmutación.**

En esta parte, lo que se desea conmutar son los canales (que contienen una determinada cantidad de FSU definida por el usuario u operador de la red) hacia algún puerto determinado. Cabe destacar que el WSS de FINISAR no funciona como un *splitter*, es decir, los conmutadores son 1 a 1. De esta manera, se entiende que un canal pasa por un conmutador hacia un único puerto.

## **MUX FSU**

Finalmente, todos los FSU conmutados llegan a un MUX referido a un puerto físico en específico. Así, se puede dar el caso de que uno o más canales tengan como salida un puerto en común.

Todo lo anteriormente nombrado se puede lograr mediante una interfaz serial entre un PC y dicho dispositivo. En los posteriores capítulos, se darán a conocer las posibles configuraciones del WSS de FINISAR.

## 5 Programación del WSS

El WSS, al ser un (de)multiplexor programable, requiere que el usuario conozca su interfaz de desarrollo. Finisar proporciona un documento [24], el cual indica todos los comandos que el usuario puede usar y cuáles son sus funciones. No obstante, no proporciona una secuencia de ejecución, por lo que el usuario debe leer y establecer por su cuenta el plan<sup>14</sup> a ejecutar.

### 5.1 Comandos entregados por el fabricante

A continuación, se despliega la Tabla 5-1 que muestra los comandos que hacen referencia al establecimiento del plan de configuración y otras opciones.

Tabla 5-1: Lista de comandos más importantes

Comando	Descripción
SUS	<i>Start-up State</i> : Lee el estado de inicio del dispositivo, es decir, si inicia la última configuración guardada, inicia completamente bloqueado o inicia con la opción de fábrica por defecto.
SDF	<i>Start Factory Default</i> : Establece, de inmediato, los valores de fábrica cargados por defecto.
SAB	<i>Start All Blocked</i> : Establece, de inmediato, un bloqueo en todos los canales, ya sea por puerto y por atenuación.
SLS	<i>Start Last Saved</i> : Almacena los canales actuales, el plan de canales y atenuación por cada canal en la memoria no volátil.
OSS?	<i>Operational Status</i> : Indica el estado actual del dispositivo.

<sup>14</sup> El término «plan» hace referencia al ancho de banda del tramo a emplear y depende si corresponde a múltiplos de 12,5 GHz acorde con la normativa de la ITU-T G.694.1 [10]

Comando	Descripción
CHW [0 50 100]	<i>Channel Spacing Write</i> : Este comando cambia el espaciado del canal actual entre 50 GHz, 100 GHz y en modo <i>Flexigrid</i> .
CHR?	<i>Channel Spacing Read</i> : Lee el espaciado del canal: 50 GHz, 100 GHz o <i>Flexigrid</i>
DCC <C> <sup>15</sup> =<S> <sup>16</sup> :<S>	<i>Define Custom Channel</i> : Este es un comando específico de la opción <i>Flexigrid</i> del plan de espaciado de canales asignado (la opción <i>Flexigrid</i> está elegida por defecto). Permite ubicar las ranuras espectrales correspondientes a un determinado canal para crear un plan de canales <i>Flexigrid</i> .
DCC?	<i>Query Custom Channel</i> : Comando específico de <i>Flexigrid</i> . Retorna una lista con el plan actual de canales.
RRS? <C>	<i>Read Reconfig-Single channel</i> : Lee la configuración actual de un único canal.
RCS? <C>	<i>Read Custom-Single channel</i> : Entrega la configuración de un único canal personalizado. Este comando considera valores específicos, tales como canal inicial, bloqueo por puerto y bloqueo por atenuación (si está definido).
RCA?	<i>Read Custom-Array</i> : Entrega la configuración de un arreglo de canales personalizados. Este comando considera valores específicos, tales como canal inicial, bloqueo por puerto y bloqueo por atenuación (si está definido).
RRA?	<i>Read Reconfig-Array</i> : Lee la configuración actual de todos los canales del plan de canales actual.
URA <C>,<P> <sup>17</sup> ,<A> <sup>18</sup>	<i>Update-Reconfig Array</i> : Este comando instruirá al dispositivo a preparar un nuevo arreglo de canales (mediante un patrón de la matriz LCoS). Para hacer efectivo este cambio, se requiere ejecutar, posteriormente, el comando RSW.
RSW	<i>Reconfigure Switch</i> : Envía al dispositivo (específicamente a la matriz LCoS) la nueva configuración de canales, previamente designado por el comando URA. Solo los canales modificados por URA se verán afectados. La Figura 5-1 [26] muestra el cambio del patrón de la pantalla LCoS acorde al ancho del canal elegido.
RPA	<i>Read Pending-Array</i> : Este comando lee los cambios pendientes de todos los canales del plan de canales.

Comando	Descripción
NTZ	<i>Normalize To Zero</i> : Comando exclusivo de <i>Flexigrid</i> . Se emplea para normalizar los valores de atenuación de todos los canales activos a 0,0 dB.
RES	<i>Reset</i> : Realiza una inicialización que no afecta el tráfico recibido por el dispositivo.
STR	<i>Store Data</i> : Permite guardar el modo de canal, el plan de canal y los valores de atenuación de cada uno de estos en la memoria no volátil.
HELP	<i>Supporting Help</i> : Provee un texto de salida con la lista de los comandos admitidos por el WSS.

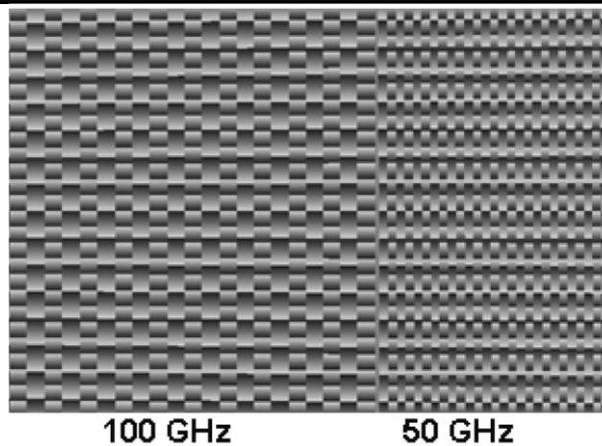


Figura 5-1: Patrón de la pantalla LCoS

## 5.2 Definición de canales personalizados

Si se emplea la definición de canales que viene por defecto, el comando «DCC?» permite conocer la definición actual de canales. Así, se podrá saber el número de canales y el ancho asignado para cada canal, tal como se muestra en el Listado 5-1.

Del Listado 5-1, la primera línea, en negrita, es el comando ingresado. Las líneas 2 y 3 corresponden a la respuesta del dispositivo. El «OK» indica que no hay problemas en la definición de canales previamente cargados.

Listado 5-1: Ejecución del comando DCC?

```

1 DCC?
2 1=1:4;2=5:8;3=9:12;4=13:16;5=17:20;6=21:24;7=25:28;8=29:32;9=33:36;10=37:40;11=41:4
4;12=45:48;13=49:52;14=53:56;15=57:60;16=61:64;17=65:68;18=69:72;19=73:76;20=77:80;

```

<sup>15</sup> <C> hace referencia al número de canal según el plan de canales establecido.

<sup>16</sup> <S> hace referencia a la ranura escogida.

<sup>17</sup> <P> hace referencia al número de puerto físico del dispositivo.

<sup>18</sup> <A> hace referencia a la atenuación en dB para un canal determinado.

21=81:84; 22=85:88; 23=89:92; 24=93:96; 25=97:100; 26=101:104; 27=105:108; 28=109:112; 29=113:116; 30=117:120; 31=121:124; 32=125:128; 33=129:132; 34=133:136; 35=137:140; 36=141:144; 37=145:148; 38=149:152; 39=153:156; 40=157:160; 41=161:164; 42=165:168; 43=169:172; 44=173:176; 45=177:180; 46=181:184; 47=185:188; 48=189:192; 49=193:196; 50=197:200; 51=201:204; 52=205:208; 53=209:212; 54=213:216; 55=217:220; 56=221:224; 57=225:228; 58=229:232; 59=233:236; 60=237:240; 61=241:244; 62=245:248; 63=249:252; 64=253:256; 65=257:260; 66=261:264; 67=265:268; 68=269:272; 69=273:276; 70=277:280; 71=281:284; 72=285:288; 73=289:292; 74=293:296; 75=297:300; 76=301:304; 77=305:308; 78=309:312; 79=313:316; 80=317:320; 81=321:324; 82=325:328; 83=329:332; 84=333:336; 85=337:340; 86=341:344; 87=345:348; 88=349:352; 89=353:356; 90=357:360; 91=361:364; 92=365:368; 93=369:372; 94=373:376; 95=377:380; 96=381:384

3 OK

Como a simple vista resulta complejo de ver la información entregada, se hace el análisis simplificado (3-1) para una mejor comprensión.

$$C_n = S_{inicial} \cdot S_{final} \dots \tag{5-1}$$

De (3-1), se aprecian tres índices que son explicados en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Descripción de índices del comando «DCC»

Índice	Significado
$C_n$	Corresponde al número de canal al cual se va a asignar un ancho de banda.
$S_{inicial}$	Ranura inicial
$S_{final}$	Ranura final

Entonces, considerando la asignación del ancho del primer canal mostrado en el Listado 5-1 y, de acuerdo con la Tabla 5-2, la traducción de ese primer tramo quedaría así:

1. Considerando que, por defecto, cada canal tiene un ancho de 50 GHz (es decir, se tienen 96 canales disponibles), cada canal deberá contener 4 ranuras según esa configuración.
2. El ancho de cada ranura son 12,5 GHz (ancho mínimo de un canal).
3. La ranura inicial asignada del canal 1, es desde la ranura 1.
4. La ranura final asignada del canal 1, es hasta la ranura 4.
5. De los puntos 3 y 4 se determina el ancho, según la ecuación (3-2):

$$BW_{canal\ 1} = [(S_{final} + 1) - S_{inicial}] \cdot 12,5\ GHz \tag{5-2}$$

$$BW_{canal\ 1} = [(4 + 1) - 1] \cdot 12,5\ GHz$$

$$BW_{canal\ 1} = 50\ GHz$$

De esta manera, se demuestra la obtención del BW para cada canal. Además, la asignación del BW de manera gráfica para el canal 1, es la mostrada en la Figura 5-2:

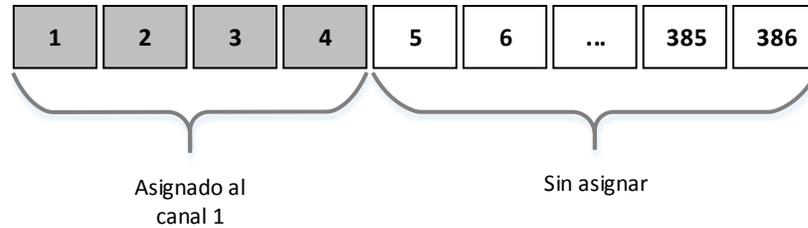


Figura 5-2: Asignación de ranuras para el ancho de banda de un canal

Por lo tanto, conforme a la Figura 5-2, para el canal 1 se han ocupado las primeras 4 ranuras. Esto quiere decir que ningún otro canal podrá usar esas mismas ranuras. En el caso de que, al programar (por mero error o a propósito), se asignen las mismas ranuras a otro canal, el nuevo canal tendrá las primeras 4 ranuras y el canal 1 quedará bloqueado. El bloqueo se realiza a consecuencia de que el canal 1 queda indefinido y, por ende, el mismo WSS lo bloquea.

En el caso de que la definición de canales no sea la requerida, ésta se puede rehacer. Para ello, suponiendo que se quieren redefinir canales con un ancho de 75 GHz, cada canal deberá contar con 6 ranuras. Como el total de ranuras disponibles es de 386 (ver Tabla 4-4), entonces se tendrán 64 canales disponibles. De esta manera, el código a introducir es el mostrado en el Listado 5-2.

Listado 5-2: Definición de canales personalizados

```

1 | DCC_1=1: 6; 2=7: 12; 3=13: 18; 4=19: 24; 5=25: 30; 6=31: 36; 7=37: 42; 8=43: 48; 9=49: 54; 10=55: 60; 11=61: 66; 12=67: 72; 13=73: 78; 14=79: 84; 15=85: 90; 16=91: 96; 17=97: 102; 18=103: 108; 19=109: 114; 20=115: 120; 21=121: 126; 22=127: 132; 23=133: 138; 24=139: 144; 25=145: 150; 26=151: 156; 27=157: 162; 28=163: 168; 29=169: 174; 30=175: 180; 31=181: 186; 32=187: 192; 33=193: 198; 34=199: 204; 35=205: 210; 36=211: 216; 37=217: 222; 38=223: 228; 39=229: 234; 40=235: 240; 41=241: 246; 42=247: 252; 43=253: 258; 44=259: 264; 45=265: 270; 46=271: 276; 47=277: 282; 48=283: 288; 49=289: 294; 50=295: 300; 51=301: 306; 52=307: 312; 53=313: 318; 54=319: 324; 55=325: 330; 56=331: 336; 57=337: 342; 58=343: 348; 59=349: 354; 60=355: 360; 61=361: 366; 62=367: 372; 63=373: 378; 64=379: 384
2 | OK

```

Por otra parte, se observa que se pierden dos ranuras (385 y 386) producto del ancho de banda por canal elegido. La línea 2, donde aparece un «OK», indica que el código ha sido cargado con éxito.

Cabe enfatizar que esta definición del plan de canales es respecto a la frecuencia. Para evitar confusiones, las longitudes de onda de los láseres a emplear deben quedar también en frecuencia, o bien, todo en longitud de onda.

### 5.3 Asignación de canales a puertos

En el caso de que el WSS se emplee como un multiplexor, sólo se dispondrán de 9 puertos físicos para que ingresen 9 portadoras ópticas distintas. Por lo tanto, sólo se dispondrán de 9 canales (del total de 64, si se considera la asignación del Listado 5-2) para estos láseres.

Para lograr esto, se emplea el comando «URA», el cual se explica en (3-3).

$$\text{URA } C_n, P_m, A_{dB}; \dots \quad (5-3)$$

De (3-3), se aprecian tres índices, los que son explicados en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Descripción de los índices del comando «URA»

Índice	Significado
$C_n$	Corresponde al número de canal al cual se va a asignar un puerto físico.
$P_m$	Número de puerto físico al que se destinará el canal.
$A_{dB}$	Atenuación que se agregará al canal $C_n$ en decibeles.

Las consideraciones que se deben tomar en cuenta son:

1. Cada canal puede contener sólo un puerto.
2. Un puerto puede contener más de un canal.

El Listado 5-3 enseña cómo se definen los canales a ciertos puertos, usando para ello el comando «URA» presente en la línea 1. La línea 2 muestra la respuesta «OK» del WSS, indicando que no hay error alguno.

Listado 5-3: Definición de canales a puertos usando el comando «URA»

```

1 | URA 1,1,0.0;2,1,0.0;4,2,10.3;10,3,2.6
2 | OK

```

Del Listado 5-3, se da a conocer:

1. Para el canal 1, se asigna el puerto 1. Dicho canal tendrá 0,0 dB de atenuación.
2. Para el canal 2, se asigna el puerto 1. Dicho canal tendrá 0,0 dB de atenuación.
3. Para el canal 4, se asigna el puerto 2. Dicho canal tendrá 10,3 dB de atenuación.
4. Para el canal 10, se asigna el puerto 3. Dicho canal tendrá 2,6 dB de atenuación.

Cabe destacar que el puerto 1 tiene a su disposición dos canales: canal 1 y canal 2. El resto de los puertos que no fueron listados, serán automáticamente bloqueados. Finalmente, para hacer efectiva esta configuración, se debe escribir «RSW». Esto efectuará de inmediato la reconfiguración en el patrón de la pantalla de cristal líquido. En el Listado 5-4 se aprecia la definición de los canales a determinados puertos, más la reconfiguración de la pantalla de cristal líquido del WSS.

Listado 5-4: Definición de canales a ciertos puertos, incluyendo la reconfiguración

```

1 | URA 1,1,0.0;2,1,0.0;4,2,10.3;10,3,2.6
2 | OK
3 | RSW
4 | OK

```

En la línea 3 es donde se escribe el comando «RSW» y la posterior línea 4 es la respuesta del WSS.

## 5.4 Visualización de la configuración respecto a la asignación de canales a puertos

Para conocer la configuración del plan completo actual, se emplea el comando «RRA?». Este comando desplegará toda la información de los canales disponibles, acorde al plan cargado usando «DCC». Siguiendo con el plan de configuración que se ha estado mostrando, la respuesta es mostrada en el Listado 5-5.

Listado 5-5: Visualización del plan actual

```

1 RRA?
2 1,1,0.0;2,1,0.0;3,99,99.9;4,2,10.3;5,99,99.9;6,99,99.9;7,99,99.9;8,99,99.9;9,99,99.
9;10,3,2.6;11,99,99.9;12,99,99.9;13,99,99.9;14,99,99.9;15,99,99.9;16,99,99.9;17,99,
99.9;18,99,99.9;19,99,99.9;20,99,99.9;21,99,99.9;22,99,99.9;23,99,99.9;24,99,99.9;2
5,99,99.9;26,99,99.9;27,99,99.9;28,99,99.9;29,99,99.9;30,99,99.9;31,99,99.9;32,99,9
9.9;33,99,99.9;34,99,99.9;35,99,99.9;36,99,99.9;37,99,99.9;38,99,99.9;39,99,99.9;40
,99,99.9;41,99,99.9;42,99,99.9;43,99,99.9;44,99,99.9;45,99,99.9;46,99,99.9;47,99,99
.9;48,99,99.9;49,99,99.9;50,99,99.9;51,99,99.9;52,99,99.9;53,99,99.9;54,99,99.9;55,
99,99.9;56,99,99.9;57,99,99.9;58,99,99.9;59,99,99.9;60,99,99.9;61,99,99.9;62,99,99.
9;63,99,99.9;64,99,99.9;
3 OK

```

De esta manera, los valores que están resaltados corresponden a la definición de canales para ciertos puertos, indicada en el Listado 5-4. La primera línea es el ingreso del comando «RRA?», el cual pregunta al WSS su configuración actual. Las líneas 2 y 3 son las respuestas que entrega el dispositivo, donde la última línea da a entender que está correcta la aplicación del plan, mediante un «OK».

## 5.5 Bloqueo por puerto y bloqueo por atenuación

Cada vez que se inicializa el WSS, éste carga la configuración de fábrica (si es que no tiene una configuración personalizada ya almacenada). Dicha configuración indica que todos los canales están bloqueados por canal y por atenuación.

### Bloqueo por puerto [24]

El WSS tiene cargado en su memoria el número de puertos con el que vino instalado de fábrica. En el caso de la PUCV, el WSS adquirido es un 1x9, por lo que sólo posee 9 puertos disponibles. Siguiendo esta línea, si se quisiera asignar un canal a un puerto inexistente (desde el puerto 10 en adelante), la consola arrojará un error. Sin embargo, si este puerto es equivalente a «99», implica que el canal está bloqueado por puerto.

### Bloqueo por atenuación [24]

El WSS permite efectuar una atenuación a cada uno de sus canales. Un canal sin atenuación posee un valor de «0.0», equivalente a 0 dB. No obstante, si dicho canal posee un valor de atenuación equivalente a «99.9», implica que dicho canal está bloqueado por atenuación. Si el canal tiene un

puerto válido y (el canal) se bloquea por atenuación, se dice que ese canal está actuando como WB<sup>19</sup> [7].

### 5.6 Guardar las configuraciones

Con el propósito de no tener que volver a cargar los datos de los puntos 5.2 y 5.3, se pueden guardar dichas configuraciones empleando el comando «STR». Este comando permite guardar las modificaciones realizadas en la memoria no volátil de manera que, si se quita la alimentación del WSS, éste podrá conservar los datos cargados.

Finalmente, la información presente de este capítulo muestra la metodología, paso a paso, de cómo configurar el WSS para un plan determinado por el usuario. Además, en caso de que el usuario defina un plan distinto, debe definir, preferiblemente, todos los canales disponibles para aprovechar las ranuras disponibles.

---

<sup>19</sup> WB es *Wavelength Blocker* o un bloqueador de longitudes de onda.

## 6 Experiencias propuestas

En el presente capítulo se presentan las experiencias diseñadas para este laboratorio. En total, se disponen de cinco experiencias prácticas, las cuales corresponden a guías para el profesor. En los anexos, se adjuntan las guías para los alumnos.

### 6.1 Experiencia 1: Conociendo al WSS flexible (guía profesor)

Un plan de canales corresponde a una división del espectro. Esta división tiene el nombre de FSU (*Frequency Slot Unit*), cuyo valor mínimo es de 12,5GHz. Para establecer un plan de canales, primero es necesario asignar un ancho espectral para cada canal. Una forma simple es la de dejar todos los canales con un mismo ancho. El usuario podrá establecer anchos que sean múltiplos de esta frecuencia, como: 12,5 GHz, 25 GHz, 37,5 GHz, 50 GHz, 62,5 GHz, 75 GHz, etc.

#### Objetivos

- Medir la frecuencia portadora entregada por un transceptor SFP, que genera una portadora óptica.
- Aprender a establecer un plan de canales en el WSS.
- Conocer límites para recepción de potencia óptica del WSS.

#### Elementos a utilizar

- OSA
- *Patch chord* ópticos y adaptadoresg
- Transceptor SFP (canal 41 y canal 59)
- Conversor ethernet-óptico
- Atenuador óptico (opcional)

#### Esquema a implementar

El esquema a implementar para la primera parte de esta experiencia es el que se muestra en la Figura 6-1. Se aprecia que el transceptor SFP va directamente conectado al OSA. Cabe destacar que dicho láser debe ser DWDM de banda C para que pueda funcionar adecuadamente con el WSS.

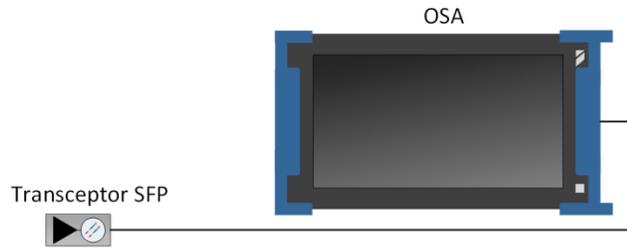


Figura 6-1: Esquema para caracterizar un láser sin atenuador

Sin embargo, puede darse el caso de que no sea posible realizar la conexión directa, debido a la limitante de potencia óptica de entrada del instrumento de medición (OSA). Bajo esta situación, se recomienda conectar entre el transceptor SFP y el OSA un atenuador óptico variable, como se indica en la Figura 6-2. Esto permitirá no estropear el instrumento de medición y lograr ubicar la frecuencia del transceptor SFP.

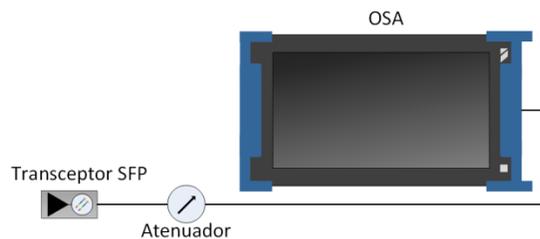


Figura 6-2: Esquema para caracterizar un láser con atenuador

## Desarrollo

Para el desarrollo de esta experiencia, se emplea un *transceiver* SFP, un conversor Ethernet-óptico, un atenuador óptico, el O.S.A. y un WSS. Esto con el fin de aprender a utilizar el instrumento de medición con sus distintas configuraciones y lograr establecer un plan de canales con el que se desarrollarán experiencias futuras.

## Conocimiento previo

- Conocimiento técnico del O.S.A: rango espectral y umbrales de medición.
- Conocimiento funcional del O.S.A: uso del modo de adquisición *Single* y cambio de banda espectral de medición (usar longitud de onda o frecuencia).
- Conocimiento técnico de los *transceivers* SFP: longitudes de onda y potencia de salida.

## Instrucciones generales del trabajo práctico

- Realizar conexión entre un *transceiver* SFP y el O.S.A. directamente o utilizando elementos de atenuación de potencia óptica.
- Obtener mediciones de potencia óptica y ancho de banda utilizando distintos modos de adquisición disponibles en el O.S.A.

- Repetir utilizando otro *transceiver* SFP de misma longitud de onda y observar diferencias.
- Insertar atenuador (fijo o variable) y repetir mediciones.
- Al momento de caracterizar los láseres, elaborar una planilla en una hoja de cálculo, mostrando la separación espectral escogida por el estudiante y dónde se deberá ubicar el láser (respecto a la frecuencia).
- Realizar cargado de información al WSS para el plan de canales, apoyándose de una planilla de cálculos.
- Habilitar un canal arbitrario, medir potencia óptica del transceptor SFP y medir el piso de ruido del WSS con el OSA.

### Resultados esperados

En la Figura 6-3 se muestra una captura del O.S.A. con la medición del láser emitido desde el transceptor SFP. En ella, se puede observar que el láser tiene una pérdida de 1,6dB. El valor en sí es cercano a la potencia que indica el fabricante (0dBm). Además, el umbral de ruido del mismo láser no sobrepasa los -50dBm.

Los parámetros a considerar para la caracterización del láser, se hallan en el recuadro inferior de la Figura 6-3. Allí, se enseñan los valores de las mediciones de frecuencia (THz), potencia óptica (dBm), OSNR (dB), ruido (dBm), ancho de banda a 3dB y otro ancho de banda para una atenuación mayor. Este último punto, el usuario puede interactuar con la interfaz para variarlo acorde a su necesidad.

Además, el alumno debe ser capaz de ubicar la frecuencia de los láseres según la separación espectral elegida. Si dicha separación es de 50 GHz, entonces al momento de caracterizar uno de los láseres deberá obtener un valor similar al que se muestra en la Tabla 6-1, acorde al valor de frecuencia medido en la Figura 6-3. En este caso, se debe tomar como referencia el puerto 92 para el transceptor SFP C59.

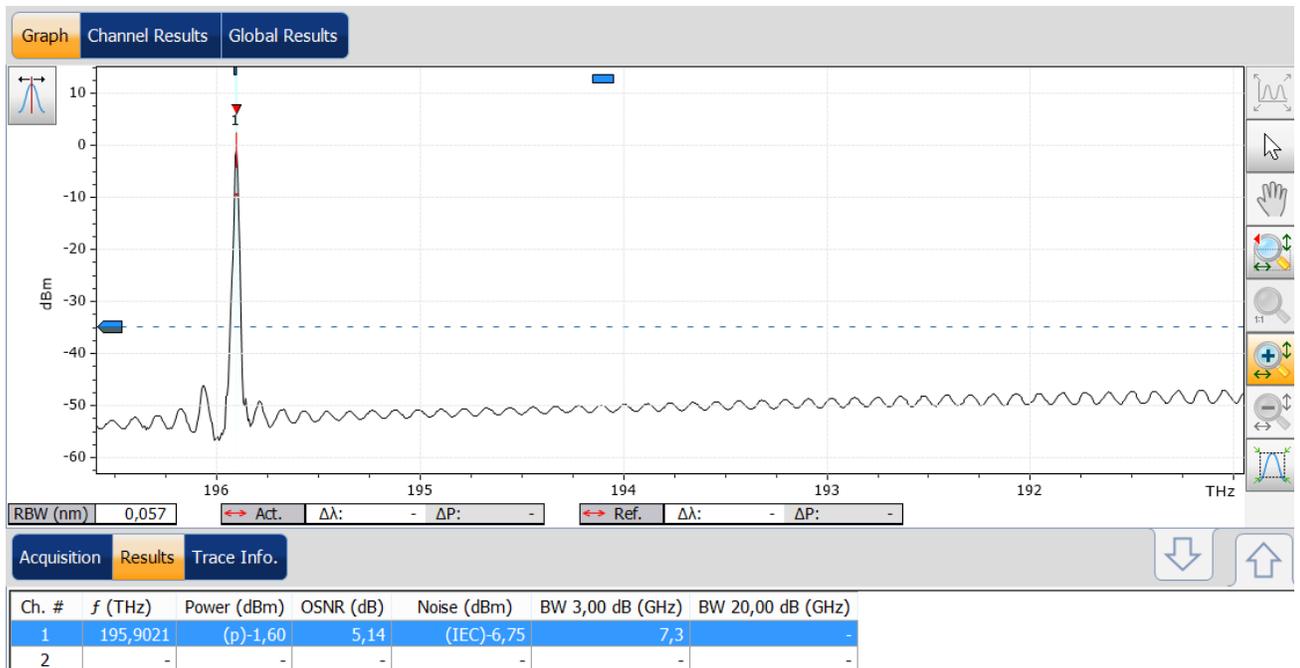


Figura 6-3: Resultados esperados de medición para un láser

Tabla 6-1: División de frecuencias respecto a las frecuencias de los láseres medidos

Frecuencia de ranura elegida <sup>20</sup>	Frecuencia del láser medido
THz	THz
191,3000	-
191,3500	-
⋮	⋮
195,9000	<b>195,9021 ← Láser medido</b>
⋮	⋮
196,1000	-

Para la habilitación de los canales en el WSS, el alumno deberá crear en una planilla de datos, la secuencia de todos los FSU acorde a la frecuencia de separación elegida. Acorde a lo que se aprecia en la Figura 6-4, la columna A indica el número de canal (para este caso, hasta 96 canales por tener una separación de 50 GHz). La columna B define el número de FSU a usarse para dicho canal. La columna C da a conocer el FSU inicial, la columna D es el rango, la columna E es el FSU final y la columna F es la separación requerida para que el

<sup>20</sup> Para esta tabla, se usa como ejemplo una separación de 50 GHz

WSS interprete correctamente esa parte del comando. Cabe mencionar que la última fila NO debe ir «;» para evitar errores. Posteriormente, se emplea el comando CONCATENATE o CONCATENAR según sea el idioma de la versión de EXCEL empleada. Finalmente, para tener todos los valores correctamente escritos, es recomendable dirigirse a la última fila con valores de la columna H, copiar y pegar en otra celda sólo los valores, tal como se muestra en la Figura 6-5.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	1 =		1 :		4 ;		1=1:4;	1=1:4;	1=1:4;
2	2 =		5 :		8 ;		2=5:8;	E(H1;G2)	1=1:4;2=5:8;
3	3 =		9 :		12 ;		3=9:12;	1=1:4;2=5:8;	1=1:4;2=5:8;3=9:12;
4	4 =		13 :		16 ;		4=13:16;	1=1:4;2=5:8;	1=1:4;2=5:8;3=9:12;4=13:16;

Figura 6-4: Ejemplo de tabla con celdas concatenadas para simplificación de escritura

93	93 =		369 :		372 ;		93=369:372;	1=1:4;2=5:8;1=
94	94 =		373 :		376 ;		94=373:376;	1=1:4;2=5:8;1=
95	95 =		377 :		380 ;		95=377:380;	1=1:4;2=5:8;1=
96	96 =		381 :		384		96=381:384	1=1:4;2=5:8;1=
97								
98								
99								
100								
101								

Figura 6-5: Ejemplo de pegado con opción «sólo valores»

Para preparar el archivo a cargar en el WSS, se sugiere abrir un archivo de texto y dejarlo como se muestra en la Figura 6-6. De esta forma, se le indica al WSS cuál es la configuración de canales con la que se trabajará. No obstante, este archivo debe ser cargado desde la terminal para evitar escribir comandos extensos donde es fácil equivocarse.

```

1 DCC
1=1:4;2=5:8;3=9:12;4=13:16;5=17:20;6=21:24;7=25:28;8=29:32;9=33:36;10=37:40;
11=41:44;12=45:48;13=49:52;14=53:56;15=57:60;16=61:64;17=65:68;18=69:72;19
=73:76;20=77:80;21=81:84;22=85:88;23=89:92;24=93:96;25=97:100;26=101:104;27
=105:108;28=109:112;29=113:116;30=117:120;31=121:124;32=125:128;33=129:132;
34=133:136;35=137:140;36=141:144;37=145:148;38=149:152;39=153:156;40=157:16
0;41=161:164;42=165:168;43=169:172;44=173:176;45=177:180;46=181:184;47=185:
188;48=189:192;49=193:196;50=197:200;51=201:204;52=205:208;53=209:212;54=21
3:216;55=217:220;56=221:224;57=225:228;58=229:232;59=233:236;60=237:240;61=
241:244;62=245:248;63=249:252;64=253:256;65=257:260;66=261:264;67=265:268;6
8=269:272;69=273:276;70=277:280;71=281:284;72=285:288;73=289:292;74=293:296
;75=297:300;76=301:304;77=305:308;78=309:312;79=313:316;80=317:320;81=321:3
24;82=325:328;83=329:332;84=333:336;85=337:340;86=341:344;87=345:348;88=349
:352;89=353:356;90=357:360;91=361:364;92=365:368;93=369:372;94=373:376;95=3
77:380;96=381:384
2
    
```

Figura 6-6: Ejemplo de cómo se visualiza el código para cargarlo en la terminal

Después, se debe iniciar el software Tera Term en el PC, donde de inmediato se abrirá una ventana y se debe seleccionar el puerto serial COM1 que está disponible, como aparece en la Figura 6-7.



Figura 6-7: Selección puerto de comunicación del PC

Luego, se deberá cargar la configuración de la terminal que contiene información respecto a la comunicación entre el PC y el WSS como se aprecia en la Figura 6-8 y Figura 6-9. Es preferible realizar esta acción cada vez que se inicie el software para evitar tener que cargar los datos uno mismo.

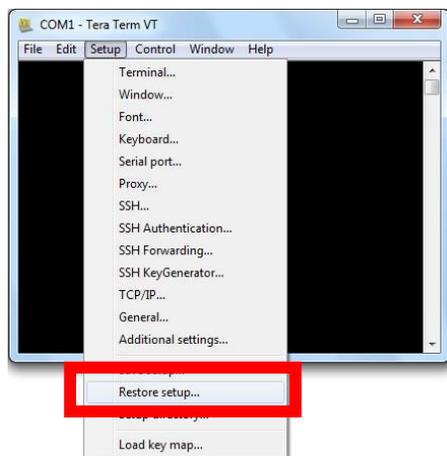


Figura 6-8: Selección de setup para el WSS

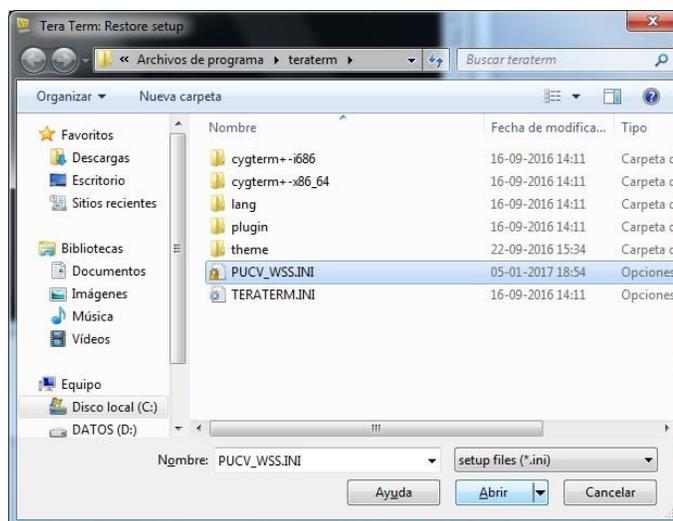


Figura 6-9: Archivo con la configuración lista para usar el terminal

Finalmente, para el cargado de los comandos y ejecución de los mismos, debe dirigirse a «File-Send file...» y seleccionar el archivo a cargar, dependiendo del directorio de dónde se encuentre, tal como se muestra en la Figura 6-10 y Figura 6-11.

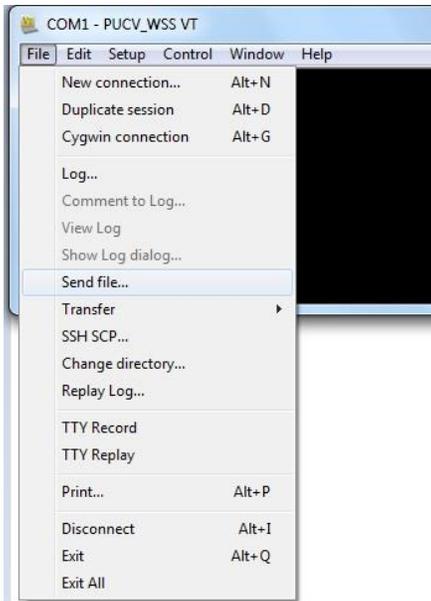


Figura 6-10: Cargado de comandos para un trabajo más rápido

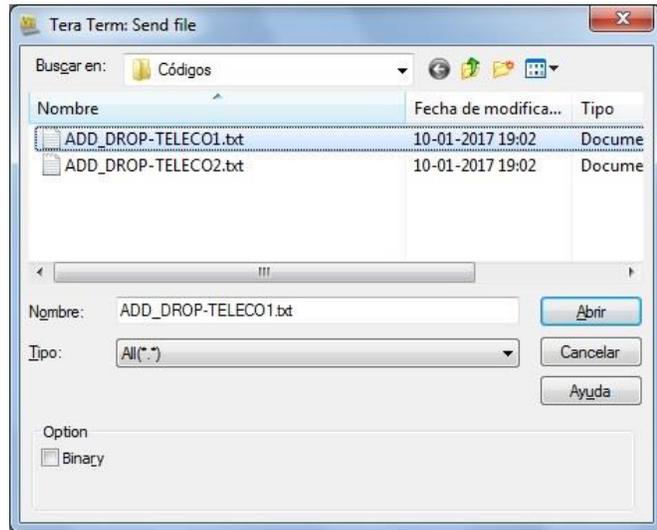


Figura 6-11: Ejemplo de selección de configuración

### 6.2 Experiencia 2: MUX + filtrado (guía profesor)

Un multiplexor convencional es un dispositivo que acepta ciertas longitudes de onda como entrada y las agrupa todas por una única salida. En el caso del WSS, éste tiene la ventaja de aceptar cualquier láser en sus entradas, siempre y cuando sean todos de frecuencias distintas y pertenezcan a la banda óptica C. En caso de existir dos láseres de igual frecuencia que incidan por distintos puertos, el mismo WSS permitirá el paso de una mientras bloquea la otra con el fin de evitar una colisión. Con esto claro, se debe retomar la experiencia anterior que permite caracterizar los láseres, establecer un plan de canales y controlar el puerto de entrada/salida del WSS flexible.

#### Objetivos

- Habilitar los canales ópticos a usar, acorde a las frecuencias de los láseres y el plan de canales ya establecido en la experiencia anterior.
- Comprobar límites de potencia óptica tanto a la entrada como a la salida del WSS.
- Aprender a atenuar y/o filtrar un determinado láser incidente.
- Comprobar el funcionamiento adecuado del WSS flexible como multiplexor.

#### Elementos a utilizar:

- 3 módulos ethernet-ópticos
- 3 transceptores SFP
- *Patch chord* ópticos (los necesarios)
- 1 OSA
- 1 WSS flexible
- 1 PC

#### Esquema a implementar

Para esta segunda experiencia, el esquema a implementar es el mostrado en la Figura 6-12 y en la Figura 6-13. Allí se logran apreciar 3 transceptores SFP (1530nm, 1544nm y 1550nm). De esta manera, cada conjunto va conectado en alguno de los 9 puertos disponibles. En este caso, se eligieron los tres primeros. Además, se debe incluir la conexión serial entre el WSS y el PC para poder realizar la habilitación de los canales y puertos. Finalmente, el OSA es conectado en el puerto común del WSS para visualizar los tres canales multiplexados.

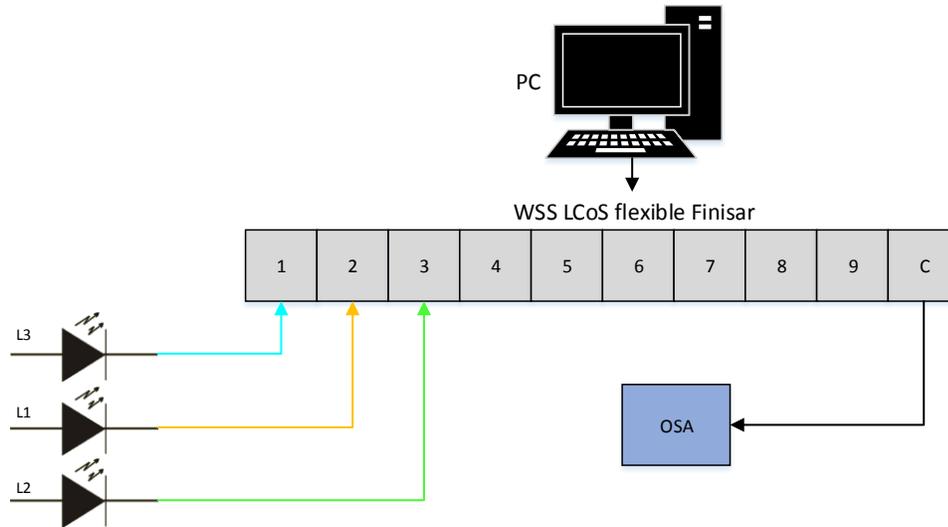


Figura 6-12: Esquema a implementar para experiencia 2

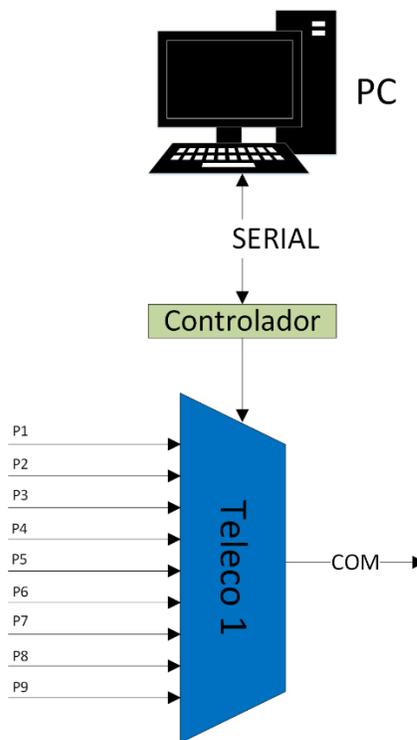


Figura 6-13: Esquema experiencia

## Desarrollo

Para el desarrollo de esta experiencia, se emplean tres *transceiver* SFP, tres conversores Ethernet-óptico, tres atenuadores ópticos, el O.S.A, un computador y un WSS flexible. La finalidad de esta

experiencia es aprender a configurar el WSS, usando un computador con su interfaz de consola, y hacerlo funcionar como un MUX. Además, la configuración que se ha de realizar en el WSS flexible sigue los mismos pasos que los ya descritos en la experiencia anterior. Es decir, caracterizar los láseres, posteriormente crear una planilla de cálculos donde se puedan encontrar las frecuencias de los láseres empleados, copiar dicha información en un archivo \*.txt y finalmente cargar todos estos datos en el software Tera Term. De esta manera se podrán realizar los cambios que se estimen convenientes acordes a la experiencia.

### Conocimiento previo

- Conocimiento técnico del O.S.A.: rango espectral y umbrales de medición.
- Conocimiento funcional del O.S.A.: uso del modo de adquisición *Single* y cambio de banda espectral de medición (usar longitud de onda o frecuencia).
- Conocimiento técnico de los *transceivers SFP*: longitudes de onda y potencia de salida.
- Conocimiento del lenguaje de programación para configurar el WSS, tanto para programar este dispositivo para establecer un plan de canales como para habilitar los canales correspondientes a la frecuencia de los láseres a emplear.

### Instrucciones generales del trabajo práctico

- Conectar el cable serial entre el WSS «Teleco 1» y un computador con puerto serial.
- Abrir la consola del computador, empleando el software Tera Term y cargar la configuración para poder usarlo.
- Cargar en el terminal el plan de canales elegido por el usuario.
- Habilitar los canales correspondientes a los láseres a emplear, indicando cuál será el puerto por el que ingresará.
- Conectar el OSA en el puerto común del WSS.
- Realizar las conexiones entre los transceptores SFP a los puertos del WSS previamente configurados.
- Obtener mediciones de potencia óptica de la salida multiplexada empleando el OSA.
- Repetir las mediciones, pero esta vez agregando atenuación a alguno de los láseres.
- Repetir las mediciones, pero esta vez filtrando alguno de los láseres (realizando bloqueo por canal).

### Resultados esperados

En la Figura 6-14 se presentan las frecuencias de los tres láseres empleados disponibles en el laboratorio. De esta manera, al ver dichas frecuencias agrupadas, se concluye que la experiencia ha sido realizada con éxito.

Además, cada láser está conectado por un *splitter* (del cual se aprovecha el 90% de la potencia óptica real), las potencias ópticas para los tres casos disminuyen. Así, para el láser de canal C59, su potencia óptica es de -6,8dBm; para el láser C41, su potencia óptica es de -5,53dBm. Finalmente, para el láser de 1550nm (aproximadamente C33, por ser CWDM), su potencia óptica es de -11,62dBm.

Para realizar habilitaciones y atenuaciones en cada uno de los canales correspondientes, se deben emplear los comandos del Listado 6-1 en negrita:

Listado 6-1: Comandos a emplear para habilitar o no canales

```

1  URA 1,1,0.0;2,1,0.0;4,2,0.0
2  OK
3  RSW
4  OK
    
```

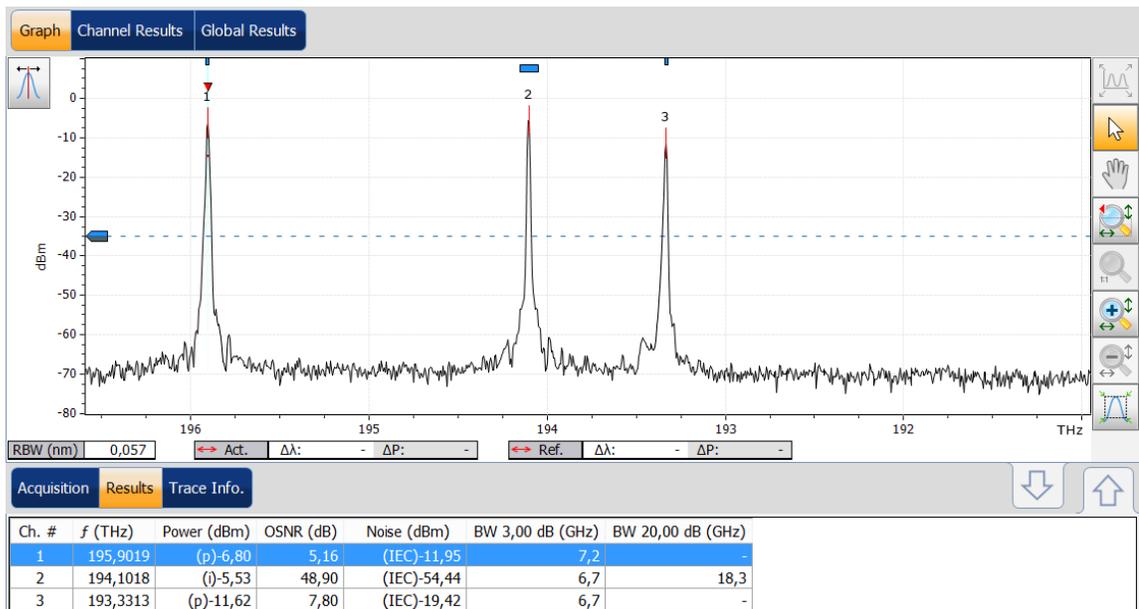


Figura 6-14: Resultado esperado para la experiencia

### 6.3 Experiencia 3: DEMUX + filtrado (guía profesor)

Un demultiplexor convencional es un dispositivo que acepta ciertas longitudes de onda agrupadas como entrada y las separa, cada una, en una salida. En el caso del WSS flexible, éste tiene la ventaja de aceptar cualquier láser en sus entradas, siempre y cuando sean todos de frecuencias distintas y pertenezcan a la banda óptica C. Con esto claro, se debe retomar la experiencia 1 y 2 que permite caracterizar los láseres y configurar el WSS flexible de modo que permita realizar la función inversa de un multiplexor.

#### Objetivos

- Habilitar los canales ópticos a usar, acorde a las frecuencias de los láseres y el plan de canales ya establecido en la experiencia 1.
- Comprobar límites de potencia óptica tanto a la entrada como a la salida del WSS.
- Aprender a atenuar y/o filtrar un determinado láser incidente.
- Comprobar el funcionamiento adecuado del WSS flexible como demultiplexor.

#### Elementos a utilizar

- 3 módulos ethernet-ópticos
- 3 transceptores SFP
- *Patch chord* ópticos (los necesarios)
- 1 OSA
- 1 WSS flexible
- 1 PC

#### Esquema a implementar

Para esta tercera experiencia, el esquema a implementar es el mostrado en la Figura 6-15 y Figura 6-16. En la Figura 6-15 se logra apreciar la señal multiplexada ingresando por el puerto común del WSS. También se requiere de un PC que esté conectado por puerto serial con el WSS «Teleco 1», como se indica en la Figura 6-16. Finalmente, se requiere del instrumento de medición, O.S.A, el que va conectado en alguno de los nueve puertos previamente habilitados, para visualizar el demultiplexado.

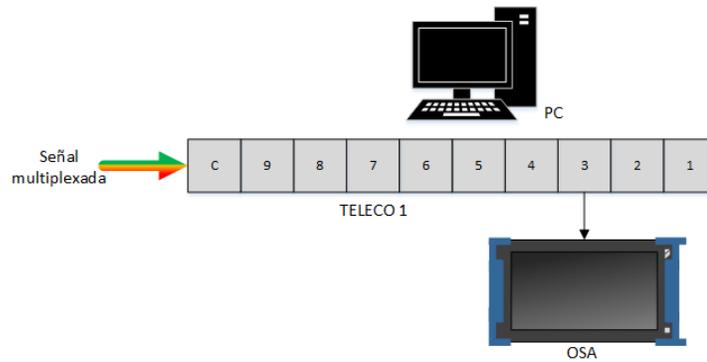


Figura 6-15: Esquema a implementar para experiencia 3

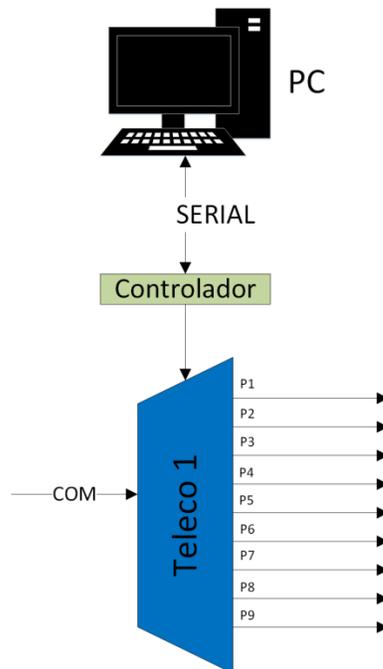


Figura 6-16: Esquema experiencia

## Desarrollo

Para el desarrollo de esta experiencia, se emplean tres *transceivers* SFP, tres conversores Ethernet-óptico, el O.S.A, un computador y un WSS flexible. La finalidad de esta experiencia es aprender a configurar el WSS flexible, usando un computador con su interfaz de consola, y hacerlo funcionar como un DEMUX, realizando bloqueos por canal y atenuaciones.

## Conocimiento previo

- Conocimiento técnico del O.S.A.: rango espectral y umbrales de medición.
- Conocimiento funcional del O.S.A.: uso del modo de adquisición *Single* y cambio de banda espectral de medición (usar longitud de onda o frecuencia).

- Conocimiento técnico de los *transceivers SFP*: longitudes de onda y potencia de salida.
- Conocimiento del lenguaje de programación para configurar el WSS, tanto para programar este dispositivo para establecer un plan de canales como para habilitar los canales correspondientes a la frecuencia de los láseres a emplear.

### Instrucciones generales del trabajo práctico

- Conectar el cable serial entre el WSS «Teleco 1» y un computador con puerto serial.
- Abrir la consola del computador, empleando el software Tera Term y cargar la configuración para poder usarlo.
- Cargar en el terminal el plan de canales elegido por el usuario.
- Habilitar los canales correspondientes a los láseres a emplear, indicando cuáles serán los puertos por los que saldrán.
- Conectar el OSA en alguno de los 9 puertos donde saldrá la señal demultiplexada del WSS.
- Realizar las conexiones entre los transceptores SFP a los puertos del WSS previamente configurados.
- Obtener mediciones de potencia óptica de la salida demultiplexada empleando el OSA.
- Repetir las mediciones, pero esta vez agregando atenuación a alguno de los canales de salida.
- Repetir las mediciones, pero esta vez filtrando alguno de los láseres (realizando bloqueo por canal).

### Resultados esperados

Al haber una separación de los canales entrantes por el puerto común hacia otros puertos previamente configurados, el resultado es el que se aprecia en la Figura 6-17. De esta manera, se aprecia claramente que se trata del canal C41 (194.1THz) y que posee una atenuación de 5.54dBm.

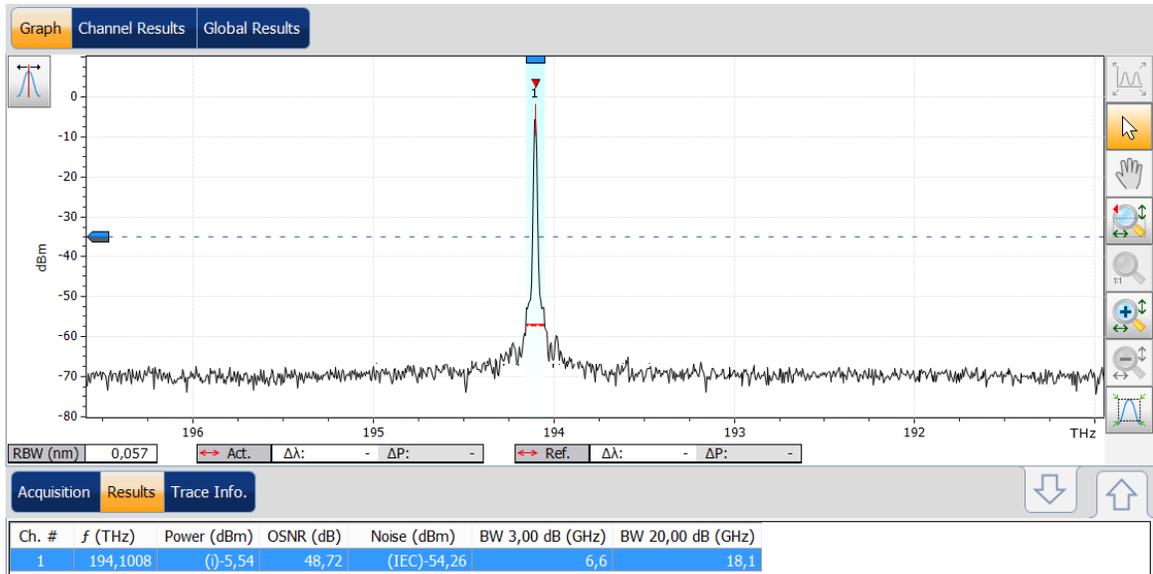


Figura 6-17: Resultado esperado para experiencia 3

## 6.4 Experiencia 4: Conmutador óptico 9x9 (guía profesor)

Un conmutador óptico es un dispositivo que permite intercambiar los puertos de salida de dos o más longitudes de onda que ingresan a este. El caso más simple es el conmutador en base a MEMS, el cual permite intercambiar el flujo de una fibra óptica. Dicho conmutador, posee dos estados: barra y cruz, los cuales se ilustran en la Figura 6-18 [27]. Como se puede apreciar, cuando hay un estado barra, no existe conmutación. En el otro caso (cruz), ambas fibras ópticas son intercambiadas. En la experiencia del conmutador 9x9 en base a WSS flexible, éste se deberá realizar con dos WSS conectados por sus puertos comunes a un PC para poder realizar las conmutaciones posibles requeridas.

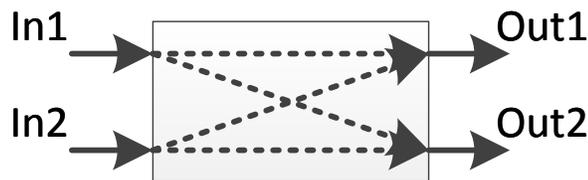


Figura 6-18: Esquema funcional MEMS

### Objetivos

- Habilitar los canales y puertos ópticos de cada WSS, acorde a las frecuencias de los láseres y el plan de canales ya establecido en la experiencia 1.
- Comprobar límites de potencia óptica tanto a la entrada como a la salida del WSS.
- Comprobar el funcionamiento adecuado del WSS como conmutador.

### Elementos a utilizar

- 3 módulos ethernet-ópticos
- 3 transceptores SFP
- *Patch chord* ópticos (los necesarios)
- 1 OSA
- 2 WSS flexibles
- 1 PC

### Esquema a implementar

Para esta cuarta experiencia, el esquema a implementar es el mostrado en la Figura 6-19 y Figura 6-20. En la Figura 6-19 se logran apreciar láseres que ingresan por los puertos 1, 2 y 3. Luego, dichos láseres son multiplexados y enviados desde el puerto común de «Teleco 1» hacia el puerto común de «Teleco 2». Posteriormente, se realiza una demultiplexación en «Teleco 2» de modo que no exista más de un canal por puerto. En la Figura 6-20 se aprecia la conexión del PC con ambos WSS, empleando el puerto serial. El PC a usar deberá tener un solo puerto serial, por lo que cada WSS se configura por separado. Para evitar posibles errores, los WSS flexibles fueron llamados como «Teleco 1» y «Teleco 2», de modo que, al momento de realizar alguna modificación, se deba

ejecutar el comando «MID?» para saber con seguridad qué dispositivo se está modificando. De esta manera, el WSS indicará cuál es su nombre para proceder con su modificación.

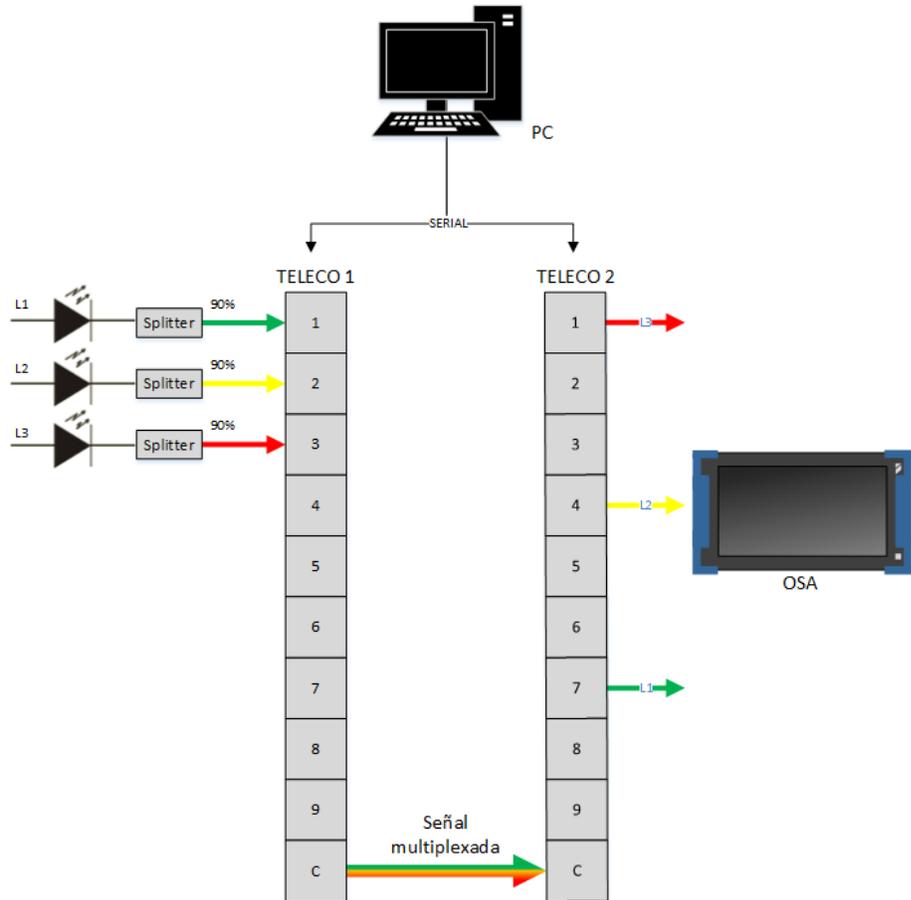


Figura 6-19: Esquema a implementar para experiencia 4

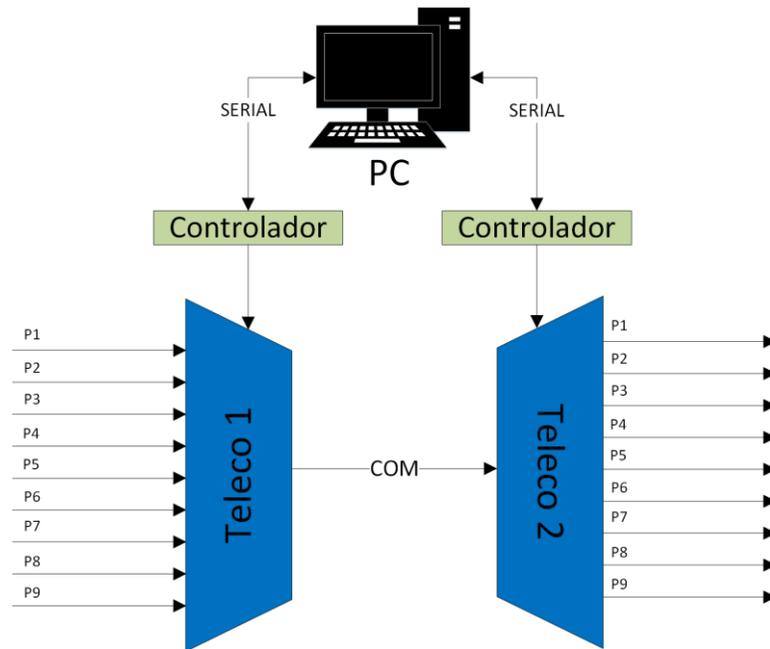


Figura 6-20: Esquema experiencia

## Desarrollo

Para el desarrollo de esta experiencia, se emplean tres transceptores SFP, tres conversores Ethernet-óptico, tres atenuadores ópticos (o en su defecto, tres *splitters*), el O.S.A, un computador con puerto serial y dos WSS. La finalidad de esta experiencia es aprender a configurar ambos WSS, usando un computador con su interfaz de consola, y hacerlo funcionar como un conmutador de 9x9. Los controladores mostrados son parte de los WSS, los cuales sirven como interfaz para poder configurarlos.

## Conocimiento previo

- Conocimiento técnico del O.S.A: rango espectral y umbrales de medición.
- Conocimiento funcional del O.S.A: uso del modo de adquisición *Single* y cambio de banda espectral de medición (usar longitud de onda o frecuencia).
- Conocimiento técnico de los transceptores SFP: longitudes de onda portadora y potencia de salida.
- Conocimiento del lenguaje de programación para configurar el WSS, tanto para programar este dispositivo para establecer un plan de canales como para habilitar los canales correspondientes a la frecuencia de los láseres a emplear.
- Conocimiento de las conexiones a efectuar en los dispositivos para evitar confusiones.

## Instrucciones generales del trabajo práctico

- Conectar el cable serial entre el WSS «Teleco 1» y «Teleco 2» en un computador con puerto serial.

- Abrir la consola del computador, empleando el software Tera Term y cargar la configuración para poder usarlo.
- Cargar en el terminal el plan de canales elegido por el usuario.
- Habilitar los canales correspondientes a los láseres y al WSS a emplear, indicando cuál será el puerto por el que ingresará.
- Conectar los puertos comunes de «Teleco 1» y «Teleco 2» entre ellos mismos.
- Conectar el OSA en alguno de los 9 puertos donde saldrá la señal conmutada («Teleco 2»).
- Realizar las conexiones entre los transceptores SFP a los puertos del WSS «Teleco 1», previamente configurados.
- Obtener mediciones de potencia óptica y ancho de banda de la salida conmutada empleando el OSA.
- Repetir las mediciones, pero esta vez agregando atenuación a alguno de los canales de salida.
- Repetir las mediciones, pero esta vez filtrando alguno de los láseres (realizando bloqueo por atenuación).

### Resultados esperados

En la Figura 6-21 se aprecia el resultado final al conmutar un láser desde «Teleco 1» hacia «Teleco 2», empleando ambos dispositivos como un conmutador. En dicha figura se aprecia que el láser sufre de una atenuación de 10,99dB. También, dentro del recuadro inferior del pantallazo del O.S.A, se aprecian mediciones de: frecuencia (THz), OSNR (dB), ruido (dBm) y anchos de banda para 3dB y 20dB.

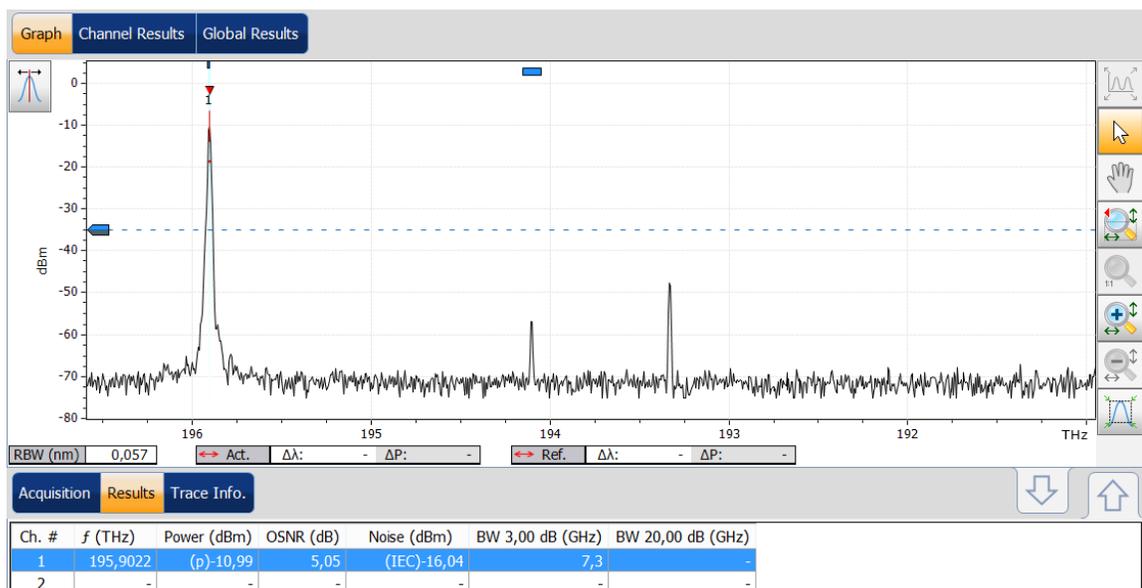


Figura 6-21: Resultado esperado para experiencia

## 6.5 Experiencia 5: Nodo ADD-DROP (guía profesor)

El nodo más simple que puede existir corresponde al de una red anillo unidireccional de grado nodal 2. Éste nodo permite agregar o quitar ciertos FSU (canales asignados) acorde a los requerimientos de dicho punto. A esta acción se le denomina ADD-DROP. Para llevar a cabo esto, la señal que contiene todos los FSU de la línea ingresa por el puerto común de uno de los WSS. Luego, se deja un puerto en común con un segundo WSS para transportar los FSU (canales) que no se han de modificar. Es en la etapa de entrada donde se pueden extraer canales y en la segunda etapa donde se pueden adicionar otros, claro está, distinto de los canales que no se han modificado. Finalmente, todos los FSU (canales asignados) salen por el puerto común del último WSS.

### Objetivos

- Habilitar los canales ópticos a usar, acorde a las frecuencias de los láseres y el plan de canales ya establecido en la experiencia 1.
- Comprobar límites de potencia óptica tanto a la entrada como a la salida del WSS «Teleco 1» y «Teleco 2».
- Aprender a realizar atenuación y/o filtrado para un determinado puerto.
- Aprender a extraer canales asignados (FSU) y a agregarlos.
- Comprobar el funcionamiento adecuado del WSS como nodo ADD-DROP.

### Elementos a utilizar

- 3 módulos ethernet-ópticos
- 3 transceptores SFP
- *Patch chord* ópticos (los necesarios)
- 1 OSA
- 2 WSS flexibles
- 1 PC

### Esquema a implementar

Para esta quinta experiencia, el esquema a implementar es el mostrado en la Figura 6-21 y Figura 6-22. La Figura 6-21 muestra la conexión a realizar entre ambos WSS mientras que la Figura 6-22 da a conocer la conexión de los puertos seriales entre las tarjetas controladoras de ambos WSS con el PC. La señal multiplexada ingresa por el puerto común de «Teleco 1». Luego, se realiza la tarea de DROP, es decir, quitar hasta 8 canales (uno por puerto), manteniendo el resto de las señales que no se van a modificar. Dichas señales ingresarán por otro puerto de «Teleco 2» (puede ser el puerto «P1»), dejando la posibilidad de realizar un ADD o adición de otros láseres. Al igual que en la etapa anterior, se podrán agregar hasta ocho láseres (uno por puerto).

Para esta tarea, se requiere de un PC que esté conectado por puerto serial con ambos WSS. Así, se podrán quitar canales asignados en «Teleco 1» y agregar otros en «Teleco 2». Finalmente, se requiere del instrumento de medición, O.S.A, el que va conectado en el puerto común de «Teleco 2» para verificar el correcto funcionamiento del nodo propuesto.

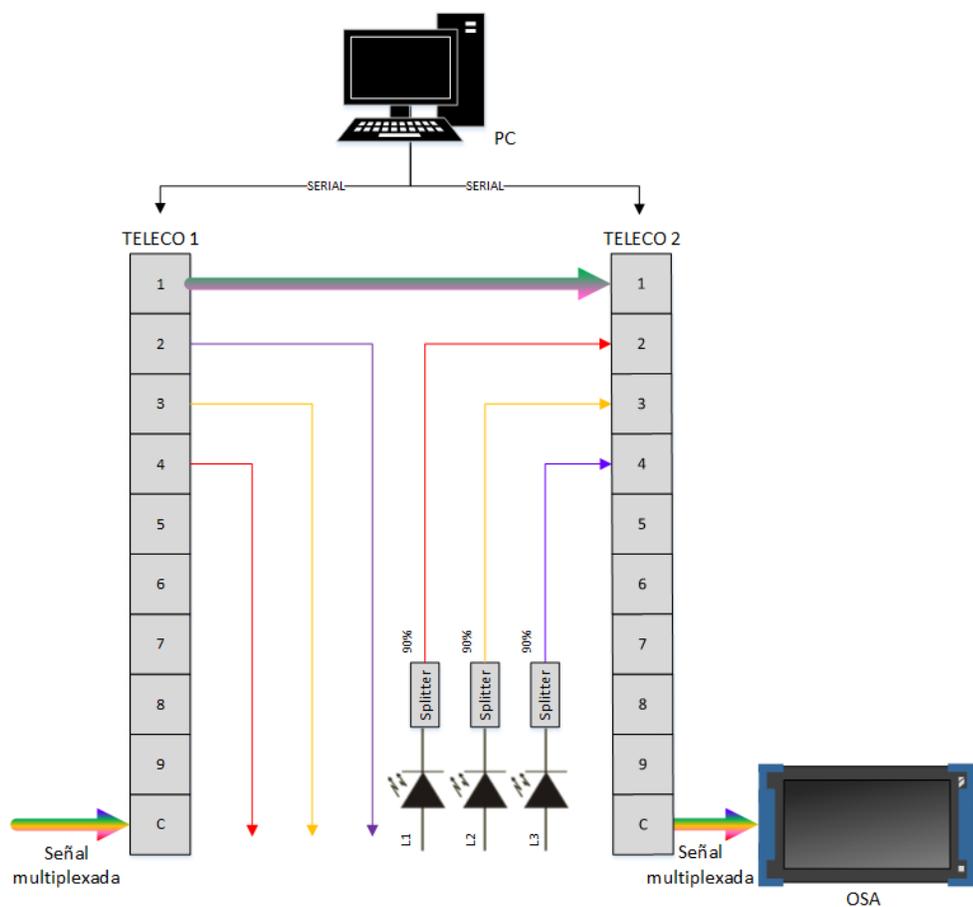


Figura 6-22: Esquema a implementar para experiencia 5

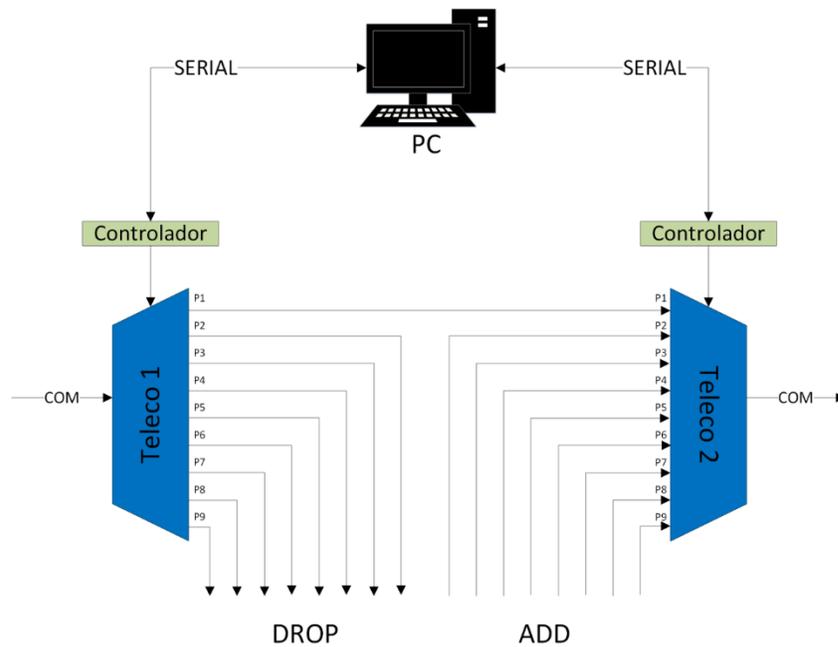


Figura 6-23: Esquema experiencia

## Desarrollo

Para el desarrollo de esta experiencia, se emplean tres transceptores SFP, tres conversores Ethernet-ópticos, *patch chord* ópticos que sean necesarios, el O.S.A, un computador y dos WSS. La finalidad de esta experiencia es aprender a configurar ambos WSS, usando un computador con su interfaz de consola, y hacerlo funcionar como un pequeño nodo ADD-DROP.

## Conocimiento previo

- Conocimiento técnico del O.S.A: rango espectral y umbrales de medición.
- Conocimiento funcional del O.S.A: uso del modo de adquisición *Single* y cambio de banda espectral de medición (usar longitud de onda o frecuencia).
- Conocimiento técnico de los transceptores SFP: longitudes de onda y potencia de salida.
- Conocimiento del lenguaje de programación para configurar el WSS, tanto para programar este dispositivo para establecer un plan de canales como para habilitar los canales correspondientes a la frecuencia de los láseres a emplear.
- Conocimiento técnico del WSS: umbrales de tolerancia.

## Instrucciones generales del trabajo práctico

- Conectar con cable serial los WSS «Teleco 1» y «Teleco 1» a un computador con puerto serial.
- Abrir la consola del computador, empleando el software Tera Term y cargar la configuración para poder usarlo.
- Cargar en el terminal el plan de canales elegido por el usuario.

- Habilitar los canales correspondientes a los láseres a emplear, indicando cuál será el puerto por el que ingresará. CUIDADO CON LA POTENCIA ÓPTICA A TRANSMITIR ENTRE LOS WSS, ya que cada puerto puede soportar hasta 27 dBm de potencia óptica. Transmitir mayor potencia puede dañar estos dispositivos de manera irreversible.
- Conectar el OSA en el puerto común de «Teleco 2» donde saldrá la señal resultante.
- Realizar las conexiones entre los transceptores SFP a los puertos del WSS previamente configurados para «Teleco 2».
- Obtener mediciones de potencia óptica y ancho de banda de la salida, empleando el OSA.
- Repetir las mediciones, pero esta vez agregando atenuación al puerto 1 de «Teleco 1» (donde irá el conjunto de señales que no se modificarán).
- Repetir las mediciones, pero esta vez filtrando alguno de los láseres (realizando bloqueo por atenuación) a modo de DROP y añadiendo otros (ADD) en los respectivos WSS.

### Resultados esperados

En la Figura 6-24 se aprecia la salida de «Teleco 2», considerando como señal que se mantiene, por un puerto «P1» común, al canal C41. Resulta claro, según la imagen en cuestión, cuál es la que se mantiene por la atenuación que tiene. Acorde a la Figura 6-24, el mismo canal posee una atenuación de 5,53dBm. Para este caso, la atenuación cambia hasta los 14,24dB resultando en una atenuación de 8,71dB para ese láser. En los láseres C59 y C33, la atenuación es básicamente por los conectores FC usados, por lo que se considera que está bien.

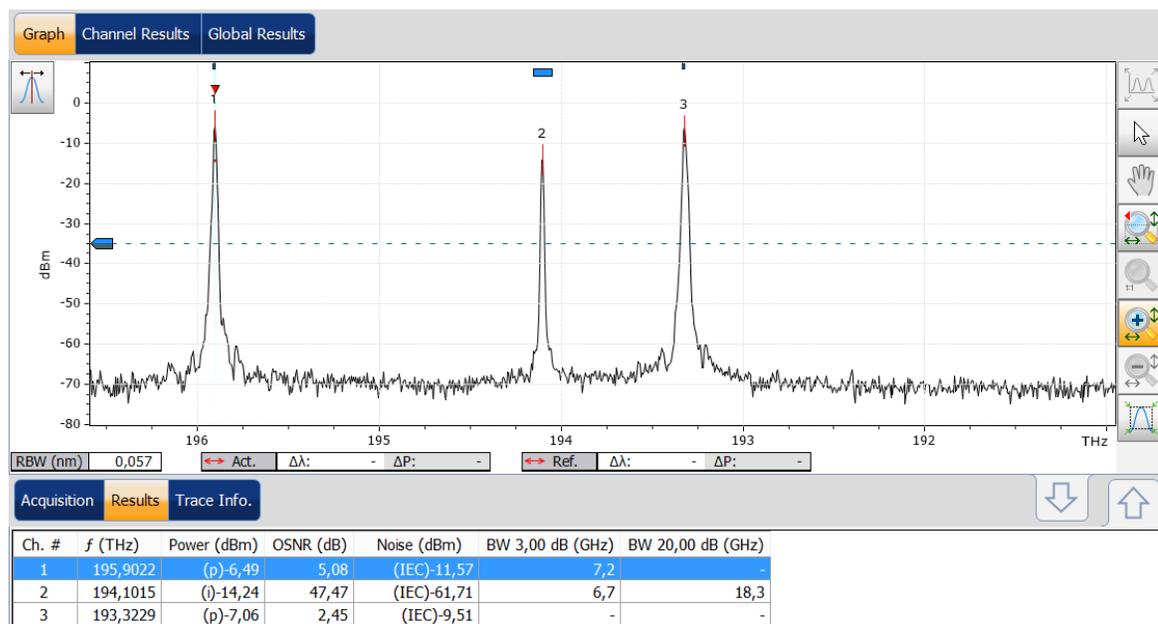


Figura 6-24: Resultados esperados en experiencia 5

## Discusión y conclusiones

Las redes ópticas flexibles son una potencial propuesta para reemplazar la red en rejilla fija, tal como se explica en este documento. De esta manera, al ser una propuesta fuerte, se debe poner énfasis en su enseñanza para que puedan surgir potenciales mejoras en ese aspecto. En el caso de Chile, lamentablemente hay una escasez a nivel de enseñanza en este aspecto, por lo que el presente informe propone una solución respecto a ello: la implementación de experiencias de laboratorio que incluyan a los WSS flexibles basados en LCoS. Así, la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso será pionera, a nivel nacional, en aplicar este tipo de laboratorios.

Comprendiendo la fuerte tendencia a flexibilizar las redes ópticas, es que diversas empresas se han esmerado en desarrollar equipos para la creación de redes flexibles, como es la firma estadounidense FINISAR con sus WSS basados en LCoS. Dentro de las funciones de los equipos, el más importante de comprender es la tecnología LCoS debido a su complejidad y utilidad para lograr la requerida flexibilización.

El WSS adquirido por nuestra casa de estudio (PUCV) posee limitantes físicas, como cualquier dispositivo, que fueron de vital importancia para el desarrollo de las experiencias expuestas. Además, ello conllevó a la confección de un esquema funcional del mismo para que la comprensión de su operación sea más sencilla.

La creación de un esquema funcional es relevante para comprender los límites o capacidades de dicho WSS. Hay que mencionar que este dispositivo no puede funcionar como un splitter, ya que los FSU se asignan acorde a la frecuencia de los láseres. Con este modelo funcional claro, se pueden desarrollar otras formas de conexión usando uno o más WSS.

No obstante, la programación es un punto elemental para lograr que todo lo se conecta con el WSS funcione. Sin embargo, no se emplea ningún lenguaje de programación conocido, mas sólo se usan comandos desde una terminal. Ello implica que la interfaz gráfica que tiene el usuario es nada amigable, provocando que a simple vista no se noten los cambios realizados.

Respecto a las experiencias indicadas, se enseña la metodología, paso a paso, de cómo configurar el WSS para un plan determinado por el usuario. Además, para agilizar la configuración del plan de canales, es preferible realizar una tabla que contenga el número de canales y la frecuencia para un determinado ancho de canal.

Como recomendación, se deben emplear láseres DWDM por la precisión que tienen estos. Cuando se empleó el láser de 1550 nm CWDM, éste presentó un corrimiento en su longitud de onda a medida que transcurría el tiempo y variaba su temperatura.

Para las conexiones más simples, que son MUX y DEMUX, basta con usar un único WSS para ello. El resto depende exclusivamente de la programación, la cual depende de una consola (terminal) de un computador y una conexión serial.

Para las conexiones un poco más complejas, conmutador 9x9 y nodo ADD-DROP, el número de WSS crece a dos. La identificación de estos dispositivos resulta en una parte crítica para evitar malas configuraciones o errores no deseados, como sería la confusión de crear programar un dispositivo cuando en realidad se está programando el otro. Con estas conexiones claras, se procedió a realizar las propuestas de experiencias para el laboratorio de sistemas y redes ópticas flexibles basadas en WSS.

Desde la experiencia 1 a la 3, se trata con la programación básica que será usada por el resto de las experiencias y los dos tipos de conexión más simples que se pueden realizar. Sin embargo, hay que poner énfasis respecto a los límites de potencia ópticos que pueden tolerar los WSS para evitar dañarlos.

Las experiencias 4 y 5 resultan ser más complejas que las anteriores debido a que se usan dos WSS y, además, porque el usuario debe estar pendiente respecto a la potencia óptica que reciben ambos dispositivos. Particularmente, en la experiencia 5, la parte más crítica es cuando se realiza la etapa de ADD, ya que la potencia que se está adicionando, en conjunto con la potencia óptica que ingresa por el puerto 1, debe ser inferior a 27dBm. Una forma de poder lidiar con esto sería agregando una atenuación en el puerto del dispositivo que envía toda la señal multiplexada a su par.

De esta manera, con las experiencias propuestas en este informe, se resuelve el problema de la enseñanza en universidades respecto a las redes y sistemas ópticos flexibles. Además, todo esto resulta ser de utilidad para los estudiantes que les interese el área de telecomunicaciones, específicamente relacionado con fibra óptica. Ello permite un mejor entendimiento del potencial de las redes flexibles y de las ventajas que tendría si se reemplazara por la red de rejilla fija.

Dentro de los principales resultados, se logró realizar con una menor cantidad de componentes un nodo flexible que, si se compara con otros elementos, como los MEMS, resulta en una conexión sumamente compleja al existir muchos elementos interconectados. En el caso de los WSS flexibles, al poder realizar una configuración completamente personalizada, no se requieren de otros elementos que requieran de ciertas longitudes de onda para que funcionen.

Finalmente, como propuesta para trabajos posteriores, se puede desarrollar una interfaz gráfica para el modelo de WSS usado con el propósito de que la interacción con el usuario sea más sencilla y amigable. Para ello, se puede desarrollar un software para sistemas UNIX (preferiblemente Linux). Además, se podría plantear la posibilidad de desarrollar un nodo de

grado nodal superior al mostrado en este informe y realizar pruebas con envío de información comunicando, por ejemplo, algunos puntos de la misma Escuela de Ingeniería Eléctrica (EIE).

# Bibliografía

- [1] «TeleGeography Submarine Cable Map,» PriMetrica, Inc., 13 Abril 2016. [En línea]. Available: <http://www.submarinecablemap.com/>. [Último acceso: 14 Abril 2016].
- [2] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, «Subsecretaría de Telecomunicaciones,» 8 Junio 2006. [En línea]. Available: [http://www.subtel.gob.cl/wp-content/uploads/2016/06/PPT\\_Series\\_MARZO\\_2016\\_V3.pdf](http://www.subtel.gob.cl/wp-content/uploads/2016/06/PPT_Series_MARZO_2016_V3.pdf). [Último acceso: 26 Febrero 2017].
- [3] V. Alwayn, «Pearson Education, Cisco Press,» 23 Abril 2004. [En línea]. Available: <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=170740&seqNum=1>. [Último acceso: 21 Mayo 2017].
- [4] 24horas.cl TVN, «24horas,» 25 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <http://www.24horas.cl>. [Último acceso: 21 Mayo 2017].
- [5] ITU-T, «Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid,» , Geneva, Switzerland, 2012.
- [6] IRO, «IRO Investigación en Redes Ópticas,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.costadigital.cl/teleco/equipamiento.php>. [Último acceso: 20 Abril 2016].
- [7] Y. Sakurai, Y. Hotta, S. Khan, H. Oguri, K. Takeuchi, S. Michihata y N. Uehara, «LCOS-Based Wavelength Blocker Array With Channel-by-Channel Variable Center Wavelength and Bandwidth,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, n° 14, pp. 989-991, 2011.
- [8] A. Matthew, «JDSU,» [En línea]. Available: [www.jdsu.com/test](http://www.jdsu.com/test). [Último acceso: 16 April 2017].

- [9] B. Mukherjee, «WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenges,» *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 18, nº 10, pp. 1810-1824, 2000.
- [10] J. J. Granada Torres, A. M. Cárdenas Soto y N. Guerrero González, «Redes ópticas elásticas: un nuevo paradigma en las futuras redes de telecomunicaciones,» *Respuestas*, vol. 20, nº 1, pp. 6-22, 2015.
- [11] Grupo de Comunicaciones Ópticas, «Tutorial de Comunicaciones ópticas,» Depto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, 2006. [En línea]. Available: [http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema4/tema4\\_4.htm](http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema4/tema4_4.htm). [Último acceso: 13 Abril 2016].
- [12] M. Nalin, R. Sidney, D. Manzani, R. G. Rocha, G. Poirier, F. Castro, C. J. S. de Matos, C. Mendonça, Lg. de Boni, L. Misoguti, O. Malta, Y. Ledemi, S. Messaddeq y Y. Messaddeq, «Materiais Vítreos E Luz: Parte 2,» *Quim. Nova*, vol. 39, nº 3, pp. 340-351, 22 Octubre 2016.
- [13] A. E. Leiva López, «Metodología de evaluación tecno-económica de procesos de migración en redes WDM,» Valparaíso, 2013.
- [14] A. Leiva, N. Pavez, A. Beghelli y R. Olivares, «A Joint RSA Algorithm for Dynamic Flexible Optical Networking,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, nº 11, pp. 3531-3537, 2015.
- [15] P. Rigby, «Engineering and Technology Magazine,» 10 Mayo 2010. [En línea]. Available: <http://eandt.theiet.org/magazine/2010/07/flexing-the-network.cfm>. [Último acceso: 14 Abril 2016].
- [16] F. Corp., «1x9 / 1x20 Flexgrid® Wavelength Selective Switch (WSS),» Sunnyvale, California, 2015.
- [17] E. Otón Martínez, «Adaptative Liquid-Crystal Phase-Only Passive Devices,» Madrid, España, 2013.
- [18] C. Pulikkasereil, L. A. Stewart, M. A. F. Roelens, G. W. Baxter, S. Poole y S. Frisken, «Spectral modeling of channel band shapes in wavelength selective switches,» *Optical Society of America*, vol. 19, nº 9, pp. 8458-8470, 2011.
- [19] Finisar, «Wavelength Selective Switches for ROADM Applications,» Finisar, Sunnyvale, CA, 2013.

- [20] JDSU, «DigChip,» JDS Uniphase Corporation, Noviembre 2006. [En línea]. Available: [http://www.digchip.com/datasheets/download\\_datasheet.php?id=1201973&part-number=MWSWC19100J501](http://www.digchip.com/datasheets/download_datasheet.php?id=1201973&part-number=MWSWC19100J501). [Último acceso: 28 Octubre 2016].
- [21] Cameron, C.; FINISAR, «Product Specification for Wavelength Selective Switch,» FINISAR, California, EEUU, 2014.
- [22] Finisar Corporation, «1x9 / 1x20 Flexgrid® Wavelength Selective Switching,» Finisar, Sunnyvale, California, 2015.
- [23] I. Tomkos, S. Azodolmolky, J. Solé-Pareta, D. Careglio y E. Palkopoulou, «A Tutorial on the Flexible Optical Networking Paradigm: State-of-the-Art, Trends, and Research Challenges,» ResearchGate, Mayo 2014. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/262287740\\_A\\_Tutorial\\_on\\_the\\_Flexible\\_Optical\\_Networking\\_Paradigm\\_State-of-the-Art\\_Trends\\_and\\_Research\\_Challenges](https://www.researchgate.net/publication/262287740_A_Tutorial_on_the_Flexible_Optical_Networking_Paradigm_State-of-the-Art_Trends_and_Research_Challenges). [Último acceso: 27 Octubre 2016].
- [24] P. E. -. S. Engineer, «Spec, Cust, Software Interface, Serial (1.4), WSS, Finisar,» Finisar, Sunnyvale, 2013.
- [25] J. A. Mendoza Sosa, «Diseño y modelado de un conmutador selectivo por longitud de onda para redes ópticas reconfigurables,» Ciudad Universitaria, 2012.
- [26] Finisar, «Programmable narrow-band filtering using the WaveShaper 1000E and WaveShaper 4000E,» California, 2008.
- [27] I. A. Castillo Tolorza, «Experiencias de laboratorio de redes ópticas basadas en interruptores MEMS,» Valparaíso, 2016.

# A Guías de experiencias para alumnos

En el presente apéndice se presentan las guías para los alumnos de las experiencias propuestas en el capítulo 6.

## A.1 Experiencia 1: Conociendo al WSS flexible (guía alumno)

Un plan de canales corresponde a una división del espectro. Esta división tiene el nombre de FSU (*Frecuency Slot Unit*), cuyo valor mínimo es de 12,5GHz. Para establecer un plan de canales, primero es necesario asignar un ancho espectral para cada canal. Una forma simple es la de dejar todos los canales con un mismo ancho. El usuario podrá establecer anchos que sean múltiplos de esta frecuencia, como: 12,5 GHz, 25 GHz, 37,5 GHz, 50 GHz, 62,5 GHz, 75 GHz, etc.

### Elementos a utilizar:

- Módulo ethernet-óptico
- Transceptores SFP
- *Patch chord* ópticos
- OSA
- Atenuador óptico variable (si corresponde)
- WSS flexible 1x9
- Computador con entrada serial

### Esquema a implementar:

A continuación, se presenta el esquema a implementar para el desarrollo de la experiencia (Figura A-1):

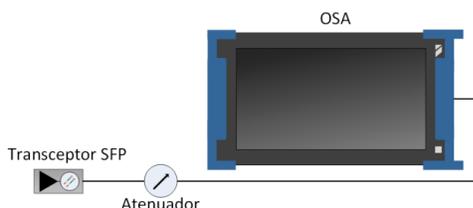


Figura A-1: Esquema a implementar para experiencia 1

### El procedimiento de instalación es el siguiente:

1. Inserte el transceptor SFP dentro del módulo ethernet-óptico.
2. Coloque el módulo que contiene el transceptor SFP, atenuador óptico y OSA sobre la mesa de trabajo.
3. Usando los *patch chord* disponibles, realice una conexión entre el transceptor y el atenuador óptico. Posteriormente, realice una nueva conexión entre el atenuador y el OSA.
4. Encienda el OSA y deje que el software cargue automáticamente.
5. Energice el módulo Ethernet-óptico.
6. Gire la perilla del atenuador de modo que pueda bloquear completamente cualquier láser incidente.
7. Conecte el módulo que contiene al transceptor SFP a la toma de corriente, empleando su transformador correspondiente.

### Mediciones:

1. Una vez seleccionada la banda de frecuencia (o de longitud de onda) a trabajar (bandas L+C) en el OSA, verifique que la longitud de onda o frecuencia concuerden con los valores indicados por el fabricante en el mismo dispositivo.
2. Mida el ruido detectado por el OSA. Indique la media de este valor de forma estimativa.
3. Gire la perilla del atenuador óptico, de manera paulatina, hasta que la potencia óptica sea la máxima tolerada por el OSA. Sugerencia: revisar *datasheet* del OSA para conocer límites de potencia ópticas.
4. Mida la potencia óptica en dBm del transceptor empleado. ¿Concuerdan los valores entregados por el fabricante con los medidos? En caso de que no sea así ¿a qué podría deberse?
5. En caso de que al girar completamente el atenuador óptico, la potencia pueda ser tolerada por el OSA, realice la corrección propuesta en la Figura A-2.

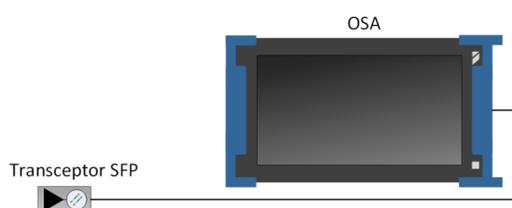


Figura A-2: Modificación de esquema anteriormente implementado

6. Mida la frecuencia de operación del transceptor SFP. ¿Encuentra alguna relación de la frecuencia medida en el OSA con el código empleado por el fabricante en dicho dispositivo?
7. Nuevamente realice mediciones de potencia óptica ¿Hay algún cambio respecto a la medición realizada antes? ¿Qué puede concluir al respecto?
8. Repita las mediciones para distintos canales de los transceptores SFP.

**Establecimiento del plan de canales para el WSS flexible:**

1. Establezca, en una planilla de cálculo, una columna de frecuencia. Cada fila de dicha columna debe tener un múltiplo de 12,5 GHz, 50 GHz, etc. acorde a la separación que Ud. escoja<sup>21</sup>.
2. En la columna siguiente, deberá marcar en la fila correspondiente la frecuencia de los láseres anteriormente medidos.  
Recuerde realizar esta planilla de manera ordenada y hacer los respectivos respaldos. Las futuras experiencias se desarrollarán en base a las mediciones realizadas.
3. Ahora, debe definir el plan de canales que será cargado en el WSS a utilizar. En una nueva hoja de la planilla de cálculo, debe especificar el número total de canales y la correspondiente cantidad de FSU según corresponda. Por ejemplo, si se quiere usar una separación de 50 GHz (equivalente a 4 FSU), se debe tener en consideración la creación de 96 canales de 4 FSU. De esta manera, se sugiere usar la función de «=CONCATENAR» para poder ser más rápido en la creación de una lista como la siguiente:

1=1:4;2=5:8;3=9:12;4=13:16;5=17:20;6=21:24;7=25:28;8=29:32;9=33:36;10=37:40;11=41:44;12=45:48;13=49:52;14=53:56;15=57:60;16=61:64;17=65:68;18=69:72;19=73:76;20=77:80;21=81:84;22=85:88;23=89:92;24=93:96;25=97:100;26=101:104;27=105:108;28=109:112;29=113:116;30=117:120;31=121:124;32=125:128;33=129:132;34=133:136;35=137:140;36=141:144;37=145:148;38=149:152;39=153:156;40=157:160;41=161:164;42=165:168;43=169:172;44=173:176;45=177:180;46=181:184;47=185:188;48=189:192;49=193:196;50=197:200;51=201:204;52=205:208;53=209:212;54=213:216;55=217:220;56=221:224;57=225:228;58=229:232;59=233:236;60=237:240;61=241:244;62=245:248;63=249:252;64=253:256;65=257:260;66=261:264;67=265:268;68=269:272;69=273:276;70=277:280;71=281:284;72=285:288;73=289:292;74=293:296;75=297:300;76=301:304;77=305:308;78=309:312;79=313:316;80=317:320;81=321:324;82=325:328;83=329:332;84=333:336;85=337:340;86=341:344;87=345:348;88=349:352;89=353:356;90=357:360;91=361:364;92=365:368;93=369:372;94=373:376;95=377:380;96=381:384

4. Posteriormente, se debe copiar esta lista en un archivo con extensión \*.txt (con algún nombre significativo), anteponer «DCC» y cargarlo en el software TeraTerm.
5. Con los canales ya cargados, se debe habilitar los que se deseen usar. Una vez elegido el láser a utilizar, debe indicar el puerto de salida de este por el WSS. Éste irá a la entrada del WSS.
6. Con el WSS, compruebe que el láser seleccionado sea visible y nuevamente mida el umbral de ruido. ¿Hay algún tipo de atenuación respecto a la medición realizada sin el WSS?

<sup>21</sup> Como recomendación, establezca una separación de 50 GHz.

## A.2 Experiencia 2: MUX + filtrado (guía alumno)

Un multiplexor convencional es un dispositivo que acepta ciertas longitudes de onda como entrada y las agrupa todas por una única salida. En el caso del WSS, éste tiene la ventaja de aceptar cualquier láser en sus entradas, siempre y cuando sean todos de frecuencias distintas y pertenezcan a la banda óptica C. En caso de existir dos láseres de igual frecuencia que incidan por distintos puertos, el mismo WSS permitirá el paso de una mientras bloquea la otra con el fin de evitar una colisión. Con esto claro, se debe retomar la experiencia anterior que permite caracterizar los láseres, establecer un plan de canales y controlar el puerto de entrada/salida del WSS flexible.

### Elementos a utilizar:

- 3 módulos ethernet-ópticos
- 3 transceptores SFP
- *Patch chord* ópticos (los necesarios)
- 1 OSA
- 1 WSS flexible
- 1 PC
- Atenuador óptico variable (si corresponde)

### Esquema a implementar

Para esta segunda experiencia, el esquema a implementar es el mostrado en la Figura A-3 y en la Figura A-4, donde la primera muestra las conexiones que hay que realizar sólo en el WSS flexible y la segunda la conexión entre el PC y el WSS usando el puerto serial.

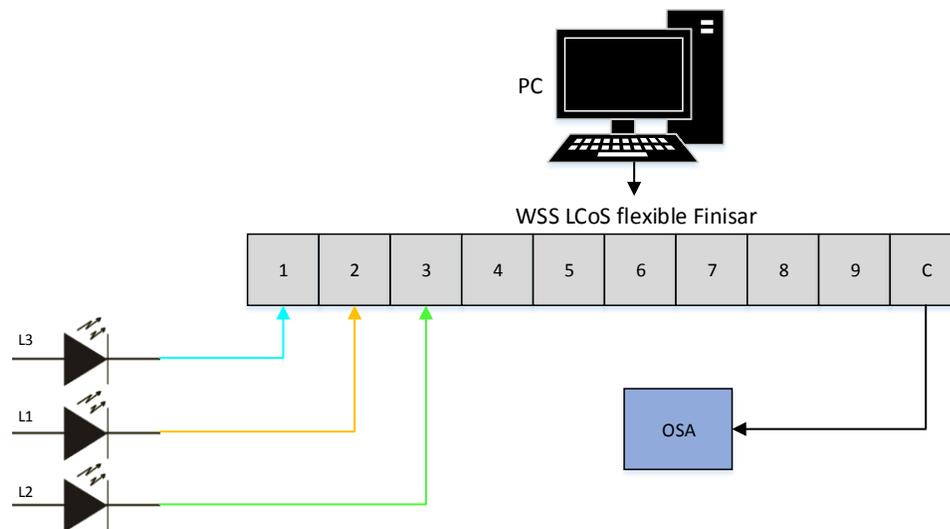


Figura A-3: Esquema a implementar para experiencia 2

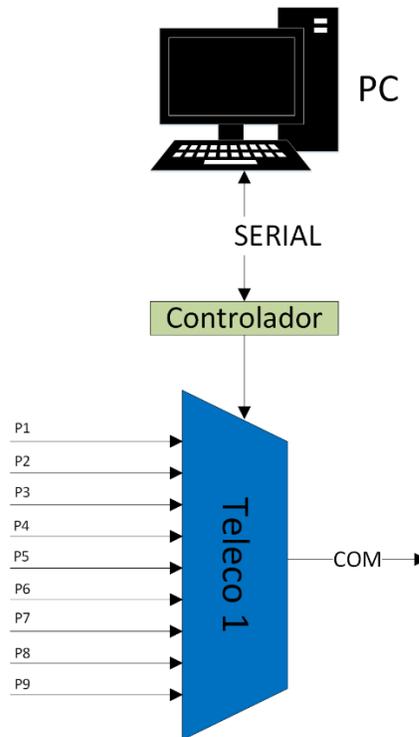


Figura A-4: Esquema experiencia

El procedimiento de instalación es el siguiente:

1. Inserte los transceptores SFP en los módulos ethernet-ópticos (uno por módulo).
2. Coloque los tres módulos ya cargados, junto con el OSA, sobre la mesa de trabajo.
3. Con los *patch chord* disponibles, realice las conexiones mostradas en la Figura A-3.
4. Encienda el OSA y deje que el software cargue automáticamente.
5. Energice los módulos ethernet-ópticos.
6. Usando el software Tera Term, cargar el plan de canales de la experiencia anterior y habilitar los respectivos canales para los láseres empleados.

**Mediciones:**

1. Una vez seleccionada la banda de frecuencia (o de longitud de onda) a trabajar (bandas L+C) en el OSA, verifique que la longitud de onda o frecuencia concuerden con los valores indicados por el fabricante en el mismo dispositivo.
2. Realice la configuración adecuada para que los láseres puedan salir por el puerto común del WSS, de modo que un láser ingrese por el puerto 1 y los restantes ingresen por el puerto 2.
3. Mida la potencia óptica de los tres láseres con el OSA, sin aplicar atenuación mediante la terminal.
4. Aplique una atenuación de 5 dB a el láser que ingresa por el puerto 1 y mida la potencia óptica. ¿La atenuación es correcta? En caso de que no lo sea (o que no haya atenuación) ¿a qué se debe?
5. Realice un bloqueo por canal a cualquiera de los láseres que ingresan por el puerto 2 y comente. Además ¿qué es lo que sucede dentro del dispositivo para que ocurra esto?

6. Con el segundo láser que ingresa por el puerto 2, realice una configuración para que ingrese por el puerto 3 y que tenga una atenuación de 2,5dB. Mida con el OSA la potencia de salida ¿Concuerda con lo que se programó?
7. Reestablezca el láser que bloqueó por canal, de modo que no tenga atenuación y mida su potencia óptica.

### A.3 Experiencia 3: DEMUX + filtrado (guía alumno)

Un demultiplexor convencional es un dispositivo que acepta ciertas longitudes de onda agrupadas como entrada y las separa, cada una, en una salida. En el caso del WSS flexible, éste tiene la ventaja de aceptar cualquier láser en sus entradas, siempre y cuando sean todos de frecuencias distintas y pertenezcan a la banda óptica C. Con esto claro, se debe retomar la experiencia 1 y 2 que permite caracterizar los láseres y configurar el WSS flexible de modo que permita realizar la función inversa de un multiplexor.

#### Elementos a utilizar

- 3 módulos ethernet-ópticos
- 3 transceptores SFP
- *Patch chord* ópticos (los necesarios)
- 1 OSA
- 1 WSS flexible
- 1 PC

#### Esquema a implementar

Para esta tercera experiencia, el esquema a implementar es el mostrado en la Figura A-5 y Figura A-6. En la Figura A-5 se logra apreciar la señal multiplexada ingresando por el puerto común del WSS. También se requiere de un PC que esté conectado por puerto serial con el WSS «Teleco 1», como se indica en la Figura A-6. Finalmente, se requiere del instrumento de medición, O.S.A, el que va conectado en alguno de los nueve puertos previamente habilitados, para visualizar el demultiplexado.

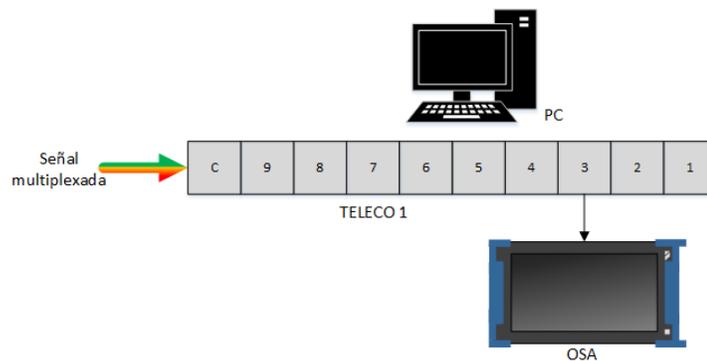


Figura A-5: Esquema a implementar para experiencia 3

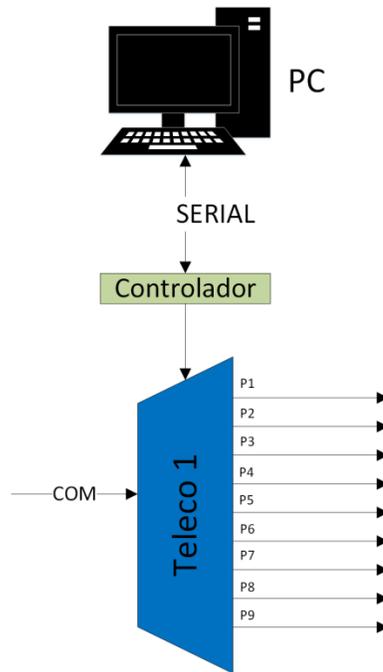


Figura A-6: Esquema experiencia

El procedimiento de instalación es el siguiente:

7. Inserte los transceptores SFP en los módulos ethernet-ópticos (uno por módulo).
8. Coloque los tres módulos ya cargados, junto con el OSA, sobre la mesa de trabajo.
9. Con los *patch chord* disponibles, realice las conexiones mostradas en la Figura A-5.
10. Encienda el OSA y deje que el software cargue automáticamente.
11. Energice los módulos ethernet-ópticos.
12. Usando el software Tera Term, cargar el plan de canales de la experiencia anterior y habilitar los respectivos canales y puertos para los láseres empleados.

### Mediciones:

8. Conecte el OSA al puerto 1 de salida donde desea ver un láser demultiplexado (previamente elegido) y realice medición de frecuencia y potencia óptica. ¿La frecuencia corresponde al láser seleccionado? ¿Existe alguna atenuación del láser? ¿A qué se debe?
9. Realice la configuración adecuada para que los dos láseres restantes puedan salir por el puerto 3 del WSS, atenuando uno en 2,4 dB y el otro en 1,1 dB. ¿Las atenuaciones programadas concuerdan con las mediciones?
10. Elija un láser del punto 2 y prográmelo para que salga por el puerto 6 del WSS. Realice un bloqueo por canal a dicho láser y comente cómo lo logró. Además ¿qué es lo que sucede dentro del dispositivo para que ocurra esto?

## A.4 Experiencia 4: Conmutador óptico 9x9 (guía alumno)

Un conmutador óptico es un dispositivo que permite intercambiar los puertos de salida de dos o más longitudes de onda que ingresan a este. El caso más simple es el conmutador en base a MEMS, el cual permite intercambiar el flujo de una fibra óptica. Dicho conmutador, posee dos estados: barra y cruz, los cuales se ilustran en la Figura A-7. Como se puede apreciar, cuando hay un estado barra, no existe conmutación. En el otro caso (cruz), ambas fibras ópticas son intercambiadas. En la experiencia del conmutador 9x9 en base a WSS flexible, éste se deberá realizar con dos WSS conectados por sus puertos comunes a un PC para poder realizar las conmutaciones posibles requeridas.

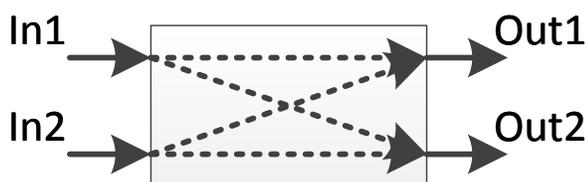


Figura A-7: Esquema funcional MEMS

### Elementos a utilizar

- 3 módulos ethernet-ópticos
- 3 transceptores SFP
- *Patch chord* ópticos (los necesarios)
- 1 OSA
- 2 WSS flexibles
- 1 PC

### Esquema a implementar

Para esta cuarta experiencia, el esquema a implementar es el mostrado en la Figura A-8 y Figura A-9. En la Figura A-8 se logran apreciar láseres que ingresan por los puertos 1, 2 y 3. Luego, dichos láseres son multiplexados y enviados desde el puerto común de «Teleco 1» hacia el puerto común de «Teleco 2». Posteriormente, se realiza una demultiplexación en «Teleco 2» de modo que no exista más de un canal por puerto. En la Figura A-9 se aprecia la conexión del PC con ambos WSS, empleando el puerto serial. El PC a usar deberá tener un solo puerto serial, por lo que cada WSS se configura por separado. Para evitar posibles confusiones al momento de configurar estos dispositivos, revise el archivo de comandos para poder revisar el nombre de cada WSS.

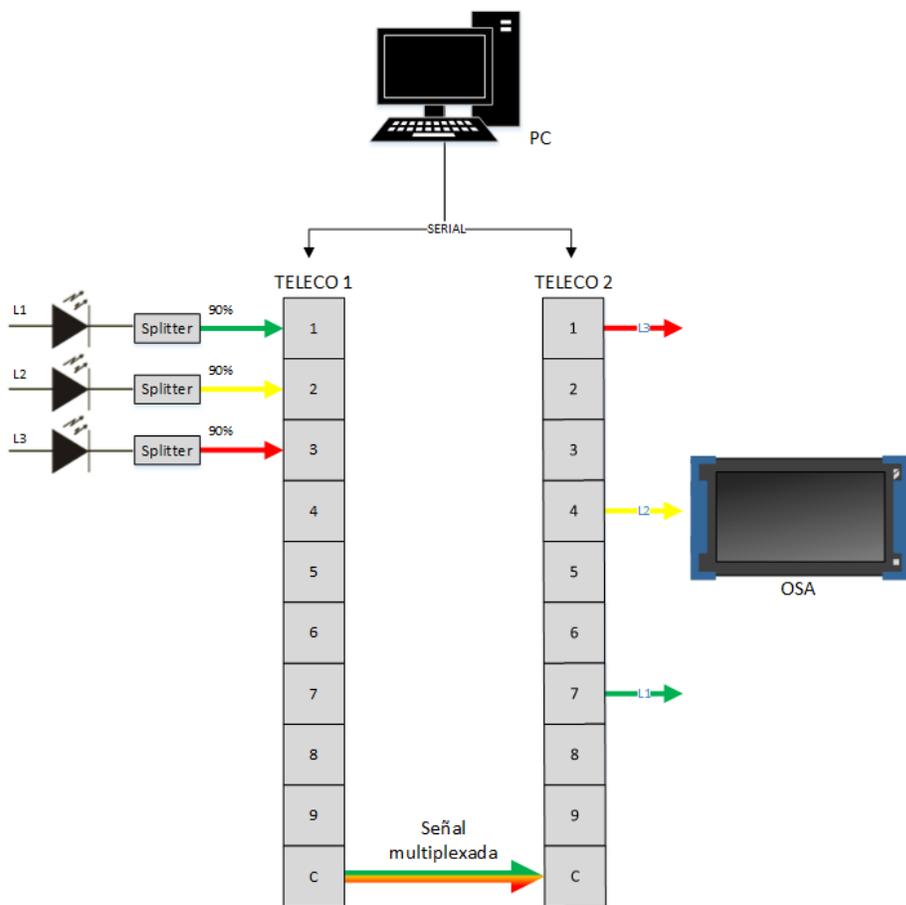


Figura A-8: Esquema a implementar para experiencia 4

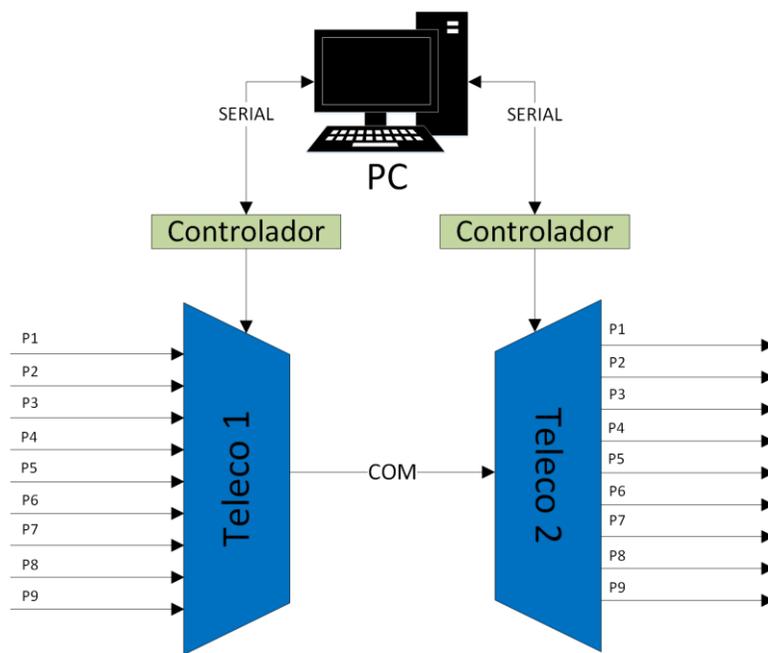


Figura A-9: Esquema experiencia

**El procedimiento de instalación es el siguiente:**

1. Inserte los transceptores SFP en los módulos ethernet-ópticos (uno por módulo).
2. Coloque los tres módulos ya cargados, junto con el OSA, sobre la mesa de trabajo.
3. Con los *patch chord* disponibles, realice las conexiones mostradas en la Figura A-8.
4. Encienda el OSA y deje que el software cargue automáticamente.
5. Energice los módulos ethernet-ópticos.
6. Usando el software Tera Term, cargar un plan de canales adecuado (puede ser el mismo que el usado en las experiencias anteriores) y habilitar los respectivos canales y puertos para los láseres empleados en el WSS «Teleco 1».
7. Conecte el OSA en alguno de los puertos de salida de «Teleco 2», donde se deban hacer las mediciones.

**Mediciones:**

1. Conecte cada uno de los láseres en los puertos 1, 2 y 3 de «Teleco 1» (también pueden ser otros puertos). Ahora conecte el OSA en el puerto común de «Teleco 1» y mida las potencias ópticas de los tres láseres.
2. Conecte el puerto común de «Teleco 1» con el de «Teleco 2». Conecte el OSA en el puerto 5 de «Teleco 2», configure dicho WSS de modo que salga por ese puerto el láser incidente del puerto 1 de «Teleco 1» y mida su potencia óptica ¿Cuánto ha variado la atenuación al pasar por dos WSS? ¿Es mayor o menor cuando se usaba un solo WSS?
3. Con otro láser, configure el WSS «Teleco 1» de modo que tenga una atenuación de 1,5 dB. Posteriormente, conecte el OSA en el puerto 4 de «Teleco 2» y mida su potencia óptica. ¿La atenuación es la misma que la medida?
4. Con el láser restante, establezca una configuración tal en «Teleco 2» de modo que tenga como salida el puerto 7 de dicho WSS, conectando el OSA para poder visualizar adecuadamente la salida. Luego, realice un bloqueo por puerto desde el WSS «Teleco 1». Comente lo ocurrido.

## A.5 Experiencia 5: Nodo ADD-DROP (guía alumno)

El nodo más simple que puede existir corresponde al de una red anillo unidireccional de grado nodal 2. Éste nodo permite agregar o quitar ciertos FSU (canales asignados) acorde a los requerimientos de dicho punto. A esta acción se le denomina ADD-DROP. Para llevar a cabo esto, la señal que contiene todos los FSU de la línea ingresa por el puerto común de uno de los WSS. Luego, se deja un puerto en común con un segundo WSS para transportar los FSU (canales) que no se han de modificar. Es en la etapa de entrada donde se pueden extraer canales y en la segunda etapa donde se pueden adicionar otros, claro está, distinto de los canales que no se han modificado. Finalmente, todos los FSU (canales asignados) salen por el puerto común del último WSS.

### Elementos a utilizar

- 3 módulos ethernet-ópticos
- 3 transceptores SFP
- *Patch chord* ópticos (los necesarios)
- 1 OSA
- 2 WSS flexibles
- 1 PC

### Esquema a implementar

Para esta quinta experiencia, el esquema a implementar es el mostrado en la Figura A-10 y Figura A-11. La Figura A-10 muestra la conexión a realizar entre ambos WSS mientras que la Figura A-11 da a conocer la conexión de los puertos seriales entre las tarjetas controladoras de ambos WSS con el PC. La señal multiplexada ingresa por el puerto común de «Teleco 1». Luego, se realiza la tarea de DROP, es decir, quitar hasta 8 canales (uno por puerto), manteniendo el resto de las señales que no se van a modificar. Dichas señales ingresarán por otro puerto de «Teleco 2» (puede ser el puerto «P1»), dejando la posibilidad de realizar un ADD o adición de otros láseres. Al igual que en la etapa anterior, se podrán agregar hasta ocho láseres (uno por puerto).

Para esta tarea, se requiere de un PC que esté conectado por puerto serial con ambos WSS. Así, se podrán quitar canales asignados en «Teleco 1» y agregar otros en «Teleco 2». Finalmente, se requiere del instrumento de medición, O.S.A, el que va conectado en el puerto común de «Teleco 2» para verificar el correcto funcionamiento del nodo propuesto.

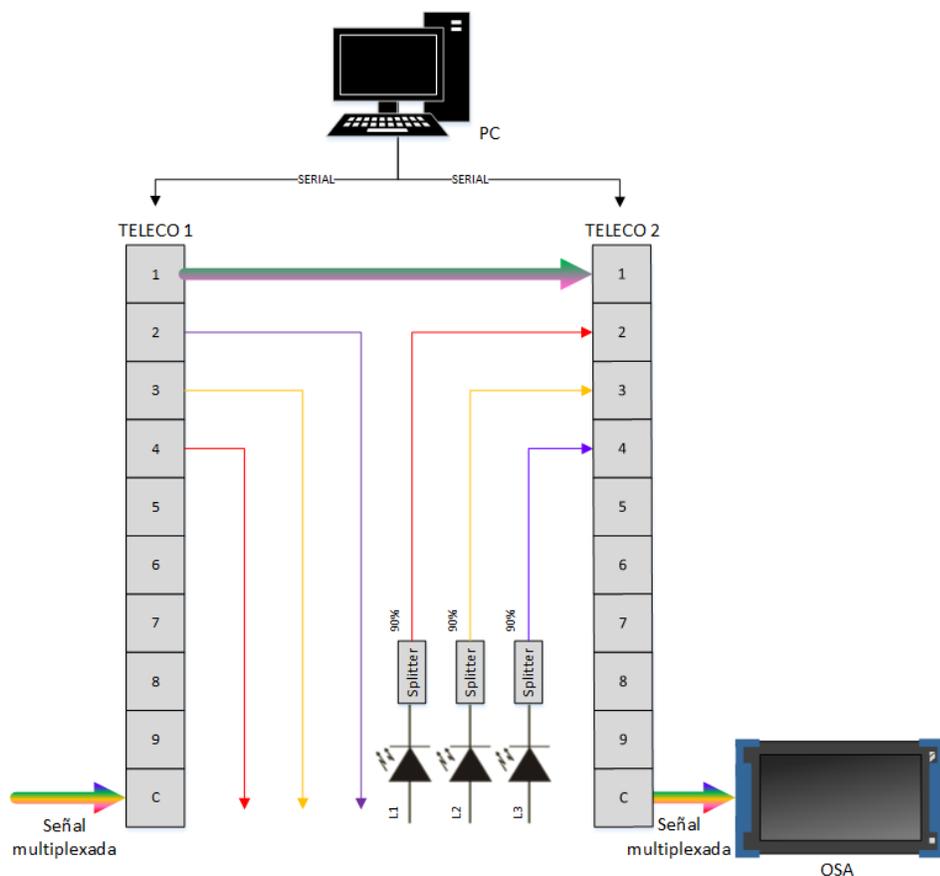


Figura A-10: Esquema a implementar para experiencia 5

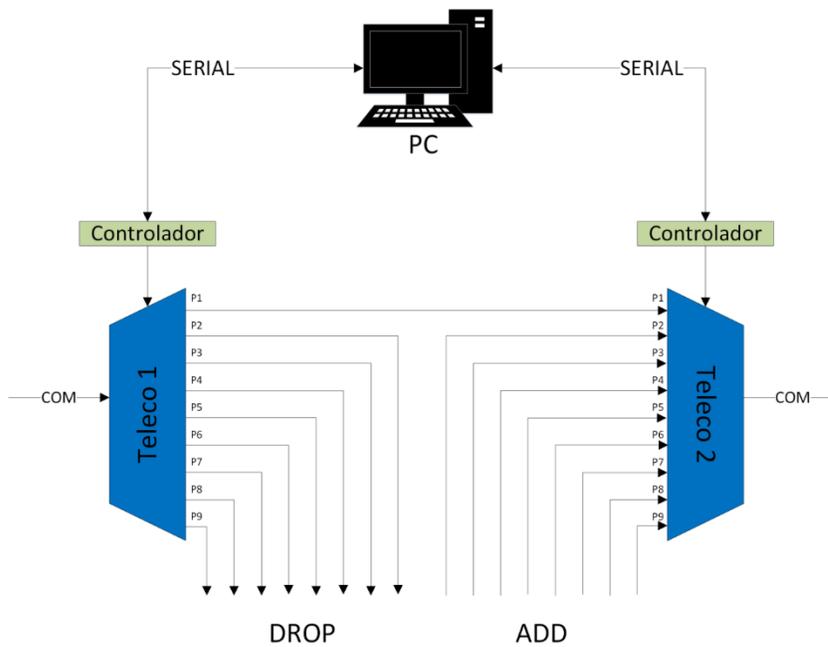


Figura A-11: Esquema experiencia

**El procedimiento de instalación es el siguiente:**

1. Inserte los transceptores SFP en los módulos ethernet-ópticos (uno por módulo).
2. Coloque los tres módulos ya cargados, junto con el OSA, sobre la mesa de trabajo.
3. Con los *patch chord* disponibles, realice las conexiones mostradas en la Figura A-10.
4. Encienda el OSA y deje que el software cargue automáticamente.
5. Energice los módulos ethernet-ópticos.
6. Usando el software Tera Term, cargar un plan de canales adecuado (puede ser el mismo que el usado en las experiencias anteriores) y habilitar los respectivos canales y puertos para los láseres empleados en el WSS «Teleco 1».
7. Conecte el OSA en alguno de los puertos de salida de «Teleco 1» y «Teleco 2», donde se deban hacer las mediciones.

**Mediciones:**

1. Conecte uno de los láseres en el puerto común de «Teleco 1» y el OSA en el puerto 1 del mismo WSS, configure dicho dispositivo y verifique que pueda ser visualizado por el instrumento. Mida la potencia óptica y frecuencia del láser usado.
2. Ahora, conecte el puerto 1 de «Teleco 1» con el puerto 1 de «Teleco 2». Conecte el OSA en el puerto común de «Teleco 2» y configure este último para que pueda ser visualizado por el instrumento. Realice nuevamente medición de potencia óptica y frecuencia del láser en cuestión. ¿Hay alguna diferencia? Si la hay ¿a qué se debe?
3. Para realizar el ADD de este pequeño nodo, conecte los otros dos láseres en los puertos 2 y 3 de «Teleco 2». Con el OSA conectado en el puerto común del WSS en cuestión, realice mediciones de frecuencias y potencias ópticas de los láseres.
4. En el caso del DROPP, desconecte uno de los láseres del punto 3 y multipléxelo con el láser del punto 1. Luego, configure el WSS «Teleco 1» de modo que por el puerto 4 salga el láser recién conectado. Conecte el OSA por el puerto 4 de este dispositivo y mida frecuencia y potencia óptica. ¿Corresponde al láser seleccionado?

Para el caso del ADD-DROPP completo, combine los puntos 3 y 4. Posteriormente, conecte el instrumento de medición en el puerto común de «Teleco 2». Comente lo observado por el instrumento y realice mediciones de potencia óptica y frecuencia. ¿Nota alguna atenuación a la salida de ese WSS?

# B Datasheet de WSS flexible 1x9 Finisar

Finisar
DWPf  
Dynamic Wavelength Processor WSS  
with Flexgrid<sup>™</sup> Functionality

### PRODUCT BRIEF

#### KEY FEATURES

- ▶ Flexgrid<sup>™</sup>: Dynamic Channel (Frequency Slot) Control
  - 12.5 GHz Granularity
  - 50 – 200 GHz Width
- ▶ **4-20 Ports and up to 96 Channels**
- ▶ LCoS Switching Technology
- ▶ 0 – 20 dB Per Channel, Per Port Attenuation Control
- ▶ Wide, Flat Passband at All Attenuation Levels
- ▶ Serial and DPRAM Interfaces
- ▶ Network Systems Ready
- ▶ Supports In-Service Firmware Upgrade
- ▶ ROADM or X-Connect Building Block
- ▶ Cascadable Add/Drop Functionality
- ▶ High-Degree Interconnect Enabler
- ▶ Advanced Functionality Switch

#### APPLICATIONS

- ▶ Mixed ITU Channel Plans (50 GHz and 100 GHz)
- ▶ 400+ Gb/s telecom networks
- ▶ Colorless, Directionless and Contentionless (CDC) ROADMs



Increasing demand for network services is driving the introduction of new transmission formats and channel management technologies that facilitate the efficient use of optical bandwidth for extremely high data rates.

Whilst the introduction of coherent techniques such as Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying (DP-QPSK) enables 100 Gb/s transmission within a 50 GHz channel, traffic with higher data rates, including 400 Gb/s and 1 Tbit/s signals of the future, are not expected to fit inside 50 GHz wide channels. These higher data rates require that channel spacings are flexible and can be increased to allow the use of new transmission formats.

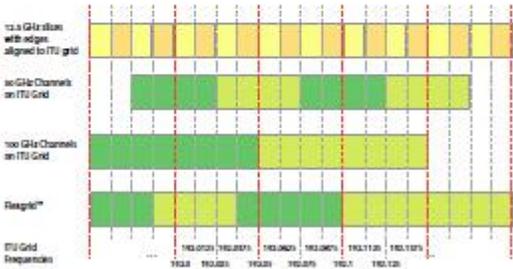
Finisar's new Flexgrid<sup>™</sup> technology provides dynamic control of the channel center frequency with 6.25 GHz resolution and channel width with 12.5 GHz resolution within a Wavelength Selective Switch (WSS), the key element in a Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer (ROADM).

Once deployed, channel plans are configurable 'on-the-fly', meaning that channel bandwidths can be adjusted to most efficiently carry future demand as it arises.

Furthermore, as frequency slot edges are aligned to the 12.5 GHz ITU grid, Flexgrid<sup>™</sup> offers full backwards compatibility with both the standard 100 GHz and 50 GHz ITU grids, as illustrated in Figure 1.

Flexgrid<sup>™</sup> is available now on the DWPf 1x9 and 1x20 WSS Dynamic Wavelength Processor (DWP) products and will be available soon on the Edge Wavelength Processor (EWP) WSS product lines.





ITU Grid	Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4	Channel 5	Channel 6	Channel 7	Channel 8	Channel 9	Channel 10
100 GHz ITU Grid	192.000	192.050	192.100	192.150	192.200	192.250	192.300	192.350	192.400	192.450
50 GHz ITU Grid	192.000	192.025	192.050	192.075	192.100	192.125	192.150	192.175	192.200	192.225
Flexgrid <sup>™</sup>	192.000	192.0125	192.025	192.0375	192.050	192.0625	192.075	192.0875	192.100	192.1125

