

## Formación profesional en CePETel 2022

Desde la Secretaría Técnica del Sindicato CePETel convocamos a participar en el siguiente curso de formación profesional:

### Comunicaciones Ópticas Digitales Parte 2: Sistemas Ópticos de Varios Canales de Información (WDM)

**Clases:** 4clasesde 3 hs c/u de 18:00 a 21:00hs.

**Días que se cursa:** martes 22 y 29 de marzo; y 5 y 12 de abril.

**Modalidad:** a distancia (requiere conectarse a la plataforma Zoom en los días y horarios indicados precedentemente).

**Docente:**Daniel Torrabadella

**La capacitación es:**

- Sin cargo para afiliados y su grupo familiar directo.
- Sin cargo para encuadrados con convenio CePETel.
- Con cargo al universo no contemplado en los anteriores.

**Informes:** enviar correo a [tecnico@cepotel.org.ar](mailto:tecnico@cepotel.org.ar)

**Inscripción (hasta el 18 de marzo):** ingresar al formulario (se recomienda realizar el registro por medio de una cuenta de correo personal y **no utilizar dispositivos de la empresa para acceder al link**).

<https://forms.gle/7WwehPxeQzuzgN8U6>

### Objetivos

Al finalizar este curso, el alumno será capaz de alcanzar los siguientes objetivos:

- Conocer las características y componentes de Sistema CWDM(CoarseWavelengthDivisionMultiplexing).
- Realizar el Trabajo Práctico N°1: Calculo de enlace en Sistemas CWDM.
- Conocer las características y componentes de Sistemas DWDM.
- Comprender los efectos alinéales sobre la fibra óptica.(Dense WavelengthDivisionMultiplexing).
- Realizar el TrabajoPráctico N°2: Cálculo de enlace en Sistemas DWDM.

**Ing. Daniel Herrero – Secretario Técnico – CDC**

## Programa

Partiendo de los conocimientos adquiridos en la Parte 1, se verán los sistemas ópticos que utilizan multiplexación de longitud de onda (WDM) para transportar varios canales de información en un par de fibras ópticas.

- Módulo I. Componentes ópticos y características técnicas de sistemas simple WDM (CWDM).

En la etapa inicial se abordarán todos los elementos que conforman un sistema óptico simple CWDM.

Se calculará el enlace a partir de las ecuaciones que permiten garantizar un correcto funcionamiento.

- Módulo II. Componentes ópticos y características técnicas de sistemas complejos WDM (DWDM).

En este módulo se verán los nuevos elementos que se introducen en el sistema óptico y como estos influyen en efectos alineales dentro de la fibra óptica.

Se realizará una introducción a modulaciones ópticas digitales coherentes para altas velocidades de información.

Se verá el cambio de paradigma en el método de cálculo de enlace que permite garantizar un correcto funcionamiento.

### Acerca del docente

Daniel O. Torradabella, es Ingeniero Electrónico egresado de la Universidad Tecnológica Nacional – FRBA en año 1992, con postgrado en Gestión de las Telecomunicaciones en la Universidad de San Andrés en el año 2000.

Se desarrolló en temas relacionados a la transmisión, comenzando con sistemas radioeléctricos en los inicios para después abocarse al diseño de redes ópticas y pruebas en laboratorio, primero en sistemas SDH, luego en sistema WDM y por último en el desarrollo de Redes Ópticas Nacionales de alta capacidad con restauraciones ópticas automáticas a 100Gb/s.

Actualmente se desempeña en Dirección de Arquitectura de Redes y Servicios en Telecom Argentina como experto en arquitectura de redes ópticas.

Durante el 2019 dictó para el Sindicato CePETel el curso de Comunicaciones Ópticas. En el año 2021 dictó para nuestro sindicato la parte 1 Comunicaciones Ópticas Sistemas de un Canal de Información.

**Ing. Daniel Herrero – Secretario Técnico – CDC**



# ***Módulo IV***

## **Sistemas Ópticos de Varios Canales de Información CWDM.**

**(Coarse Wavelength Division Multiplexer)**

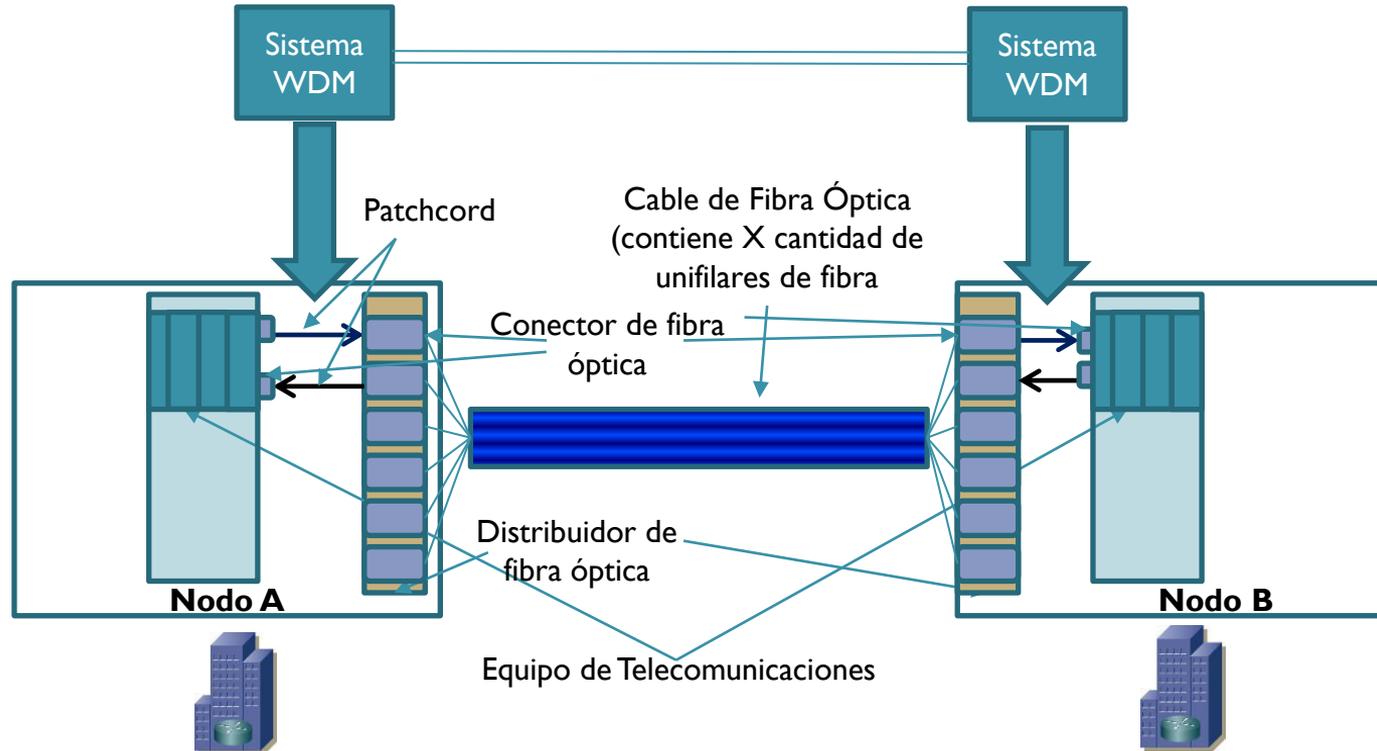
**Ing. Daniel Torrabadella**  
**formacion.dotcom@gmail.com**

# Agenda

- I. Componentes, características y topologías CWDM.
- II. Performance de enlaces CWDM.
- III. Cálculo de enlace.

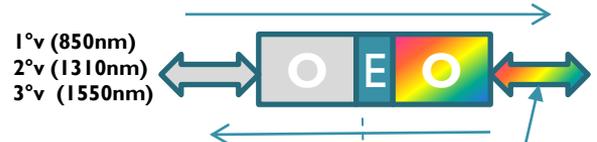
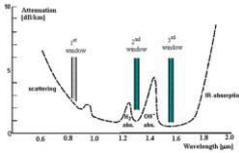
# Sistemas Ópticos – CWDM

**Objetivo CWDM:** Ampliar la capacidad del par de pelos de fibra óptica a un bajo costo y alcance limitado.

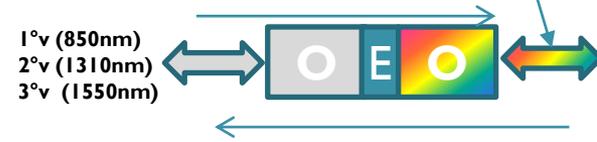


# Sistemas Ópticos CWDM

**Puerto blanco y Negro o Gris**  
Posee cualquier frecuencia dentro de su banda



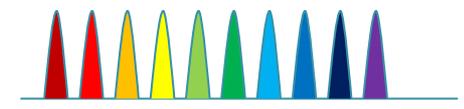
**Puerto color**  
Frecuencia precisa



Transceptor óptico canal de información (Switch, Router, SDH, etc.)

**Etapa Sintonía o Coloreo**

2° y 3° v (CWDM)



Grilla de canales  
Separación fija  
20 nm (~2,5 THz)

Multiplexor

Puerto in/out de cada frecuencia

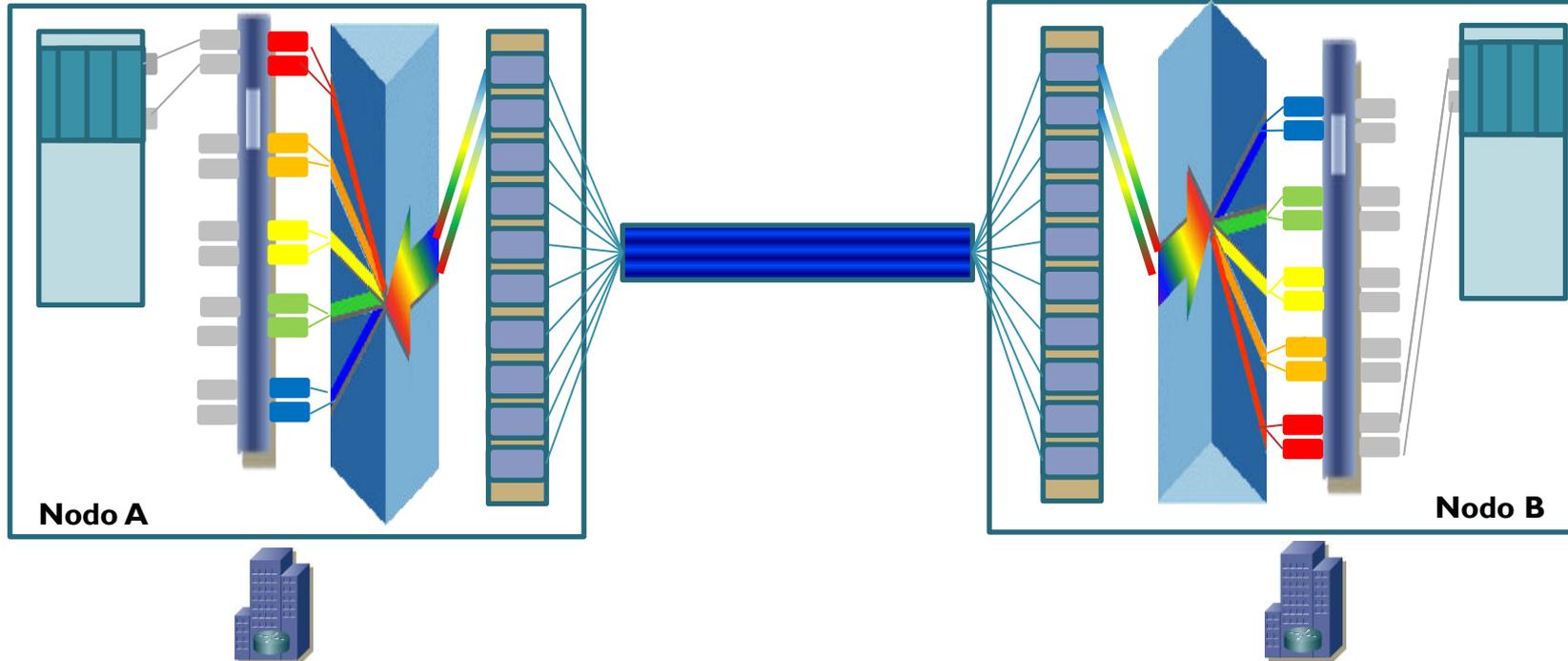
Demultiplexor

Plantel de Fibra Óptica

**Etapa Mux / Demux.**

# Sistemas Ópticos – CWDM

Volviendo a un esquema de Nodo....



# Sistemas Ópticos WDM – Etapa de Coloreo

## ➤ **Etapa de Sintonía o Coloreo (Transponder).**



Tiene como objetivo:

- Adaptación al medio para disponer varios canales de información en la fibra.

Interfaz óptica / eléctrica de iguales características técnicas de las vista para un canal de información (Interfaz blanco y negro o gris). Esta interfaz podrá transmitir en 1°, 2° y 3° ventana dentro de cada banda definida.

Interfaz eléctrica/óptica coloreada cuya principal característica es que la frecuencia de transmisión ya no esta dentro de una banda sino que esta definida por el estándar (ITU-T). Estas frecuencia definidas están comprendida dentro de la 2° y 3° ventana.

# Mejora de Alcance.

- **Etapa de Sintonía o Coloreo. Mejora de Alcance**

Tecnológicamente, los diodos láser (Tx) y fotodiodos (Rx) son similares a las interfaces blanco y negro de larga distancia (10GbaseZR por ejemplo), por lo cual tendrían alcances similares (Atenuación y DC). Pero los módulos mas modernos incluyen FEC que mejoran estos parámetros.

Ejemplos:

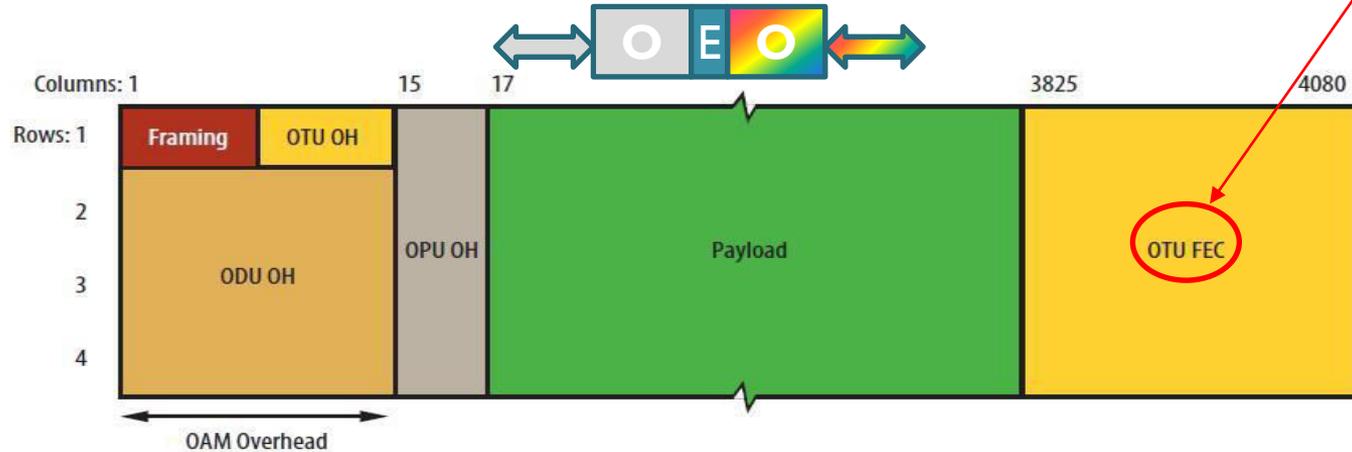
	FEC Disabled	FEC Enabled
PRx min	-24 dBm	-27 dBm

Maximum chromatic dispersion	FEC disabled <sub>i</sub>	FEC enabled
1471 nm channel	841 ps/nm	962 ps/nm
1491 nm channel	921 ps/nm	1052 ps/nm
1511 nm channel	1000 ps/nm	1142 ps/nm
1531 nm channel	1079 ps/nm	1233 ps/nm
1551 nm channel	1159 ps/nm	1324 ps/nm
1571 nm channel	1238 ps/nm	1415 ps/nm
1591 nm channel	1319 ps/nm	1508 ps/nm
1611 nm channel	1400 ps/nm	1600 ps/nm

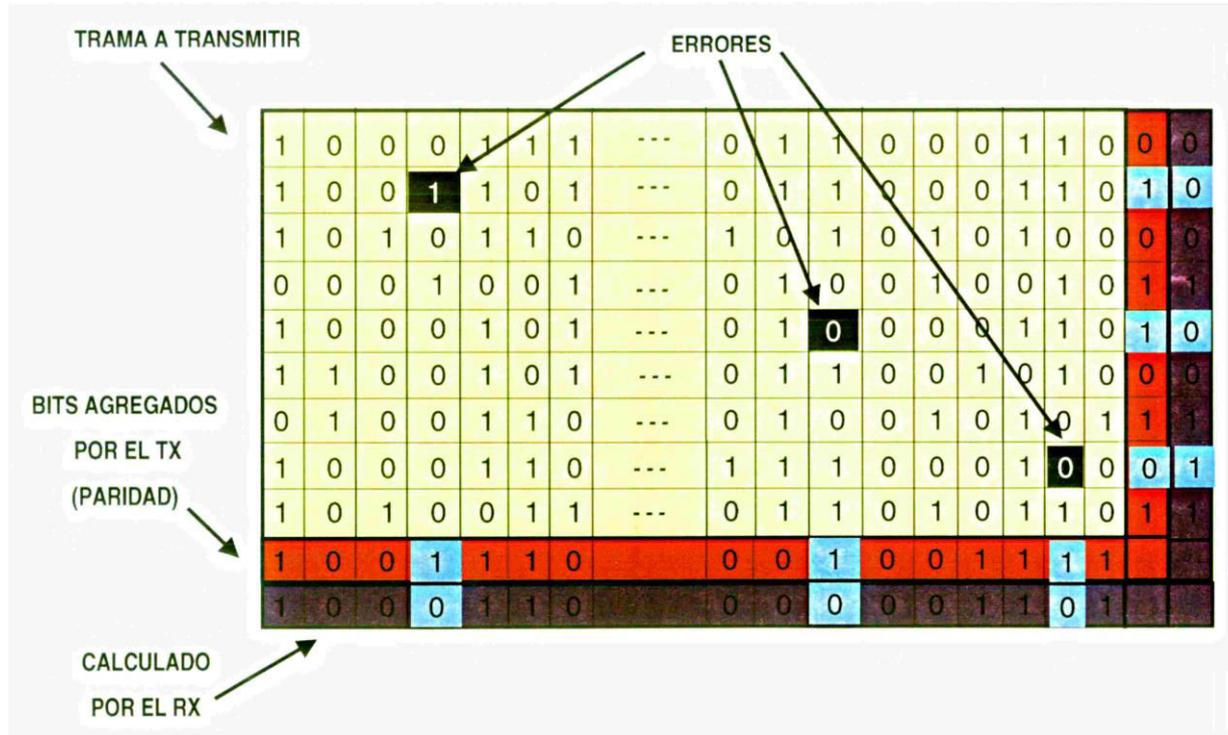
# Sistemas Ópticos WDM – Etapa de Coloreo

## ➤ **Etapa de Sintonía o Coloreo. Mejora de Alcance. (cont.)**

Los transponders coloreados pueden mapear la información (Ethernet, SDH, FC) dentro de un contenedor OTN (ITU-T G709) en la “etapa eléctrica” el cual tiene, en su trama, espacio reservado para los extra bits para un código de corrección de errores (FEC).

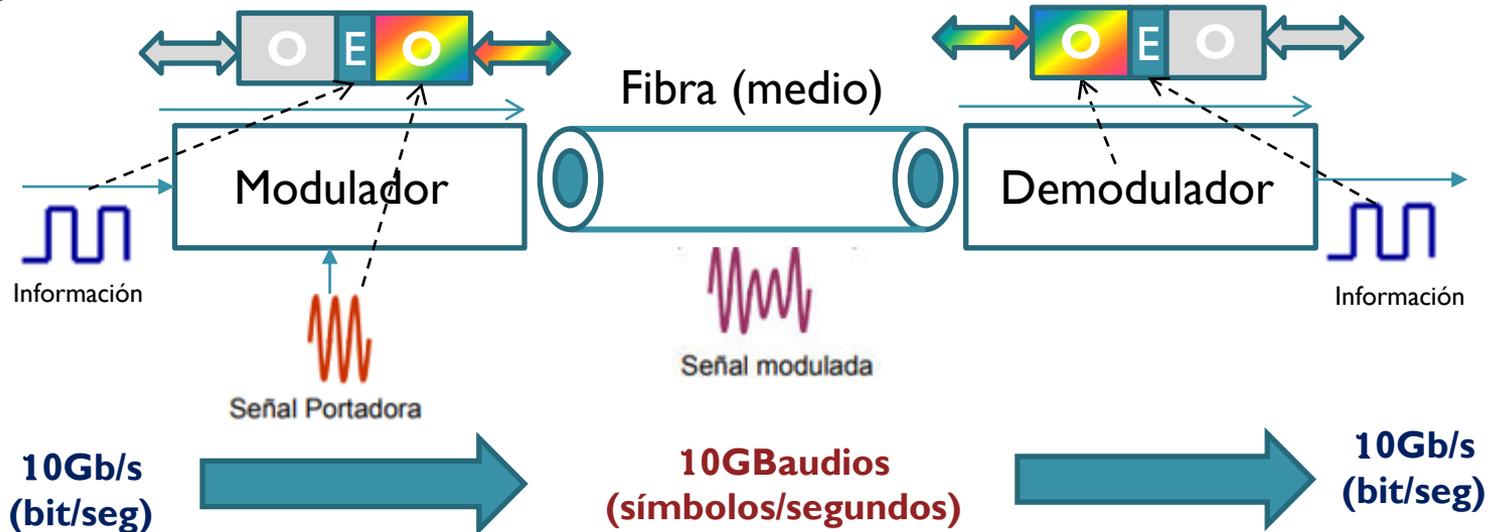


# Adaptación al Medio: FEC



# Adaptación al Medio: Modulación

Este tipo de interfaz utilizan un esquema de “Detección Directa - Modulación por Intensidad”\* (DD-IM) digital, donde un “Uno” de información eléctrica se traduce como presencia de luz y un “Cero” de información eléctrica se traduce como ausencia (RZ – Retorno a cero) o baja presencia (NRZ – No retorno a cero) de luz.



# Transceptores Ópticos - Modulación

Los receptores ópticos son iguales?



Modulador /  
Velocidad de  
Información

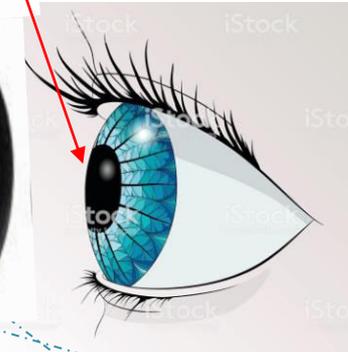
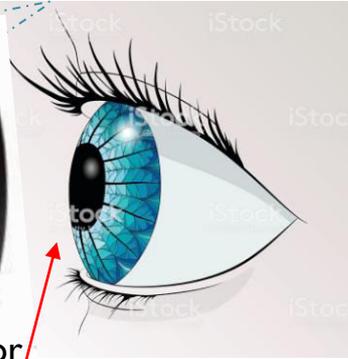


Frecuencia  
Interfaz Color

Demultiplexor  
óptico

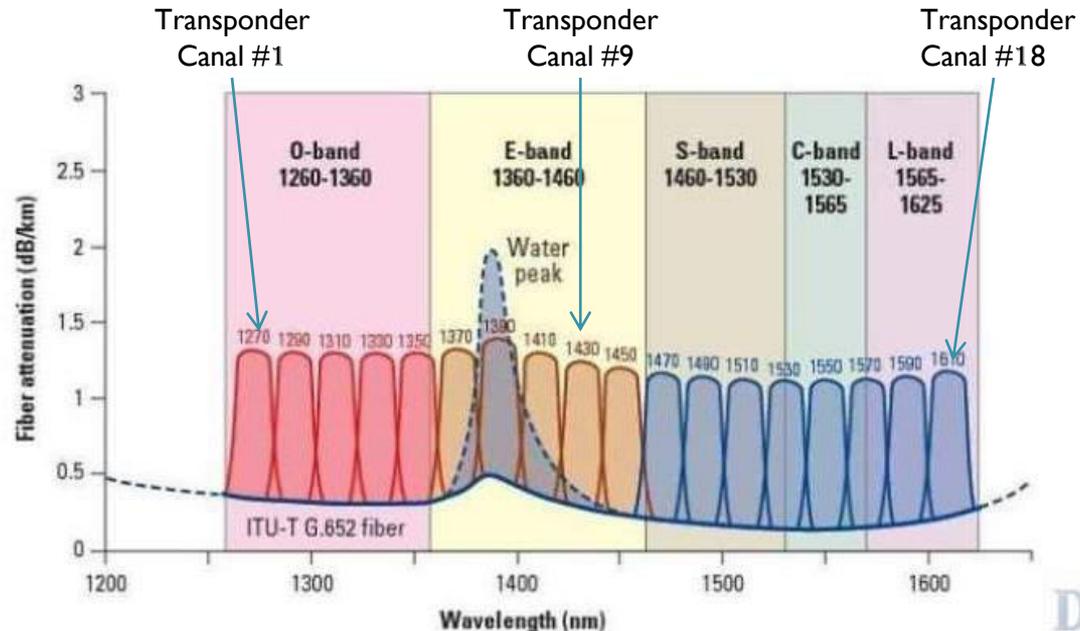


Receptor  
óptico



# Adaptación al Medio: Frecuencia

- Estandarizadas por ITU-T en un rango de 360 nm (2° y 3° ventana) donde se ubican 18 canales separados a 20nm cada uno.



# Aspecto Físico

Al inicio, el primer módulo que estandarizó el MSA para interfaces coloreadas fue el XFP para albergar los láser, que en un principio, fueron de frecuencia fija (acorde a la grilla ITU-T), para luego pasar a ser sintonizables en parte o la totalidad de la banda.



# Aspecto Físico

Con el avance tecnológico se pudieron alojar, al igual que los módulos ópticos blanco y Negro, los láser coloreados en los mismos estándares de factor de forma (SFP, SFP+). Se diferencian uno de otro simplemente por su código o catalogo de cada fabricante.

## SFP+ Blanco y Negro



Alcance SR

Rango de frecuencia  
(1° ventana)

Pueden existir módulo de frecuencia fija (un código por frecuencia) o módulos sintonizables por SW



SFP+ CWDM

Frecuencia fija: 1530 nm  
Identificación CWDM

# Sistemas Ópticos WDM – Mux / Demux

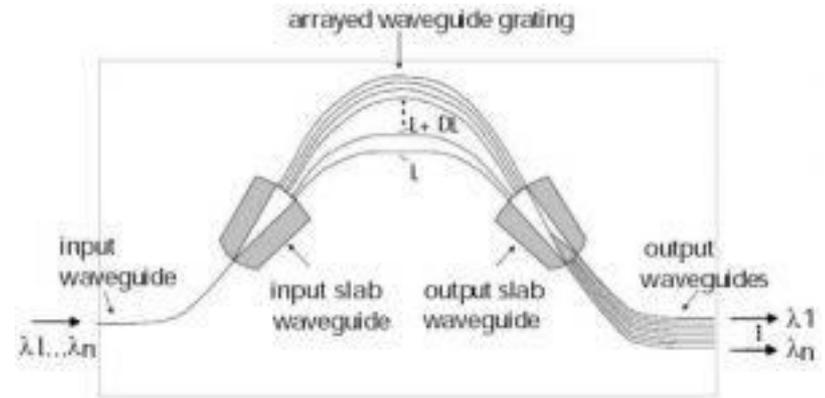
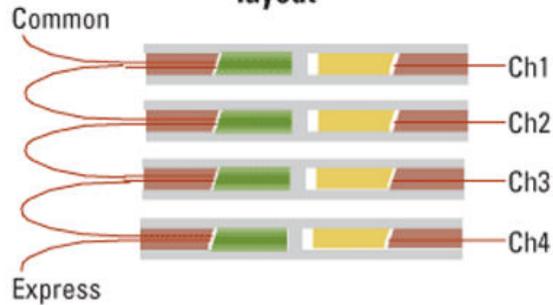
## ***Etapa de Mux / Demux Óptico***

- El Mux / Demux que veremos es un elemento pasivo que presenta un combinador en sentido de transmisión y un filtro en el sentido recepción a una frecuencia central en cada puerta con una separación entre puertos a longitudes de onda de 20 nm.
- Si bien la cantidad "N" de puertas máxima es 18, las soluciones brindadas por los fabricantes en CWDM son de menos puertas.

# Sistemas Ópticos WDM – Mux / Demux

- Las tecnologías de construcción pueden ser:
  - Thin-film filters (TFFs)
  - Arrayed Waveguide Grating (AWG)

**Conventional TFF multiplexer/demultiplexer layout**



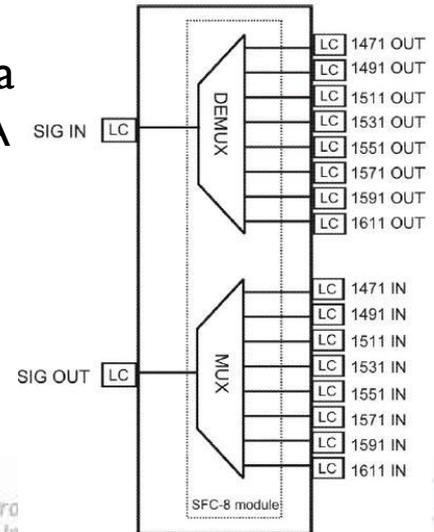
# Sistemas Ópticos WDM – Mux / Demux

- **Topologías.**

Existen básicamente dos variantes de Mux/Demux con el objeto de adaptarse a distintas arquitecturas

## A. Terminal – Sistema Punto a Punto.

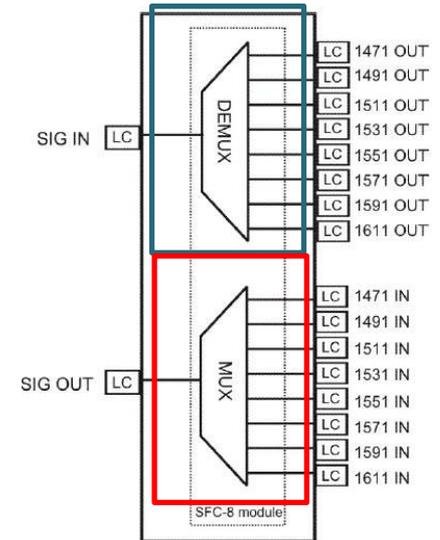
La totalidad de longitudes de onda previstas que integra el sistema óptico CWDM comenzarán en el extremo A y terminarán en el extremo B.



# Sistemas Ópticos WDM – Mux / Demux

- **Características Técnicas – Terminal (ejemplo)**

Insertion Loss	Max (dB)
OMD-In ⇒ Ch 1_OUT	1.4
OMD-In ⇒ Ch 2_OUT	3.5
OMD-In ⇒ Ch 3_OUT	3.2
OMD-In ⇒ Ch 4_OUT	2.9
OMD-In ⇒ Ch 5_OUT	2.6
OMD-In ⇒ Ch 6_OUT	2.3
OMD-In ⇒ Ch 7_OUT	2.0
OMD-In ⇒ Ch 8_OUT	1.7
Ch 1_In ⇒ OMD-OUT	0.9
Ch 2_In ⇒ OMD-OUT	1.2
Ch 3_In ⇒ OMD-OUT	1.5
Ch 4_In ⇒ OMD-OUT	1.8
Ch 5_In ⇒ OMD-OUT	2.1
Ch 6_In ⇒ OMD-OUT	2.4
Ch 7_In ⇒ OMD-OUT	2.7
Ch 8_In ⇒ OMD-OUT	3.0

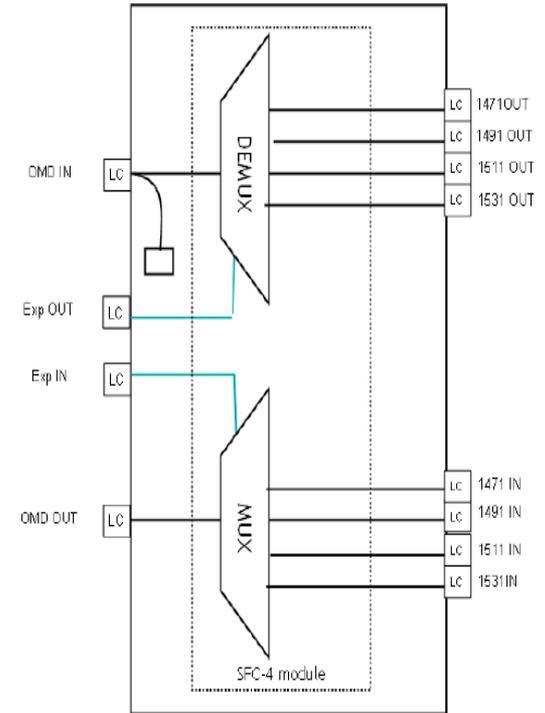
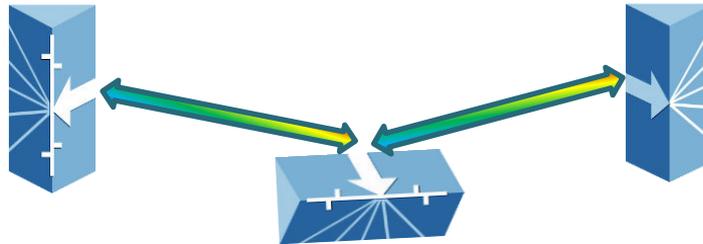


# Sistemas Ópticos WDM – Mux / Demux

- **Topologías (continuación).**

**B. FOADM:** Add Drop en punto intermedios.

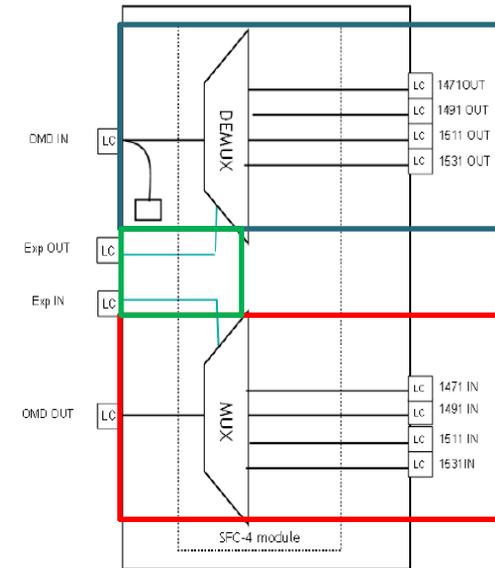
De la totalidad de longitudes de onda previstas que integra el sistema óptico CWDM, algunas bajan/suben en un nodo intermedio y otra continúan y terminarán en el extremo B.



# Sistemas Ópticos WDM – Mux / Demux

- **Características Técnicas – FOADM (ejemplo)**

Insertion Loss	Max (dB)
OMD-In ⇒ Ch 4/8 _OUT	1.4
OMD-In ⇒ Ch 3/7 _OUT	1.7
OMD-In ⇒ Ch 2/6 _OUT	2.0
OMD-In ⇒ Ch 1/5 _OUT	2.3
OMD-In ⇒ Exp_OUT	2.2
Exp-In ⇒ OMD-OUT	1.7
Ch 4/8_In ⇒ OMD-OUT	1.8
Ch 3/7_In ⇒ OMD-OUT	1.5
Ch 2/6_In ⇒ OMD-OUT	1.2
Ch 1/5_In ⇒ OMD-OUT	0.9





***BREAK !!!***

# Agenda

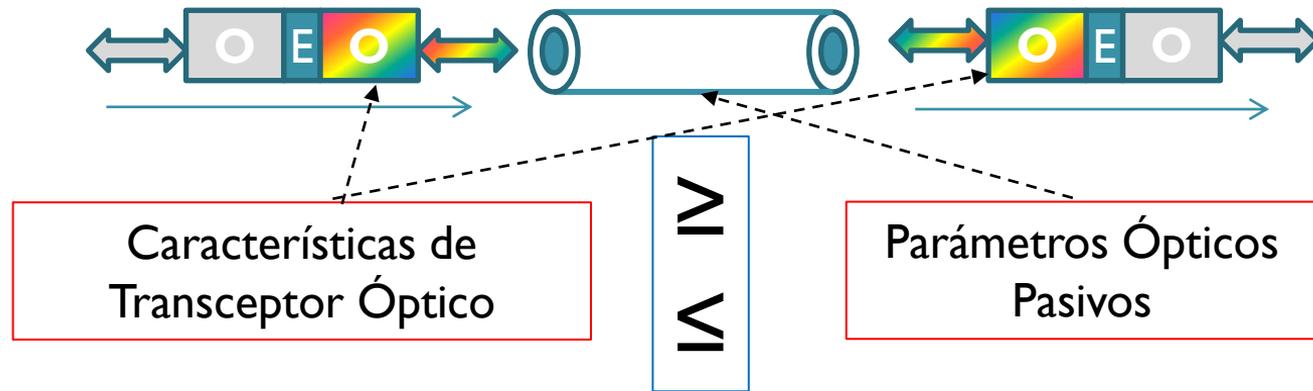
I. Componentes, características y topologías CWDM.

II. Performance de enlaces CWDM.

III. Cálculo de enlace.

# Performance de Enlace Óptico CWDM

«La performance adecuada de un enlace es asegurar la tasa de error de bit del parámetro “maximum error rate” de la aplicación seleccionada».



Para CDWM son las mismas ecuaciones que para interfaces Blanco y Negro con la incorporación de atenuaciones adicionales del Mux/Demux.

# Mínima Atenuación

La suma de todas las atenuaciones **mínimas** conocidas de los elementos pasivos de medio de enlace como la fibra óptica en la banda de operación del sistema, y los Mux/Demux deberán ser **Mayor o Igual** al parámetro “Mínima Atenuación Tolerada” de la aplicación (transceptor óptico).

$$\text{MínAtt Elementos pasivos} \geq \text{MinAtt Módulo óptico}$$

Siendo para el módulo óptico:

$$\text{MinAtt Modulo optico} = P_{Tx \text{ max}} - P_{Rx \text{ max}}$$

# Mínima Atenuación

Y el aporte mínimo de los elementos pasivos:

- En una fibra nueva:

$$\text{MinAtt Elem. Pasivos} = \sum \text{AttFo@frec} [\text{dB/Km}] \times \text{Long} [\text{Km}] + \sum \text{AttMux/Demux Ch min} [\text{dB}]$$

- En una fibra ya instalada y medida:

$$\text{MinAtt Elem. Pasivos} = \sum \text{AttFo\_medida@frec} [\text{dB}] + \sum \text{AttMux/Demux min} [\text{dB}]$$

Recordar que si no se cumple esta inecuación se puede salvar incluyendo unos atenuadores adicionales que deberán considerarse en la ecuación de “Máxima Atenuación”

# Máxima Atenuación

La suma de todas las atenuaciones introducidas por los elementos pasivos de medio de enlace como la fibra, en la banda de operación del diodo emisor de la aplicación seleccionada, los conectores ópticos y los Mux/Demux deberán ser **Menor o Igual** al parámetro “Máxima Atenuación Tolerada” de la aplicación (Transceptor óptico)

$$\text{MaxAtt Elementos pasivos} \leq \text{MaxAtt Módulo óptico}$$

Siendo para el módulo óptico:

$$\text{MaxAtt Modulo optico} = P_{Tx \text{ min}} - P_{Rx \text{ min}} - \text{Max\_PathPenalty}$$

# Máxima Atenuación

Recordando que la atenuación es un parámetro que varia con el tiempo en las fibras y sus componentes pasivos (como los conectores) ya instalados, a la Máxima atenuación se le deberá incorporar un “Margen de Envejecimiento”

Y el aporte máximo de los elementos pasivos:

- En una fibra nueva:

$$\text{MaxAtt Elem. Pasivos} = \sum \text{AttFo@frec} [dB/Km] \times \text{Long} [Km] + \sum \text{AttEmp Max} [db] + \sum \text{AttConect Max} [db] + \sum \text{AttMux/Demux max} + \text{Mar\_Env} [db]$$

- En una fibra ya instalada y medida:

$$\text{MaxAtt Elem. Pasivos} = \sum \text{AttFo@frec medida} [dB] + \sum \text{AttConect Max} [db] + \sum \text{AttMux/Demux max} + \text{Mar\_Env} [db]$$

# Dispersión Cromática

- La dispersión Cromática introducida por una fibra en la banda de operación del diodo emisor a lo largo de un enlace (Long) dado en Km, deberá ser **menor** al parámetro “Dispersión Cromática Tolerada” de cada canal del CWDM.
- El Mux/Demux no agrega dispersión cromática adicional.

DC Max elementos pasivos  $\leq$  Tolerancia DC @ ch modulo óptico

- Siendo para los elementos pasivos (FO):

$$DCMax \text{ elementos pasivos } [ps/nm] = DCFO@frec [ps/nm * km] \times Long [Km]$$

# Dispersión Cromática

- Es importante destacar que si las distancias del enlace son cortas, los módulos ópticos CWDM no presentan riesgos en el cálculo de enlace y podría llegado el caso hacerse un cálculo con el valor medio de la DC aportada por la fibra en esa banda de frecuencia.
- Por el contrario si las distancias son largas, tomar el valor medio puede inducir a errores en el cálculo de dispersión, por lo cual deberá ceñirse a las características de la fibra óptica del fabricante para ajustar el valor mas real.
- Por ejemplo el fabricante de fibras Corning, para su modelo de fibra G.652 SMF-28e fija un coeficiente de Dispersión Cromática función de la longitud de onda:

## Formulas

### Dispersion

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left[ \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km}),$$

for 1200 nm  $\leq$   $\lambda$   $\leq$  1625 nm

$\lambda$  = Operating Wavelength

$\lambda_0 = 1317$  nm (longitud de onda con dispersión nula).  
 $S_0 = 0.088$  ps/(nm\*Km), (pendiente en cero dispersión).

# Dispersión Modo de Polarización

- El Retardo de Grupo Diferencial introducido por una fibra debido a la Dispersión de Modo de Polarización en la banda de operación del diodo emisor a lo largo de un enlace (Long) dado en Km, **deberá ser menor** que “Máximo Retardo de Grupo Diferencial” de la aplicación seleccionada.
- La influencia del Mux/Demux en lo que a retardo diferencial refiere, es muy bajo comparado con lo que aporta la fibra óptica (se desprecia en sistemas CWDM).

DGD Max elementos pasivos  $\leq$  Tolerancia DGD módulo óptico

# Dispersión Modo de Polarización

En una fibra nueva:

$$DGD_{max FO} [ps] = 3 \times \sqrt{\sum \left[ PMD_n \left[ \frac{ps}{\sqrt{Km}} \right] \times \sqrt{Long_n [km]} \right]^2}$$

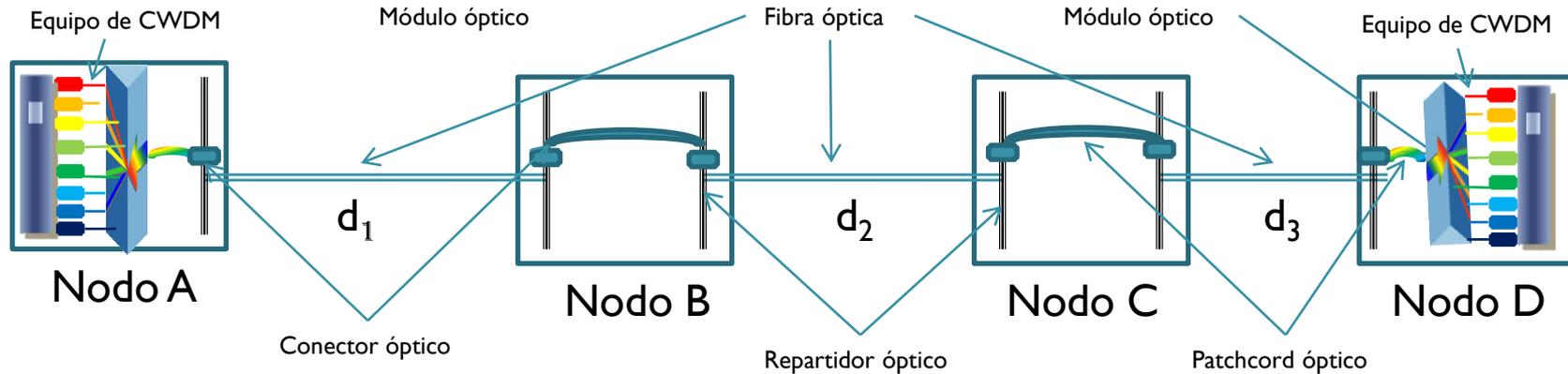
En una fibra ya instalada y medida:

$$DGD_{max FO} [ps] = 3 \times \sqrt{\sum [DGD_n [ps]]^2}$$

# Agenda

- I. Componentes, características y topologías CWDM.
- II. Performance de enlaces CWDM.
- III. Cálculo de enlace.

# Cálculo de Enlace CWDM



- Se desea hacer un enlace óptico CWDM@10Gb/s de 8 canales de información entre los nodos A y D utilizando el plantel de fibra existente G.652 marca Corning SMF-28e como se muestra en la figura.

# Cálculo de Enlace CWDM

- La distancia total es de 70 km distribuyéndose entre los nodos A, B, C, D de la siguiente manera:
  - A-B=  $d_1 = 30$  Km
  - B-C=  $d_2 = 20$  Km
  - C-D=  $d_3 = 20$  Km
- La fibra entre nodos esta terminada en repartidores ópticos con conectores y acopladores E2000-APC cuya media y máxima pérdida de inserción esperada (atenuación) es indicada.
- La vinculación en los extremos del modulo color y el Mux/Demux, presenta conectores LC-PC cuya media y máxima pérdida de inserción esperada (atenuación) es indicada.
- Se utilizarán patchcords ópticos de 10 mts de longitud que deben despreciarse su atenuación.

# Cálculo de Enlace CWDM

- Al ser una fibra instalada con algunos años, se realizan las mediciones de atenuación y PMD sobre cada uno de los tramos en la ventana de operación del laser emisor de la aplicación elegida.
- Para concretar el sistema multicanal CWDM se pretende utilizar el transponder y Mux/Demux que se detallan mas adelante.
- Se destaca también el criterio de margen de envejecimiento que se deberá adoptar.
- En caso de necesidad, se listan los atenuadores que disponibles para su uso.

# Datos de Fibra y Conectores

Fibra óptica	Corning SMF-28e (ITU-T G.652)
Distancia Enlace ( $d_1 + d_2 + d_3$ )	70 km
Att $d_1$ @1550 nm	7,1 dB
Att $d_2$ @1550 nm	5 dB
Att $d_3$ @1550 nm	4,5 dB
DCmedia@ (1270-1450 nm)	3 ps/(nm*Km)
DCmedia@(1470-1610 nm)	16 ps/(nm*Km)
DGD $d_1$ @1550 nm	4,3 ps
DGD $d_2$ @1550 nm	3,6 ps
DGD $d_3$ @1550 nm	3,2 ps

Atenuación E2000-APC	Medio = 0.15 db Max = 0,25 db
Atenuación LC-PC	Medio = 0.20 db Max = 0,30 db
Margen de envejecimiento estimado	2 db
Atenuadores fijos Disponibles	3 db 4 db 6 db

## Formulas

### Dispersion

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left[ \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km}),$$

for 1200 nm  $\leq$   $\lambda$   $\leq$  1625 nm

$\lambda$  = Operating Wavelength

$\lambda_0$  = 1317 nm (longitud de onda con dispersión nula).  
 $S_0$  = 0.088 ps/(nm\*Km), (pendiente en cero dispersión).

# Datos Módulo Óptico

Módulo Óptico CWDM	Rate 10Gb/s
Tipo de Fibra	G.652, G.655
Máxima Tasa de error de bit	$10^{-15}$
Cantidad de canales sintonizable	8
Rango de Long. de Onda	1470 a 1610 nm (sintonizable)
$PT_{x_{max}}$	+5 dBm
$PT_{x_{min}}$	+1 dBm
$PR_{x_{min}}$	- 24 dBm, -27 dBm (FEC)
$PR_{x_{max}}$	- 8 dBm
Máximo DGD	30 pseg
Máxima Penalidad	2,5 dB

# Datos Módulo Óptico

Módulo Óptico	Tolerancia a DC
1470 nm Channel	962 ps/nm
1490 nm Channel	1052 ps/nm
1510 nm Channel	1142 ps/nm
1530 nm Channel	1233 ps/nm
1550 nm Channel	1324 ps/nm
1570 nm Channel	1415 ps/nm
1590 nm Channel	1508 ps/nm
1610 nm Channel	1600 ps/nm

# Datos Mux / Demux

## Pérdidas Inserción Mux / Demux

Insertion Loss	Max (dB)
OMD-In ⇒ Ch 1_OUT	1.4
OMD-In ⇒ Ch 2_OUT	3.5
OMD-In ⇒ Ch 3_OUT	3.2
OMD-In ⇒ Ch 4_OUT	2.9
OMD-In ⇒ Ch 5_OUT	2.6
OMD-In ⇒ Ch 6_OUT	2.3
OMD-In ⇒ Ch 7_OUT	2.0
OMD-In ⇒ Ch 8_OUT	1.7
Ch 1_In ⇒ OMD-OUT	0.9
Ch 2_In ⇒ OMD-OUT	1.2
Ch 3_In ⇒ OMD-OUT	1.5
Ch 4_In ⇒ OMD-OUT	1.8
Ch 5_In ⇒ OMD-OUT	2.1
Ch 6_In ⇒ OMD-OUT	2.4
Ch 7_In ⇒ OMD-OUT	2.7
Ch 8_In ⇒ OMD-OUT	3.0



***Fin Lección N° 1***

***Parte 2***

Ing. Daniel Torrabadella  
formacion.dotcom@gmail.com



# ***Módulo V***

## **Sistemas Ópticos DWDM**

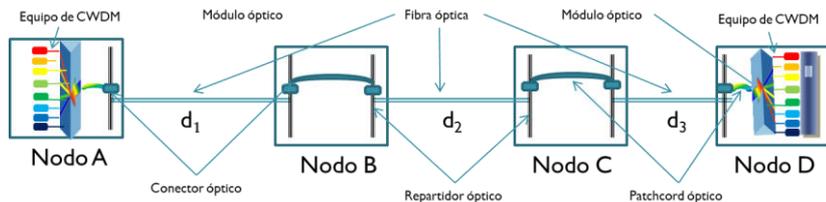
### **Lección N°2**

Ing. Daniel Torradella  
formacion.dotcom@gmail.com

# Agenda

- I. Resultado cálculo de Enlace CWDM (clase anterior)
- II. Características DWDM.
- III. Nuevas modulaciones en la etapa de adaptación al medio.
- IV. Multiplexación / Demultiplexación óptica DWDM.
- V. Etapa de Amplificación.

# Cálculo de Enlace CWDM - Atenuación Min y Max



✓ Atenuación Mux / Demux →

✓ Atenuación Mínima y Máxima

$$\text{MinAtt} = P_{Tx \text{ max}} - P_{Rx \text{ max}} \leq \text{Att elem. pasivos min}$$

$$\text{MaxAtt} = P_{Tx \text{ min}} - P_{Rx \text{ min}} - \text{Max\_PathPenalty} \geq \text{Att elem. pasivos max} + \text{Mar. Env}$$

Canal	OMD-In-> Ch Att. Demux [dB]	Ch -> OMD Out Att. Mux [dB]	Att x Ch Mux/Demux [dB]
1	1,4	0,9	2,3
2	3,5	1,2	4,7
3	3,2	1,5	4,7
4	2,9	1,8	4,7
5	2,6	2,1	4,7
6	2,3	2,4	4,7
7	2	2,7	4,7
8	1,7	3	4,7

	Potencia Tx	Att Mux / Demux	Att1	Att2	Att3	Att Conect.	Margen Envej.	Penalidad	Total Rx	Ponencia Rx	Potencia Rx (FEC)	Resultado
Atenuación Min.	5 dBm (max)	-2,3 dB	-7,1 dB	-5 dB	-4,5 dB	0 dB (min)	0 dB (NA)	0 dB (NA)	-13,9 dBm	-8 dBm	-8 dBm	OK
Atenuación Max.	1 dBm (min)	-4,7 dB	-7,1 dB	-5 dB	-4,5 dB	-2,1 dB (max)	-2 dB	-2,5 dB	-26,9 dBm	-24 dBm	-27 dBm	OK (FEC)

# Cálculo de Enlace CWDM - DC

## ✓ Dispersión Cromática

Canales ópticos (Módulo)	Tolerancia a DC (Módulo)	DC Fibra (70 Km)	Resultado
1470 nm Channel	962 ps/nm	805 ps/nm	OK
1490 nm Channel	1052 ps/nm	894 ps/nm	OK
1510 nm Channel	1142 ps/nm	978 ps/nm	OK
1530 nm Channel	1233 ps/nm	1062 ps/nm	OK
1550 nm Channel	1324 ps/nm	1143 ps/nm	OK
1570 nm Channel	1415 ps/nm	1220 ps/nm	OK
1590 nm Channel	1508 ps/nm	1296 ps/nm	OK
1610 nm Channel	1600 ps/nm	1369 ps/nm	OK

### Dispersion

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left[ \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}),$$

for  $1200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1625 \text{ nm}$

$\lambda$  = Operating Wavelength

$\lambda_0$  = 1317 nm (longitud de onda con dispersión nula).

$S_0$  = 0.088 ps/(nm\*Km), (pendiente en cero dispersión).

# Cálculo de Enlace CWDM - DGD

- ✓ Dispersión de Modo de Polarización:

$$\text{DGDmax FO[ps]} = 3 * \sqrt[2]{4,3^2 + 3,6^2 + 3,2^2}$$

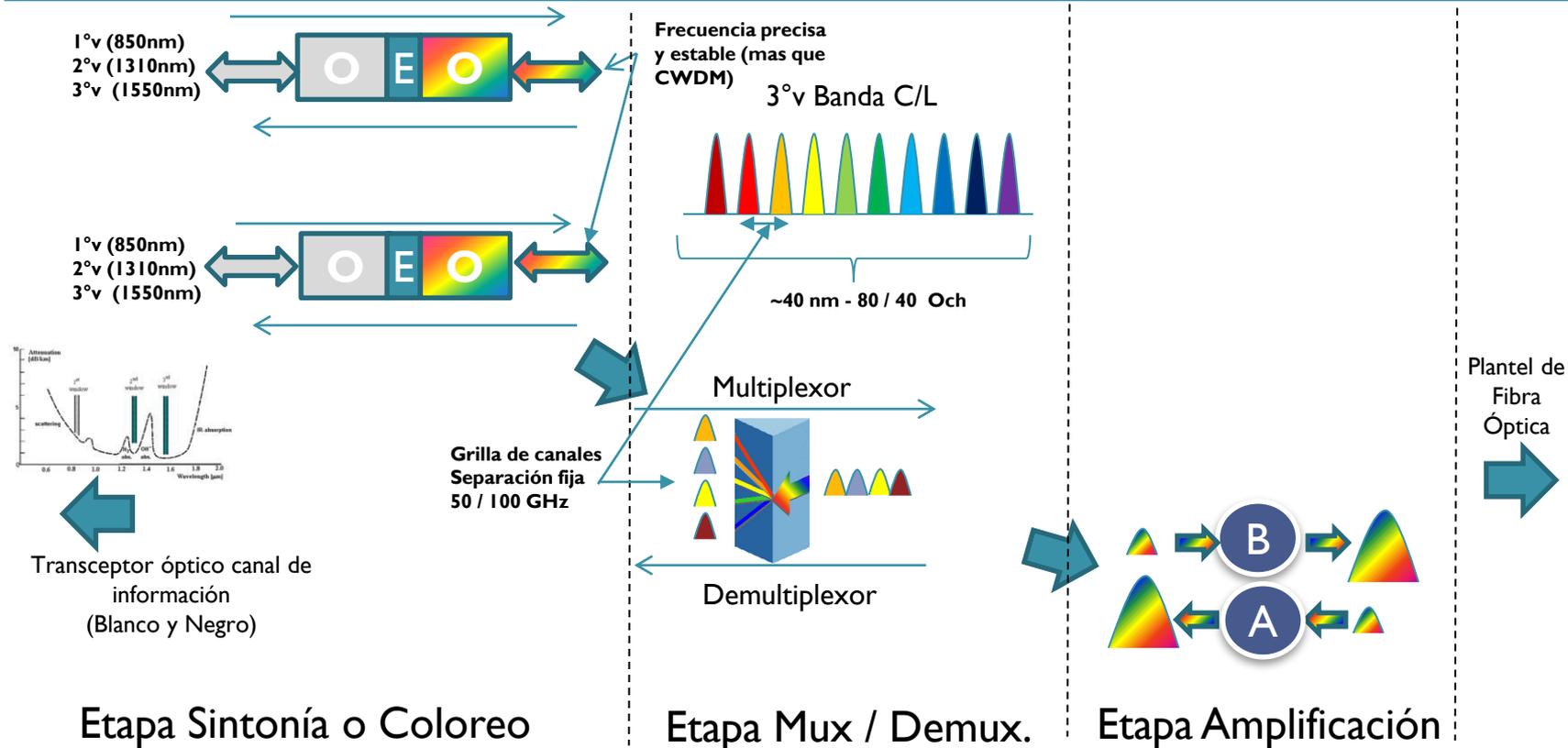
DGD Máximo FO	Tolerancia DGD Módulo	Resultado
19,37 ps	30 ps	OK

- ✓ **Resultado Final:** El sistema CWDM soportará los 8 canales previstos habilitando la función de FEC en el módulo para disponer una tasa de error de bit de  $10^{-15}$

# Agenda

- I. Resultado cálculo de Enlace CWDM (clase anterior)
- II. Características DWDM.
- III. Nuevas modulaciones en la etapa de adaptación al medio.
- IV. Multiplexación / Demultiplexación óptica DWDM.
- V. Etapa de Amplificación (próxima clase).

# Sistemas Ópticos DWDM



# Sistemas Ópticos – DWDM

## ➤ **Sistemas DWDM**

La diferencia básicas en los sistemas DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexer) respecto a CWDM podrían enumerarse como sigue:

- Ampliar la cantidad de canales ópticos.
- Ampliar la velocidad del canal óptico (nuevas modulaciones).
- Ampliar el alcance (Amplificación , nuevos FEC, etc.)

# Sistemas Ópticos – DWDM

## ***I. Ampliación de Capacidad en cantidad de canales ópticos:***

Se amplía la cantidad de canales ópticos pudiendo alcanzar hasta 80 en la banda C en un rango de aproximadamente 40 nm. (veremos mas adelante que la cantidad dependerá de la grilla de separación que se utilice).

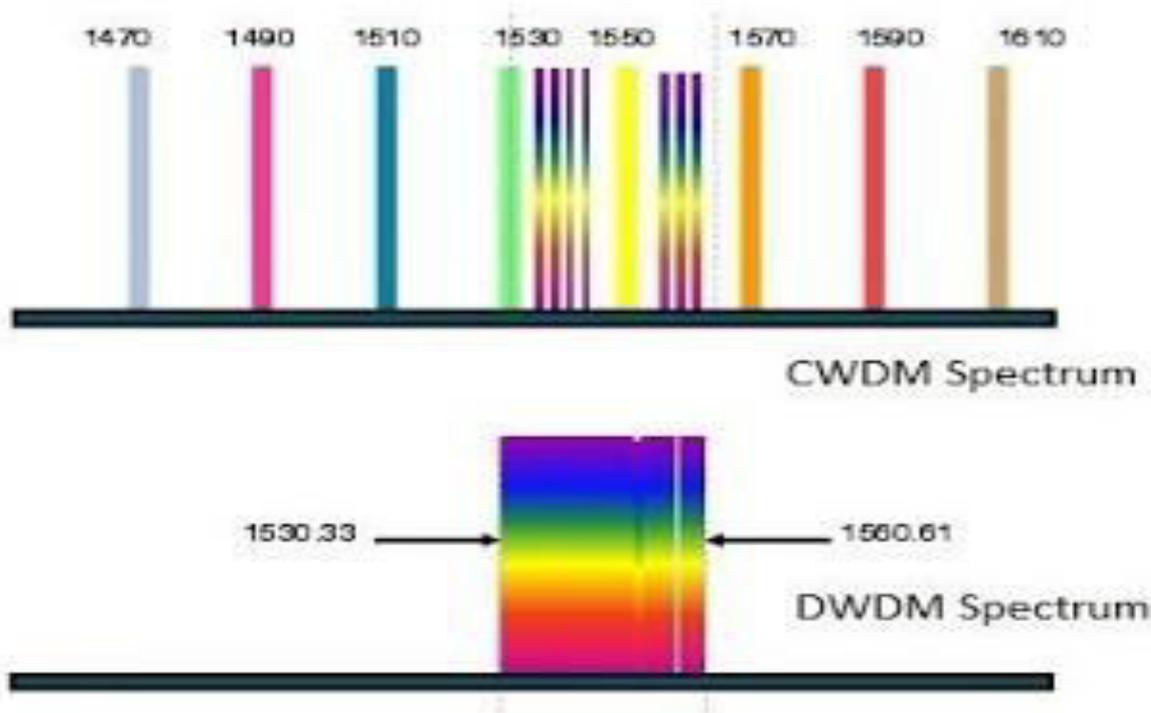
Esto significa que no solo aumenta la cantidad de canales, sino la concentración de los mismos en el espectro (BW de 1 canal CWDM ~ BW de 50 canales DWDM)

CWDM -> 18 canales -> 360 nm

DWDM -> 80 canales -> 40 nm

Esta concentración de canales en un BW reducido de 40 nm da la posibilidad de introducir los Amplificadores.

# Sistemas Ópticos – DWDM



# Sistemas Ópticos – DWDM

## **II. Ampliación de Capacidad en Velocidad del Canal Óptico.**

Los sistemas DWDM están pensados para el transporte de grandes capacidades, por ende, no deben ser limitados como en CWDM a velocidad canal óptico de 10Gb/s.

Para velocidades superiores a 10Gb/s, la dispersión (en sus distintas modalidades) es implacable a la hora de poder llegar al menos, el mismo alcance que a 10Gb/s (aumento de velocidad -> reducción de periodo de información -> ISI por deformación del pulso debido a dispersión de la fibra).

Es por esto que para velocidades superiores a 10Gb/s (a la fecha 800 Gb/s por canal), se utilizan otro tipo de modulación, mas complejas (mas caras) y digitales (QPSK, etc.) que se verán mas adelante dentro de esta etapa de adaptación al medio, junto a los DSP (Digital Signal Processing) en recepción, que permiten ampliar el limite (tolerancia), de la DC, el PMD.

# Sistemas Ópticos – DWDM

## **III. Mayor alcance por Amplificación Óptica.**

Concentrar el espectro en unos 40nm en DWDM donde la fibra se comporta sin mayor variación de atenuación, permitirá la introducción de Amplificadores Ópticos para ampliar el alcance del sistema.

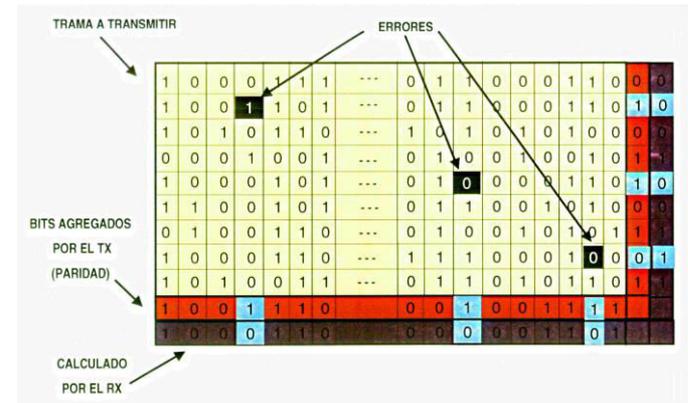
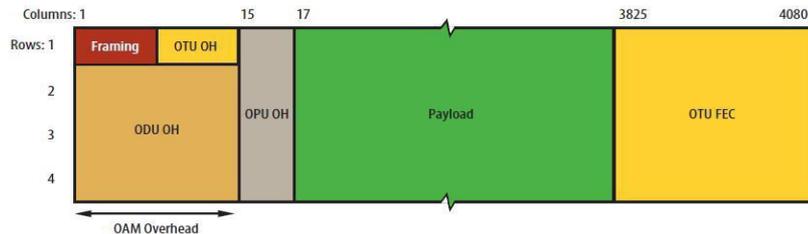
Si cada vez que se atenúe la señal óptica yo podré amplificarla, uno podría pensar de llegar hasta el infinito con un sistema óptico. Pero esto es así?

Lamentablemente, no. El beneficio de lograr un mayor alcance con la introducción de este elemento “activo” traerá como perjuicio la introducción de ruido que tendré que considerarlo en el cálculo de enlace a través del OSNR (Optical Signal Noise Relationship) del enlace completo como se verá mas adelante.

# Sistemas Ópticos – DWDM

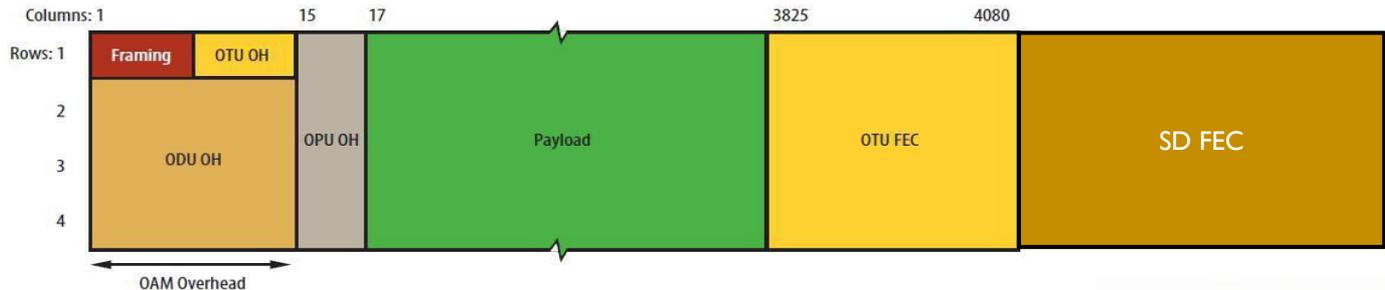
## IV. Mayor alcance por redundancia y procesamiento de Información.

- Al igual que en CWDM, con la introducción de tramas OTN permiten la introducción de un FEC del tipo Reed Solomon llamado HD FEC (Hard Decision FEC). Crece en cantidad de información pero en redundancia para corregir bit a bit.



# Sistemas Ópticos – DWDM

- Adicionalmente al tradicional FEC Reed Solomon (HD-FEC), se incorporan técnicas de SD-FEC (Soft Decision FEC) que, a cambio de incrementar la complejidad, latencia y consumos por procesamiento, se logra mejorar 9 o más dB el alcance del enlace (dependiendo del grado de procesamiento), adicionales a los 3dB ya introducidos por el HD FEC.
- Con el SD-FEC se incrementa un 30% aproximadamente el bit rate con información redundada (igual que en HD-FEC) pero en este caso aparece un tercer nivel (además de 1 y 0) que es el nivel de confianza, en la toma de decisión.



# Agenda

- I. Resultado cálculo de Enlace CWDM (clase anterior)
- II. Características DWDM.
- III. Nuevas modulaciones en la etapa de adaptación al medio.
- IV. Multiplexación / Demultiplexación óptica DWDM.
- V. Etapa de Amplificación.

# Sistemas Ópticos – DWDM - Transponders

## ➤ ***Etapa de sintonía o coloreo.***

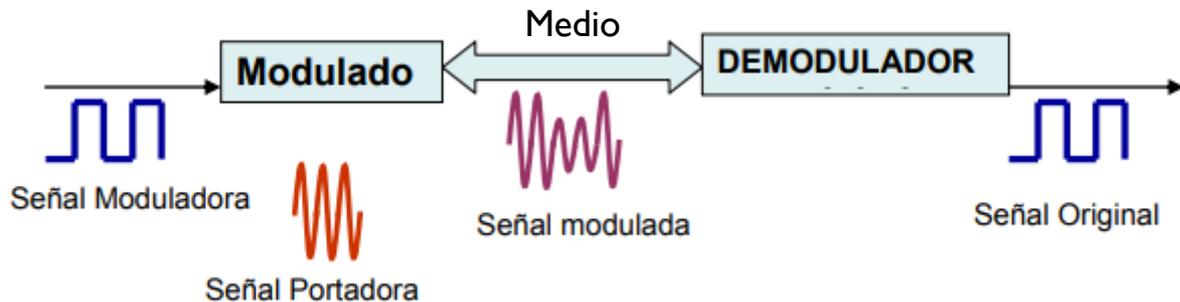
- El elemento de mayor peso del sistema óptico DWDM (costo) es un laser mas preciso y estable para poder trabajar dentro un espectro muy acotado.
- Los osciladores de estos transponders DWDM deberán cumplir dos características básicas:
  - Construidos en tecnologías que permitan tener un ancho espectral muy angosto (tipo de diodo laser).
  - Estabilidad en frecuencia en el tiempo (electrónica) con un control de temperatura que no permita “viajar” mucho dentro de los límites del espectro angosto que estará dado por los filtros del multiplexor.

# Sistemas Ópticos – DWDM - Transponders

## ✓ **Modulación de los Transponders.**

### ❖ **Modulación de los Transponder hasta 10Gb/s.**

- Utilizan un esquema de Detección Directa Modulación por Intensidad (DD-IM) igual que las interfaces “blanco y negro” o CWDM,
- En figura siguiente, se esquematiza lo expresado en un enlace unidireccional.



# Sistemas Ópticos – DWDM - Transponders

## ❖ Limitaciones en el alcance por Modulación DD-IM.

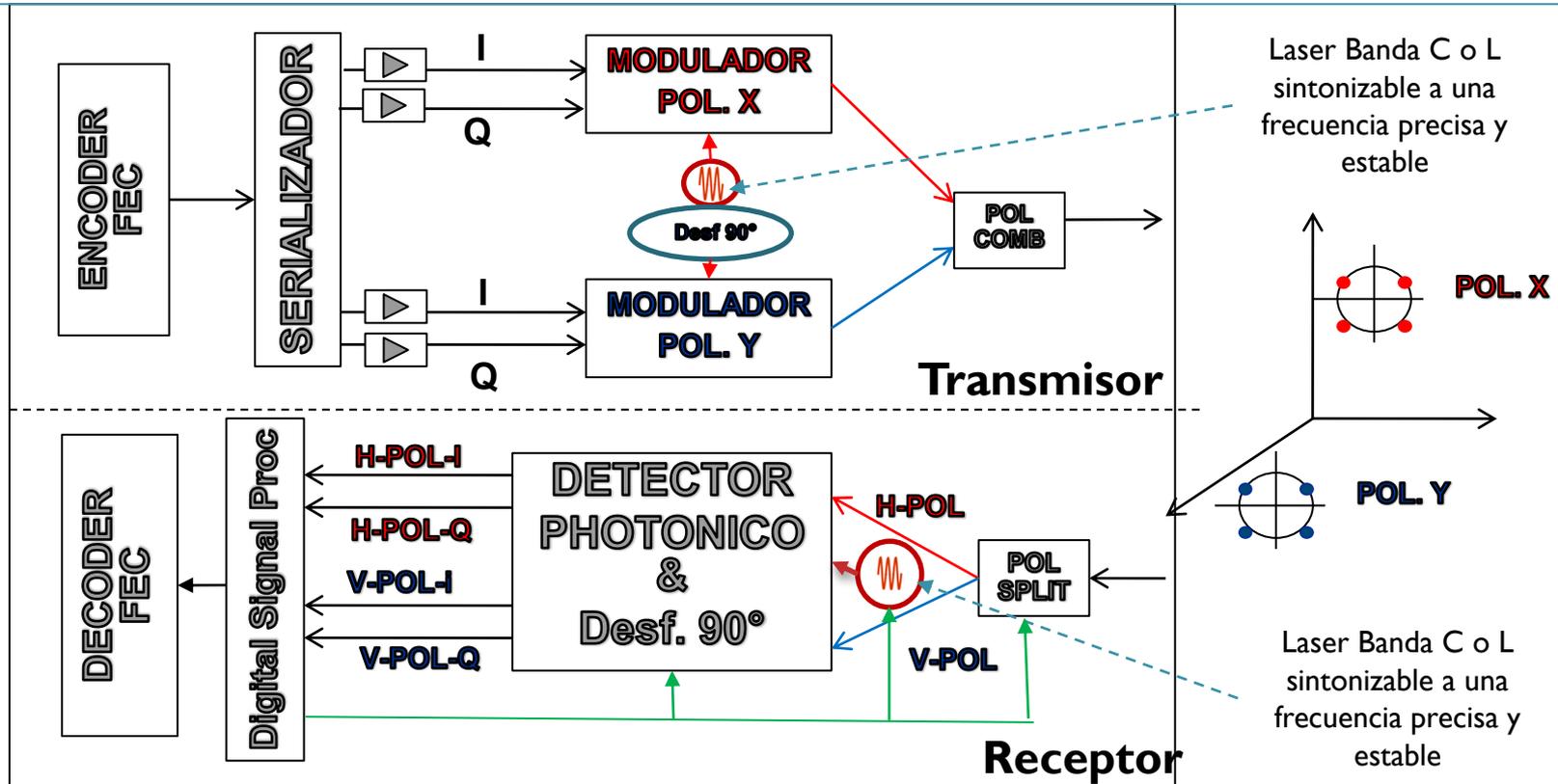
- Con velocidades por encima de los 10 Gb/s las dispersiones en la fibra (cromática y modo de polarización) van reduciendo el alcance con este tipo de modulación por el efecto ISI.
- Para mayores velocidades de información y no recurrir a técnicas de subportadoras (multichannel) de mas baja velocidad (como en las interfases de 100 Gb/s grises), es necesaria cambiar el esquema de modulación.

# Sistemas Ópticos – DWDM – Transponders Coherentes

## ❖ **Modulación de los Transponder superiores a 10Gb/s.**

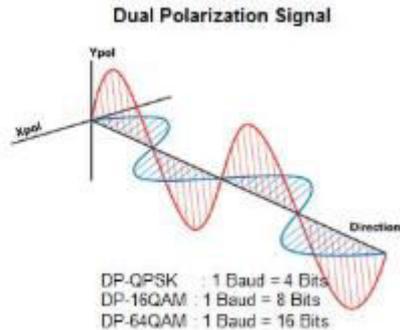
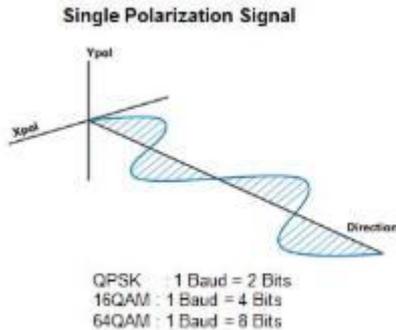
- Para superar la limitación de la modulación DD-IM, recurrir a modulaciones digitales que no solo sean con amplitud de señal, sino también incorporando diferentes fases y polarización de la frecuencia del laser emisor con un DSP en recepción que permite recuperar la información a través por procesamiento digital (idéntico a lo que hacemos en un enlace de radio digital pero a frecuencias del orden de los cientos de THz).
- En los receptores (además del DSP) a fin recuperar la fase, amplitud y reconstruir la señal banda base de unos y ceros (I y Q), ahora deberán disponer de un “sintonizador” en frecuencia que se enganche con la frecuencia de Tx.

# Sistemas Ópticos – DWDM – Transponders Coherentes

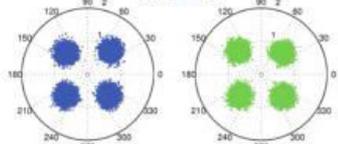


# Sistemas Ópticos – DWDM – Transponders Coherentes

- Las modulaciones digitales en amplitud, fase y polarización mas comúnmente utilizadas son:
  - DP-QPSK (Dual Polarization – Quadrature Phase Shift Keying)
  - DP-16QAM (Dual Polarization – Quadrature Amplitude Modulation)

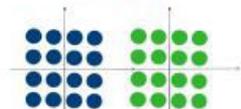


Quaternary Phase Shift Keying (QPSK)



Each polarization carries  
4 phase-states (2 bits)

16 Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM)



Each polarization carries  
16 phase-states (4 bits)

# Sistemas Ópticos – DWDM – Transponders Coherentes

- Para modulaciones digitales (QPSK, etc.) como las que se aplican a partir de 40Gb/s, la presencia de un DSP a lazo cerrado con el oscilador local se hace necesario.
- Este DSP (Digital Signal Processing), a través del procesamiento numérico digital a lazo cerrado de las señales analógicas I y Q, permitirá ampliar el límite (tolerancia), de la DC, el PMD, y corregir la polarización / fase de la portadora.
- Todo este procesamiento se traduce en calor que deberá ser disipado por el conjunto Tx/Rx coherente.
- Mayor procesamiento-> mayor performance -> mayor disipación
- No es un tema trivial la disipación ya que miniaturizar en módulos (MSA) implica llegar a un “trade-off” entre miniaturización y performance óptica.

# Aspecto Físico – Hasta 10 Gb/s

- Al igual que los módulos ópticos CWDM, los primeros módulos ópticos coloreados en DWDM hasta 10Gb/s que se ofrecieron al mercado fue con el factor de forma XFP.
- Los primeros desarrollos fueron no sintonizable (un código de parte por frecuencia) para luego ser sintonizables en toda la banda de trabajo



Espaciamiento de Frecuencias: 80 canales

Tipo de MSA: XFP

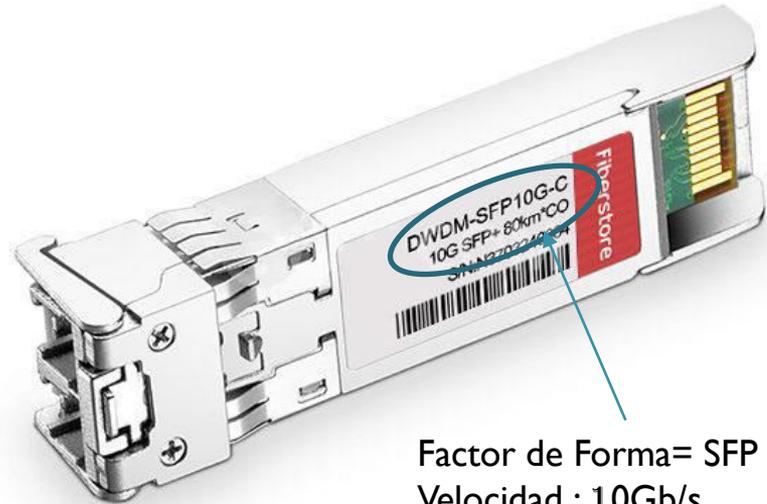
Velocidad: 10Gb/s

Frecuencia: Sintonizable

Estabilidad y espaciamento de canales: DWDM

# Aspecto Físico – Hasta 10 Gb/s

Luego la tecnología llevo a un factor de forma mas pequeño y menos consumo como el SFP+, que en un principio fueron para frecuencia fija para luego ser sintonizables.



Factor de Forma= SFP

Velocidad : 10Gb/s

Estabilidad y espaciamento de canales: DWDM

**CePETel**

Sindicato de los Profesionales  
de las Telecomunicaciones

SECRETARÍA TÉCNICA

Marzo 2022



Instituto Profesional de  
Estudios e Investigación

**DOTCOM**  
FORMACIÓN

# Aspecto Físico – hasta 400 Gb/s

- Como siempre, las primeras implementaciones y de alta performance no están modularizadas.
- La primera estandarización del MSA fue el CFP2 DCO (Digital Coherent Optic) en llevar módulos coherentes con velocidades hasta 400G sintonizables en toda la banda, para mas adelante ir a una solución de menos consumo como el OSFP y otra, de menos consumo aún, como el QSFP-DD.





***BREAK !!!***

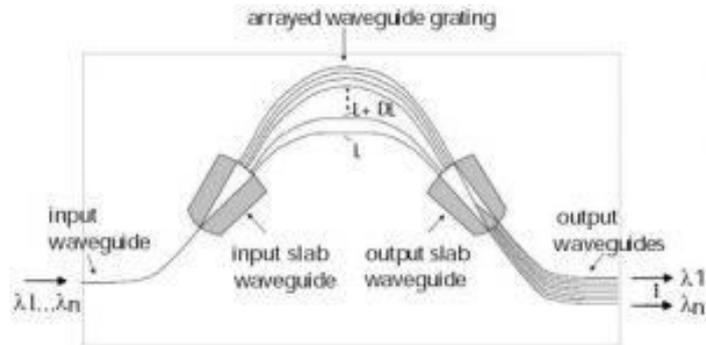
# Agenda

- I. Resultado cálculo de Enlace CWDM (clase anterior)
- II. Características DWDM.
- III. Nuevas modulaciones en la etapa de adaptación al medio.
- IV. Multiplexación / Demultiplexación óptica DWDM.
- V. Etapa de Amplificación.

# Sistemas Ópticos – DWDM – Mux / Demux

## ➤ ***Etapa de Mux / Demux.***

- A diferencia del CWDM en que la separación de canales es de 20nm, en DWDM el ITU-T estandariza varias grilla de separaciones, siendo las mas utilizadas 50 GHz ( $\sim 0,4\text{nm}$ ) o 100 GHz ( $\sim 0,8\text{nm}$ ).
- Las primeras implementaciones fueron realizadas (y siguen utilizándose aún) filtro fijos pasivos en tecnología AWG (Array Waveguide Grating) que presentan una alta estabilidad.



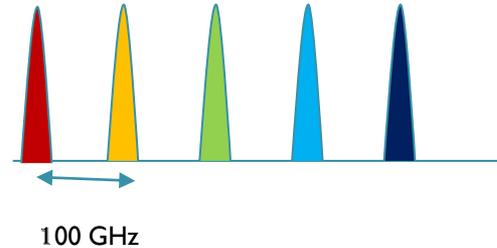
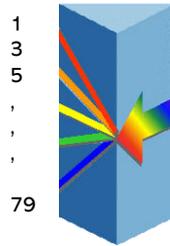
# Sistemas Ópticos – DWDM – Mux / Demux

- Con una grilla de 50 GHz por ejemplo, en el espectro de la Banda C pueden ubicarse entre 80 y 96 canales DWDM dependiendo de cada Fabricante. Si se elige 100 GHz, estos valores pasarán a ser la mitad (entre 40 y 48 canales).
- En los diseños, primero se debe definir cual va a ser la canalización (la grilla a utilizar y por ende la separación de canales) y en que banda se quiere operar (banda C o C+L).
- Como la cantidad de puertos (uno por frecuencia) dependerá de la grilla utilizada, los fabricantes optan por tener dispositivos Mux/Demux para la grilla de 100GHz separándola en canales pares e impares.

# DWDM – Mux / Demux Grilla 100 GHz – Banda C

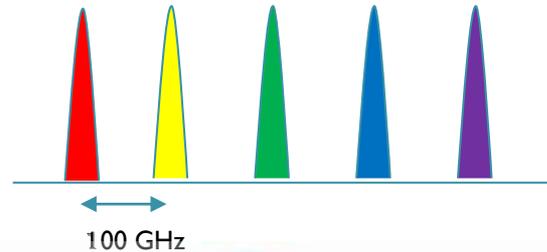
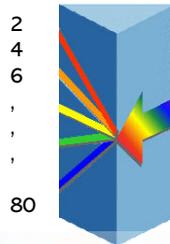
## Grilla 100 GHz (canales impares)

Port / freq



## Grilla 100 GHz (canales pares)

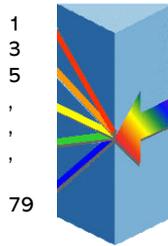
Port / freq



# DWDM – Mux / Demux Grilla 50 GHz – Banda C

Grilla 100 GHz (canales impares)

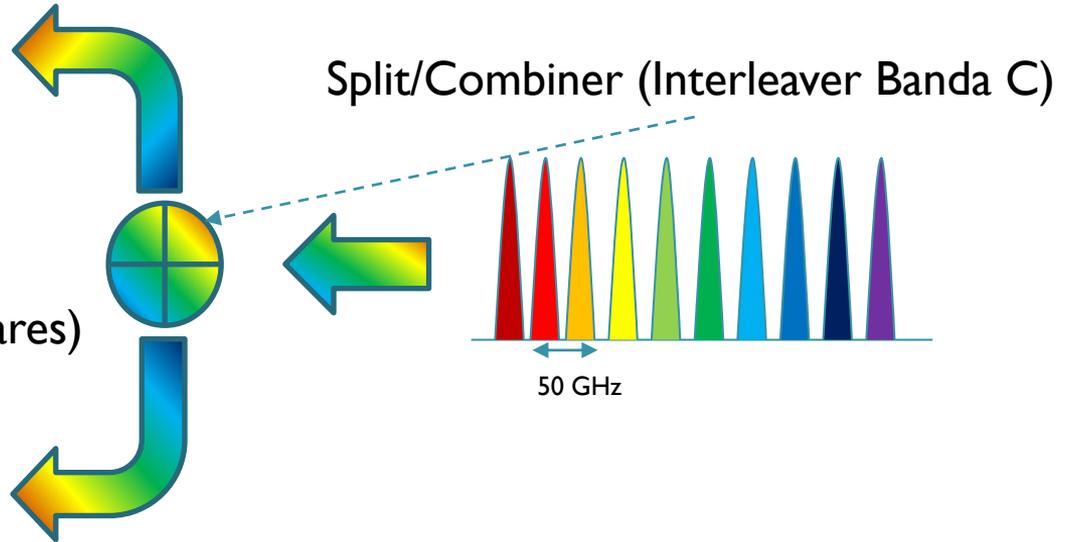
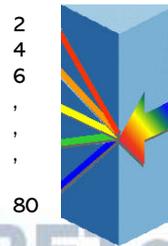
Port / freq



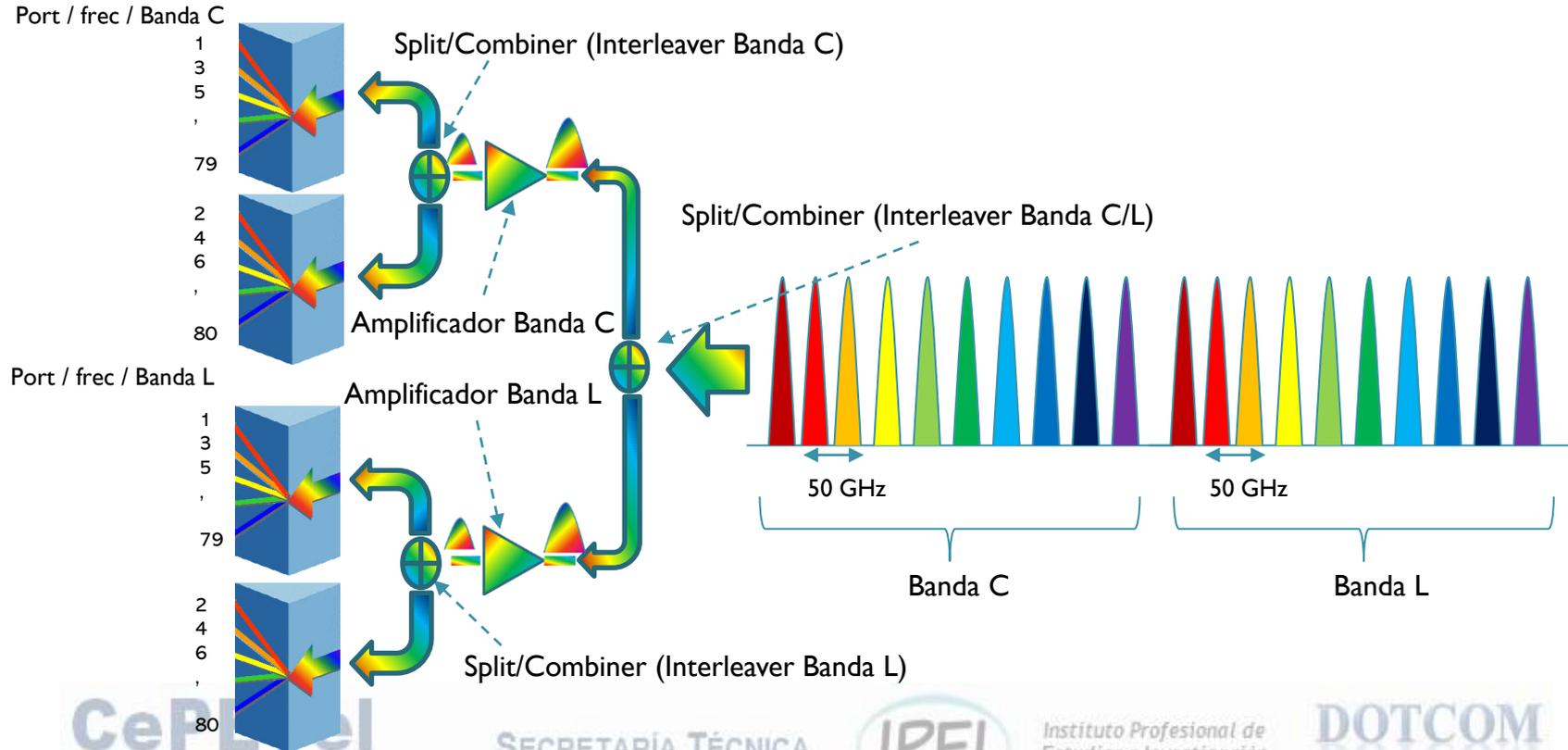
+

Grilla 100 GHz (canales pares)

Port / freq



# DWDM – Mux / Demux Grilla 50 GHz – Banda C+L



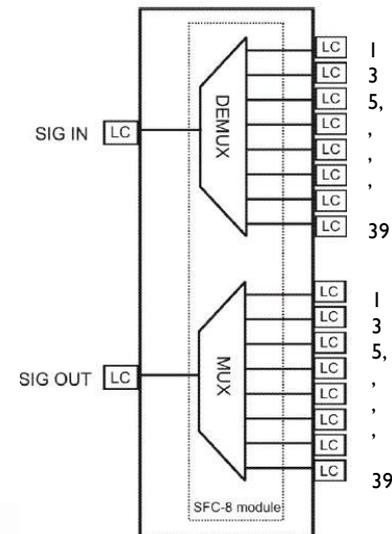
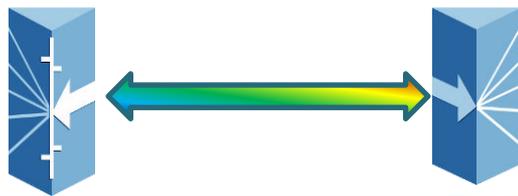
# Sistemas Ópticos DWDM – Mux / Demux

- **Topologías de filtro fijos.**

Existen básicamente dos variantes de Mux/Demux con el objeto de adaptarse a distintas arquitecturas:

**A. Terminal – Sistema Punto a Punto.**

La totalidad de longitudes de onda previstas que integra el sistema óptico DWDM de 40 u 80 canales comenzarán en el extremo A y terminarán en el extremo B.

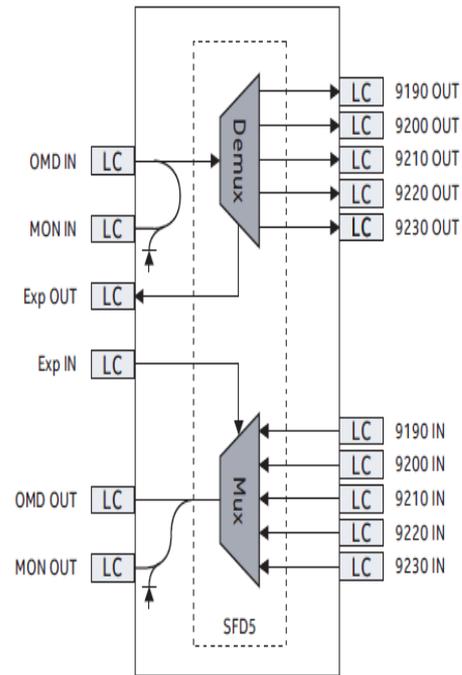
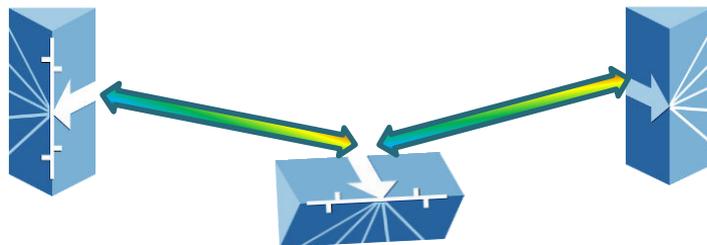


# Sistemas Ópticos DWDM – Mux / Demux

- **Topologías de filtros fijos (continuación).**

**B. FOADM:** Add Drop en punto intermedios.

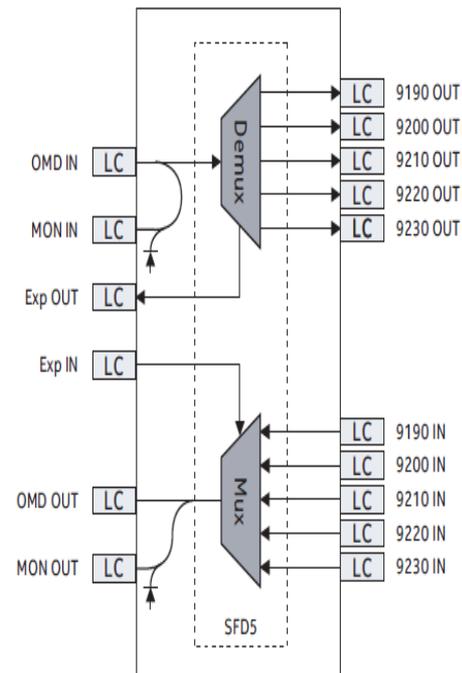
De la totalidad de longitudes de onda previstas que integra el sistema óptico DWDM, algunas bajan/suben en un nodo intermedio y otra continúan y terminarán en el extremo B.



# Sistemas Ópticos DWDM – Mux / Demux

- **Características Técnicas – FOADM (ejemplo)**

SFD5 Loss	OMD In	OMD Out
	Max (dB)	Max (dB)
Ch1	4.2	2.8
Ch2	3.9	3.2
Ch3	3.5	3.5
Ch4	3.2	3.9
Ch5	2.8	4.2
Exp	2	1.4
MON	14.1	14.1



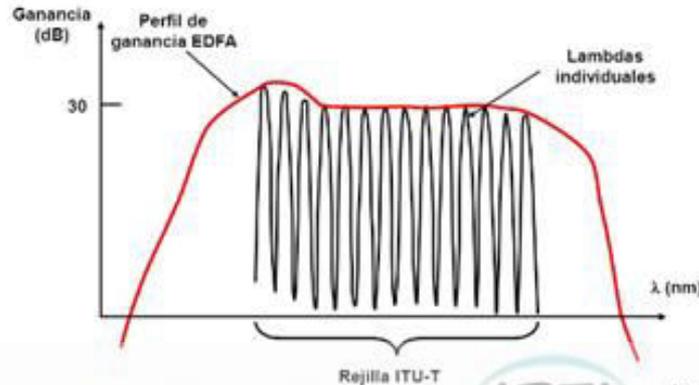
# Agenda

- I. Resultado cálculo de Enlace CWDM (clase anterior)
- II. Características DWDM.
- III. Nuevas modulaciones en la etapa de adaptación al medio.
- IV. Multiplexación / Demultiplexación óptica DWDM.
- V. Etapa de Amplificación.

# Sistemas Ópticos – DWDM – Amplificación

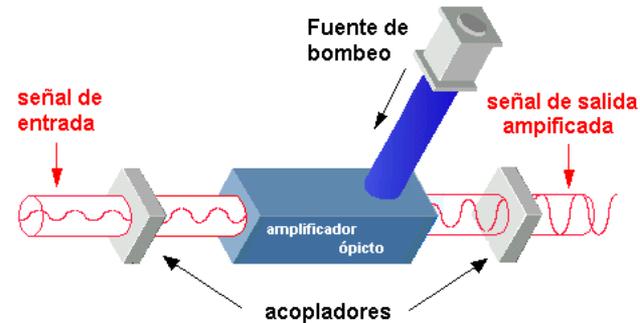
## ➤ **Etapa de Amplificación.**

- Los sistemas DWDM a diferencia de los CWDM, **poseen** sistema de amplificación y los hay para dos bandas separadas (Banda C y Banda L).
- Esto significa, que presentan una buena planicidad en la ganancia (Tilt) en cada banda completa con un espectro del orden de los 40nm.



# Sistemas Ópticos – DWDM – Amplificación

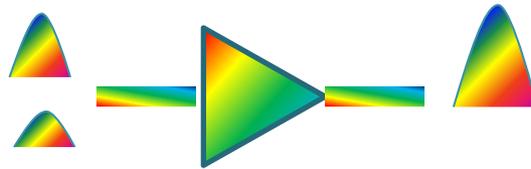
- Los **Amplificadores ópticos** cumplen la función de compensar las pérdidas de potencia por la atenuación de la etapa Mux/Demux + Split/Combiner y la fibra óptica pudiéndose así evitar la regeneración (OEO) de la señal a través de la conversión eléctrica.
- Los tipos de amplificadores mas usados en redes ópticas tienen su principio de funcionamiento mediante la utilización de fuentes de bombeo como se muestra en la siguiente figura.



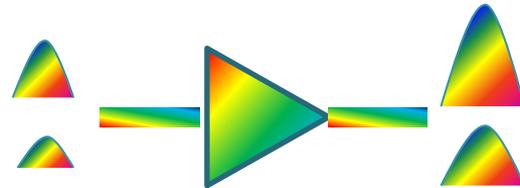
# Sistemas Ópticos – DWDM – Amplificación

- Existen dos formatos de amplificadores:

- **Booster:** Son aquellos que mantienen la potencia de salida constante ante variaciones de la potencia de entrada. La unidad de medida de los Booster es de Potencia [dBm]



- **Preamplificadores:** Son aquellos que mantienen la ganancia constante [dB]. Es decir que ante variaciones de la potencia de entrada, existirá variación de potencia de salida manteniendo la misma proporción de variación.



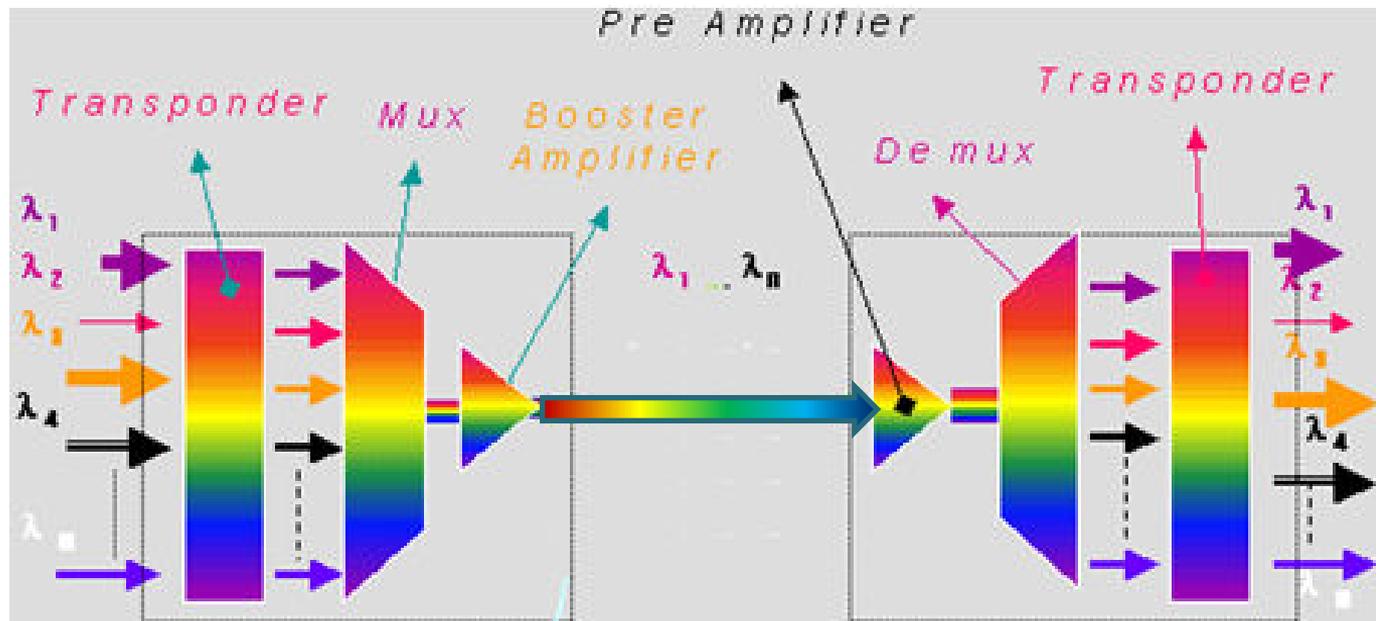
# Sistemas Ópticos – DWDM – Amplificación

## ✓ **Arquitectura de Nodo con Amplificadores.**

### ❖ Nodo Terminal:

- Como vimos en el esquema inicial, los amplificadores se implementan entre los Mux/Demux y el plantel exterior de fibra.
- Los Booster se utilizan a la salida del Mux con el objeto de compensar las atenuaciones del mismo, y “poner” una potencia fija por canal a la entrada del plantel exterior (potencia de lanzamiento).
- Los Preamplificadores se utilizan entre el plantel exterior y la entrada del Demux con el objeto de compensar las atenuaciones del plantel exterior y volver a dejar la misma potencia que tenía a la salida el extremo remoto.

# Sistemas Ópticos – DWDM – Amplificación



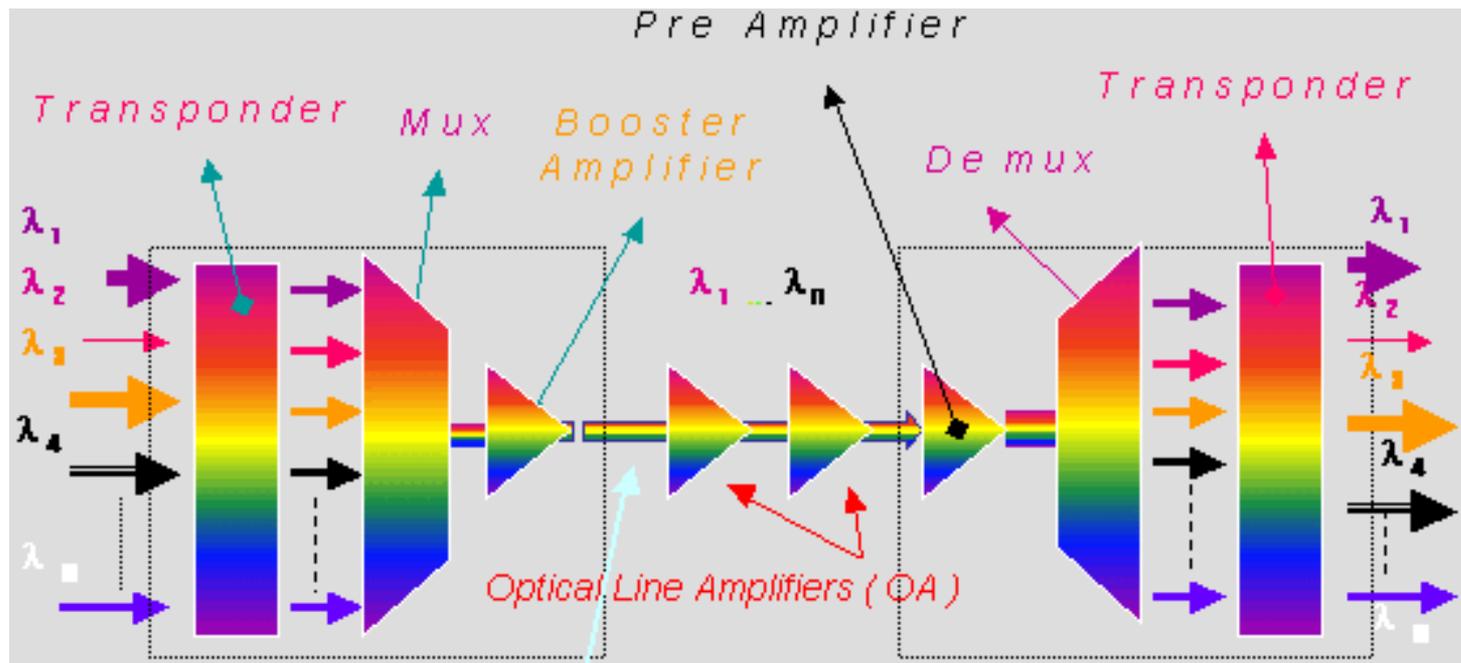
# Sistemas Ópticos – DWDM – Amplificación

## ✓ **Arquitectura de Nodo con Amplificadores.**

### ❖ Nodo Amplificador:

- Estos nodos están compuestos por Preamplificador y/o Booster que podrán colocarse en el trayecto óptico en puntos intermedios del enlace que hagan elevar la potencia que se perdió por la atenuación de la fibra óptica como se muestra en la figura siguiente.
- Este tipo de Nodo se lo conoce como OA (Optical Amplifier) y su principal característica es las señales que se manejan allí son solamente ópticas (nada eléctrico).

# Sistemas Ópticos – DWDM – Amplificación



# Sistemas Ópticos – DWDM – Amplificación

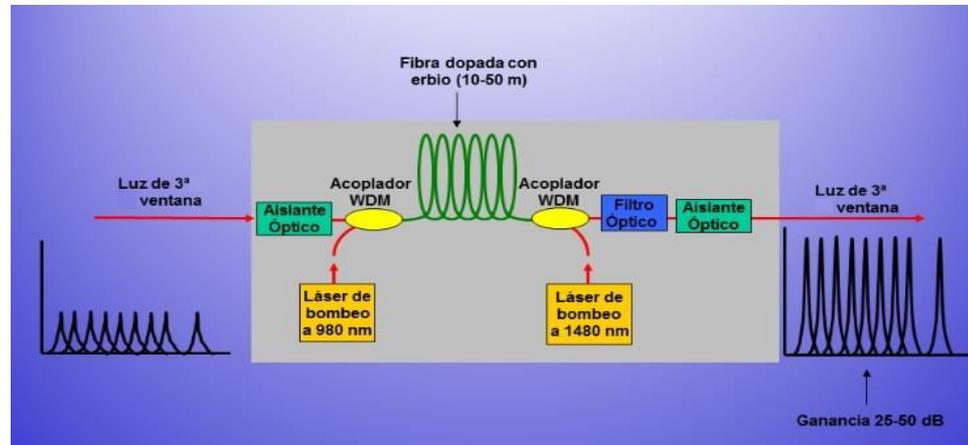
- Como habíamos comentado, la señal óptica no podrá transportarse hasta el infinito amplificando sucesivamente la señal óptica.
- Cada amplificador que se introduce en el enlace amplifica la señal de información pero también adiciona ruido (ASE – Emisión Espontanea Amplificada) que “levanta” el piso de ruido.
- El límite del sistema óptico tendrá como limite cuando el ruido generado por todos los amplificadores haga superar la tolerancia al OSNR (relación señal a ruido óptica) del transponder.
- Todos los amplificadores tienen un parámetro de figura de ruido que es que introducen cada vez que una señal óptica pasa por ellos que se utilizarán en el cálculo de enlace.

# Sistemas Ópticos – DWDM – Amplificación

## ✓ **Tipo de Amplificador.**

### ❖ Amplificador EDFA (Erbium Doper Fiber Amplifier)

Es el amplificador más común. Su principio de funcionamiento es a través de un par de bombas laser que inyecta su potencia a una fibra dopada con Erbio que se encuentra en el interior del mismo amplificador.



# Sistemas Ópticos – DWDM – Amplificación

## ❑ Características Técnicas:

- Figura de Ruido típica entre 3 y 5 db
- Ganancia (Pre-Amplificador) entre 15 y 35 db
- Potencia de salida Máxima (Booster) entre 14 y 23 dBm
- Variación de Ganancia (Tilt) en la banda de operación +/- 0,5 db
- Generalmente dos bombas en las longitudes de onda de 980nm y 1480nm.
- Longitud de fibra dopada con Erbio es función si el amplificador operará en banda C o L

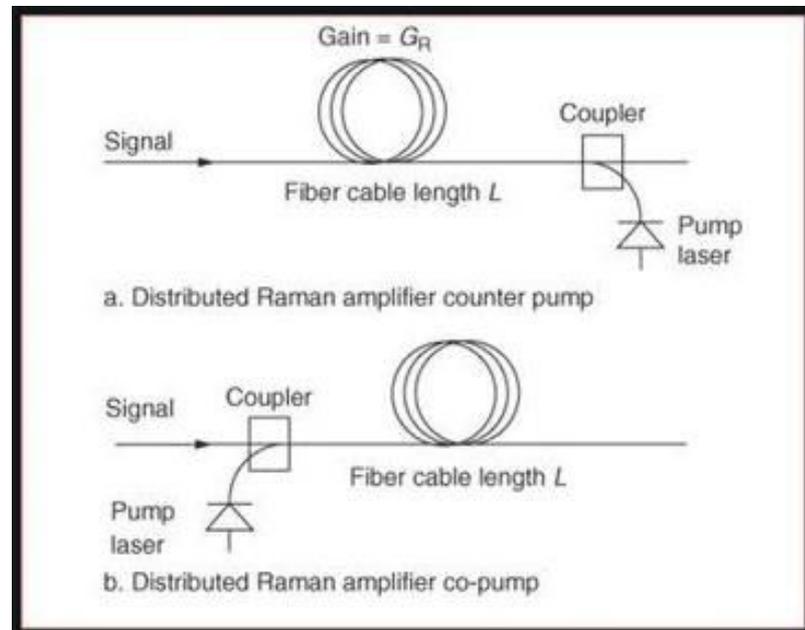
# Sistemas Ópticos – DWDM – Amplificación

## ❖ Amplificador RAMAN.

- Es una variante de amplificador de fibra cuando se necesita buena ganancia y baja figura de ruido.
- A diferencia de los EDFAs los amplificadores Raman se basan en una interacción no lineal entre la señal óptica y la señal de bombeo de alta potencia sobre la fibra convencional del plantel exterior ya instalada .
- La señal de bombeo (fuera de la banda de donde va el servicio) se puede acoplar a la fibra tanto en la misma dirección en la que se transmite la señal (bombeo co-direccional) o en el sentido contrario (bombeo contra-direccional), siendo la mas común esta última.

# Sistemas Ópticos – DWDM – Amplificación

- A diferencia de los EDFA, estos amplificadores ópticos se utilizan solo configurados como Pre-Amplificadores, **[dB]**.
- Dada su ganancia mas baja, estos amplificadores pueden utilizarse acompañados de un EDFA en serie.



# Sistemas Ópticos – DWDM – Amplificación

## □ Características Técnicas:

- Figura de Ruido menor que EDFA
- Ganancia (Pre-Amplificador) entre 6 y 15 db
- Variación de Ganancia (Tilt) en la banda de operación en función de la cantidad de bombas
- Bombas desplazadas 100nm (13 THz) respecto de la banda que se desea amplificar (por ejemplo 1450nm para la banda C).
- Potencia de inyección de la Bomba al plantel óptico en el orden de 30 dBm (1W).



# ***Fin Lección N°2***

Ing. Daniel Torradella  
formacion.dotcom@gmail.com



# ***Módulo VI***

## **Efectos Lineales y No lineales en la Fibra Óptica.**

Ing. Daniel Torrabadella  
formacion.dotcom@gmail.com

# Agenda

- I. Efectos lineales en la fibra óptica
- II. Efectos No lineales en la fibra óptica.  
(Efecto Kerr).
- III. Efectos No lineales en la fibra óptica.  
(Stimulated Scattering).

# Sistemas Ópticos DWDM – Efectos Lineales

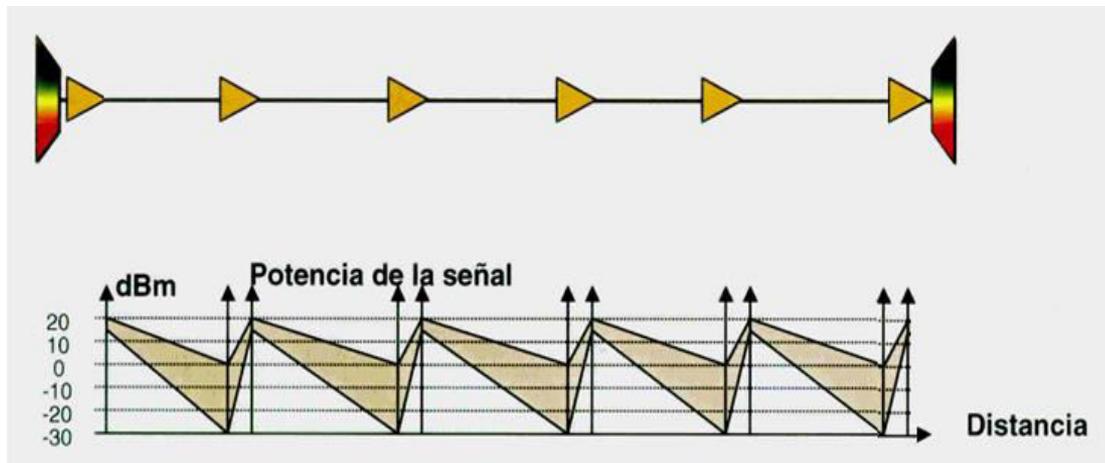
## ➤ **Efectos Lineales**

- Efectos lineales ya hemos vistos tanto en los enlaces con interfaces grises y canales en sistemas CWDM.
- Iremos enumerando nuevamente cada uno de ellos y veremos como impacta en los sistemas DWDM.

# Sistemas Ópticos DWDM – Atenuación

## ✓ Atenuación.

- En DWDM aparece como nuevo elemento en el sistema, el Amplificador óptico en sus dos modalidades de funcionamiento, Booster y Preamplificador.
- Ahora con la introducción del amplificador en los Nodos Terminales y Nodos Amplificadores los niveles de potencias podrán verse:

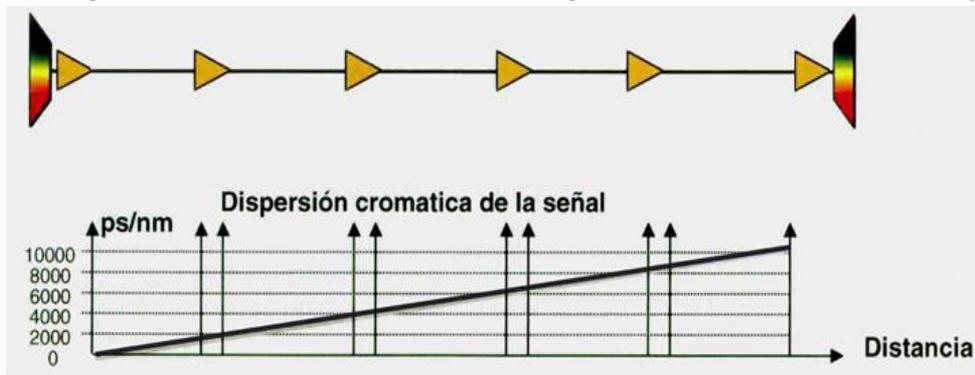


En enlace DWDM la Atenuación Mínima y Máxima del transponder no entrará mas en juego en el cálculo del enlace ópticos.

# Sistemas Ópticos DWDM – Dispersión Cromática

## ✓ Dispersión Cromática (CD).

- Analizando el esquema de red de la figura anterior, veremos ahora como impacta la dispersión cromática de un enlace.
- La dispersión cromática crece en forma lineal con su Coeficiente de Dispersión en la banda de operación del enlace (C y/o L).

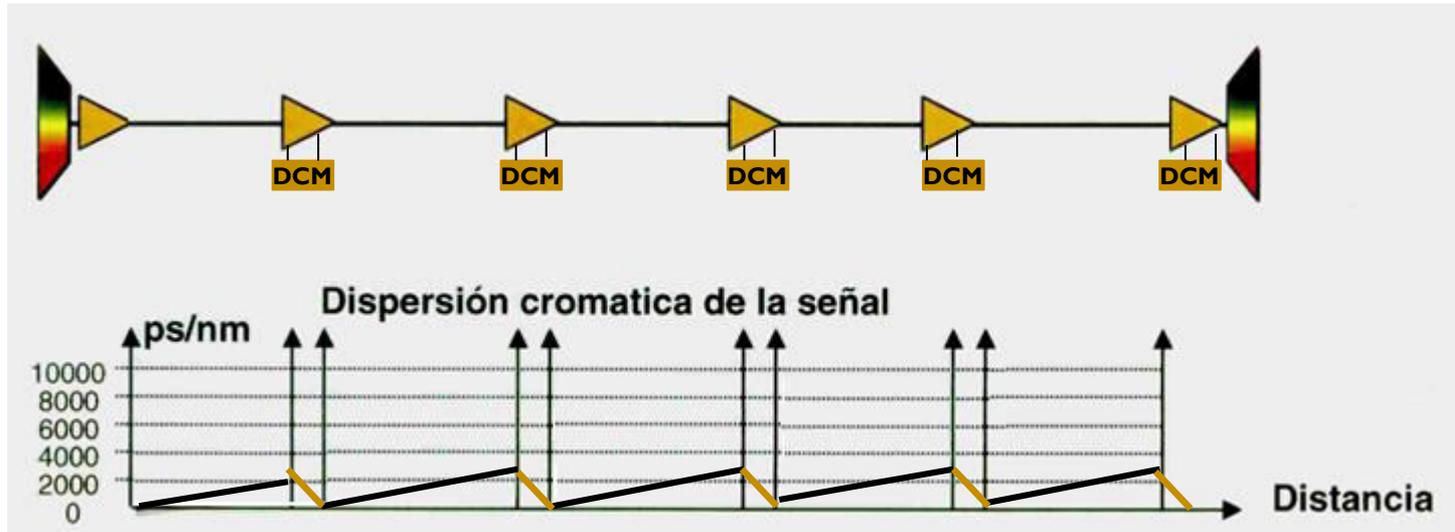


- En **Modulación DD-IM** estas condiciones serán difícil de equalizar sin plantear nada nuevo.
- **En Modulaciones digitales**, el DSP tiene un amplio valor de tolerancia.

# Sistemas Ópticos DWDM – Dispersión Cromática

- Es por este motivo que en sistemas DWDM con modulaciones DD-IM aparece un nuevo elemento nuevo llamado “Compensador de Dispersión Cromática – DCM (Dispersion Compensation Module).
- Existen varias técnicas de módulos de compensación de dispersión. La mas usada es la de fibra dopada que presenta una función inversa a la dispersión de la fibra.
- Para su diseño se toman sus parámetros son el Coeficiente de Dispersión Cromática (pendiente mayor e inversa a la fibra) y su longitud (mts).
- A efectos prácticos se ofrece los Km de tipo de FO (ITU-T G.65x) que compensa y la atenuación que introduce.

# Sistemas Ópticos DWDM – Dispersión Cromática



- Este elemento se intercala en los amplificadores ópticos.

# Sistemas Ópticos DWDM – Dispersión Cromática

- Este DCM es unidireccional (por sentido de Tx con dos conectores ópticos extremos de la fibra interior) y traerá como consecuencia una atenuación adicional (rollo de fibra interior dopada).

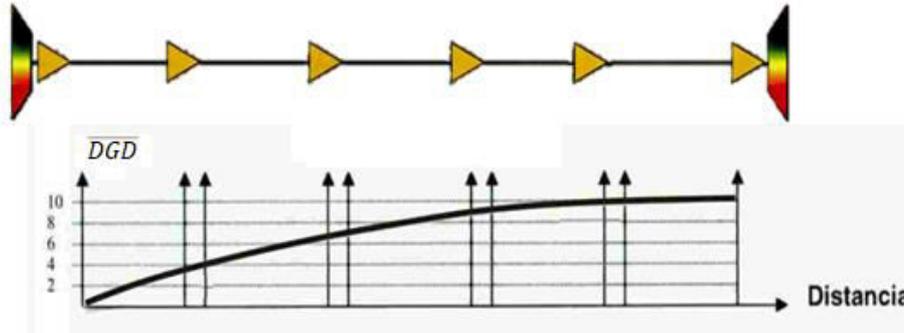


Dispersion Compensation Unit	Loss Value (dB)
DCM - SMF 60km	5.9
DCM - SMF 70km	6.7
DCM - SMF 80km	7.5
DCM - SMF 90km	8.1
DCM - SMF 100km	8.7
DCM - SMF 110km	9.3
DCM - SMF 120km	9.9
DCM - SMF 130km	10.7
DCM - SMF 140km	10.7

# Sistemas Ópticos DWDM – Dispersión Modo de Polarización

## ✓ Dispersión Modo de Polarización (PMD).

- Analizando otra vez el mismo esquema de red de la figura anterior y recordando que es una función raíz de Km.

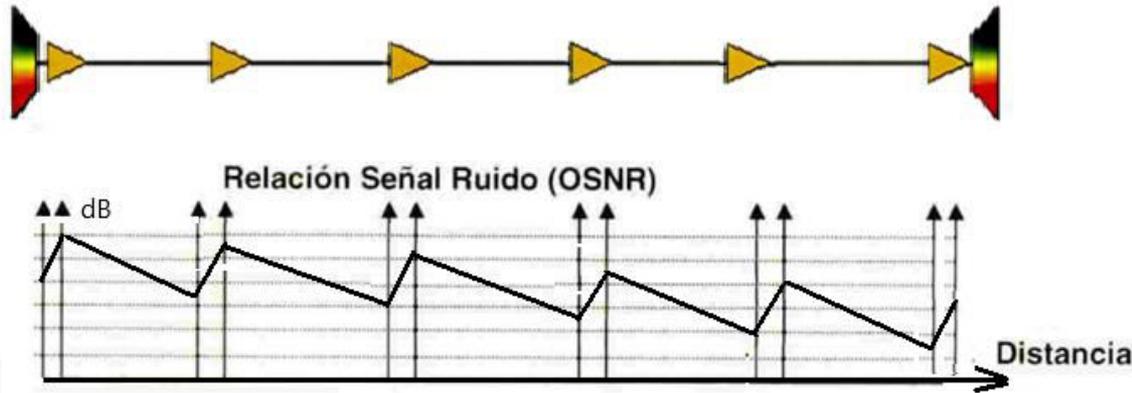


- El DGD en modulación DD-IM es función del período de la velocidad del canal y su valor es el mismo para una interfaz gris, CWDM y DWDM).
- En modulaciones digitales, debido al DSP, la tolerancia al DGD es ampliamente superior al DD-IM

# Sistemas Ópticos DWDM – Relación señal a Ruido

## ✓ Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR).

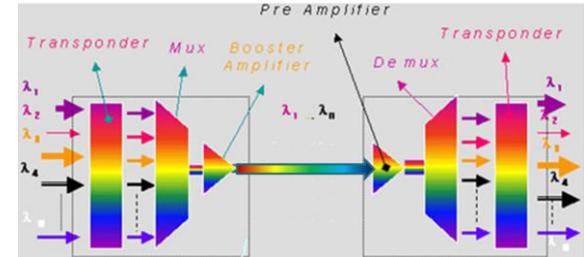
- La introducción del elemento activo del Amplificador Óptico elimina el problema de atenuación pero introduce ruido en el Sistema Óptico.



- Ahora deberemos conocer otra característica técnica del transponder óptico, la “Tolerancia al OSNR”.

# Sistemas Ópticos DWDM – Relación señal a Ruido

- Esa tolerancia la debemos contrastar con el OSNR aportado por el enlace óptico simple (una sección de Amplificación), que es:



$$OSNR[dB] = Ps[dBm] - Att fo [dB] - Nf [dB] - 10xlog(hv\Delta v_0)[dBm]$$

Potencia de salida o lanzamiento de un canal óptico a la FO (Och).

Atenuación de la fibra del vano óptico.

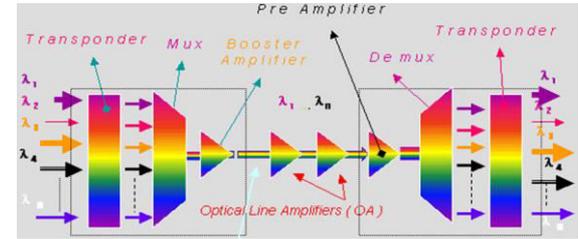
Figura de ruido del Amplificador.

Ruido cuántico de fondo

- Donde:  $10xlog(hv\Delta v_0)$  = - 58 dBm / Grilla 50GHz  
= - 55 dBm / Grilla de 100Ghz

# Sistemas Ópticos DWDM – Relación señal a Ruido

- Si ahora tengo varias secciones de Amplificación **iguales**:



$$OSNR[dB] = P_s [dBm] - Att_{fo} [dB] - Nf [dB] - 10 \log(h\nu\Delta\nu_0)[dBm] - 10 \log(N)[dB]$$

Cantidad de Secciones de Amplificación iguales

- En caso de varias secciones de Amplificación pero de distintas longitudes.... Primero, convertimos a valores nominales (veces) a cada sección y realizamos:

$$\frac{1}{OSNR_{final}} = \frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2} + \frac{1}{OSNR_3} \dots \frac{1}{OSNR_N}$$

El resultado obtenido lo volvemos a pasar a valores relativos (dB)

# Sistemas Ópticos DWDM – Efectos Lineales

Resumiendo efectos lineales.....

- **Atenuación (Máxima):**
  - Se resuelve con Amplificadores que compensen las pérdidas.
- **Dispersión Cromática (DC):**
  - Se resuelve con DCM (DD-IM) -> mayor atenuación -> Amplificadores que compensen las pérdidas
- **Dispersión Modo de Polarización (PMD).**
  - Mismo análisis que interfaces grises/CWDM.
- **Relación a Señal a Ruido óptica (OSNR).**
  - Nuevo límite que debemos verificar.

# Sistemas Ópticos DWDM – Efectos NO Lineales

## ➤ **Efectos NO Lineales**

- Los efectos no lineales, a diferencia de los lineales, aparecen como efectos a partir de la intensidad de la señal y la concentración de longitudes de ondas.
- La presencia de los efectos no lineales en la fibra óptica tiene dos causas principales:
  - Variación del Índice de Refracción de la fibra con el intensidad de campo aplicado (Efecto Kerr).
  - Dispersión Estimulada por intensidad campo aplicado (Scattering)

# Sistemas Ópticos DWDM – Efectos NO Lineales

- Índice de refracción varia con la intensidad del campo aplicado (Efecto Kerr). Los efectos a través de los cuales se manifiesta son:
  - Self Phase Modulation (SPM)
  - Cross Phase Modulation (XPM)
  - Four Wave Mixing (FWM)
- Para altos niveles de potencia, un fenómeno de dispersión (Scattering) estimulada se manifiestan a través de:
  - Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS)
  - Dispersión Estimulada de Raman (SRS)

# Agenda

- I. Etapa de Amplificación (Módulo V).
- II. Efectos lineales en la fibra óptica
- III. Efectos No lineales en la fibra óptica. (Efecto Kerr).
- IV. Efectos No lineales en la fibra óptica. (Stimulated Scattering).

# Efecto Kerr - SPM

## ➤ SPM

- El índice de refracción del material constitutivo de la fibra ( $\eta_0$ ) es un valor medio que varia con la longitud de onda incidente (dispersión cromática).
- Existe también un componente  $\eta_2$  (llamado índice de refracción no lineal) que es función del campo E incidente ( $\frac{dP(t)}{dt}$ ).

$$\vec{E} = \frac{1}{2} \hat{E} * e^{j\phi} \quad \rightarrow \quad \vec{E} = \frac{1}{2} \hat{E} * e^{j\left(\underbrace{\omega_0 * t}_{\text{Componente Temporal}} - \underbrace{\frac{2\pi}{\lambda} * \eta * z}_{\text{Componente propagación}}\right)}$$

Pero :  $\eta = \eta_0 + \eta_2 * I$

$\eta_0$  Índice de refracción del medio

$\eta_2$  Índice de refracción No Lineal

$$\eta_2 \text{ silicio} = 2,6 \cdot 10^{-8} \frac{\mu\text{m}^2}{\text{W}}$$

# SPM – Self Phase Modulation

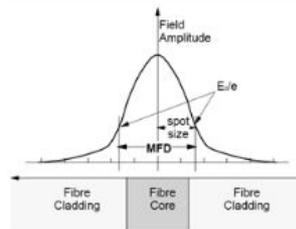
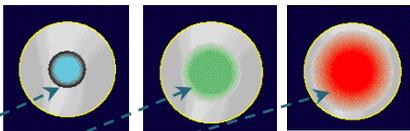
$$\phi = \omega_0 * t - \left( \frac{2\pi}{\lambda} * \eta_0 + \frac{2\pi}{\lambda} * \eta_2 * I \right) * z$$

$$\phi = \omega_0 * t - \beta * z$$

$$\phi = \omega_0 * t - \frac{2\pi}{\lambda} * \eta_0 * z - \frac{2\pi}{\lambda} * \eta_2 * \frac{P}{A_{eff}} * z$$

$$\phi = \omega_0 * t - \beta_0 * z - \gamma * P(z) * z$$

$$A_{ef} = w_0^2$$



$\lambda$ (nm)	Diámetro utilizado por la luz (núcleo de 8,2 $\mu\text{m}$ )
1310	9,2 $\mu\text{m}$
1550	10,4 $\mu\text{m}$

# SPM – Self Phase Modulation

Continuando con la fase no lineal introducida por el SPM:

$$\phi_{NL} = \gamma * P(z) * z$$

La fase no lineal acumulada en la fibra (en toda su longitud):

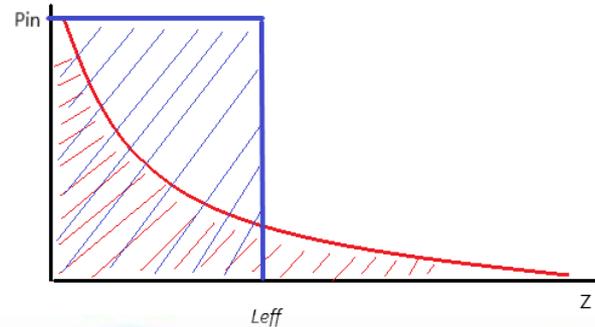
$$\phi_{NL} = \int_0^L \gamma P(z) dz$$

$$\phi_{NL} = \gamma \int_0^L P_{in} e^{-\alpha L} dz$$

$$\phi_{NL} = \gamma * P_{in} * \left( \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \right)$$

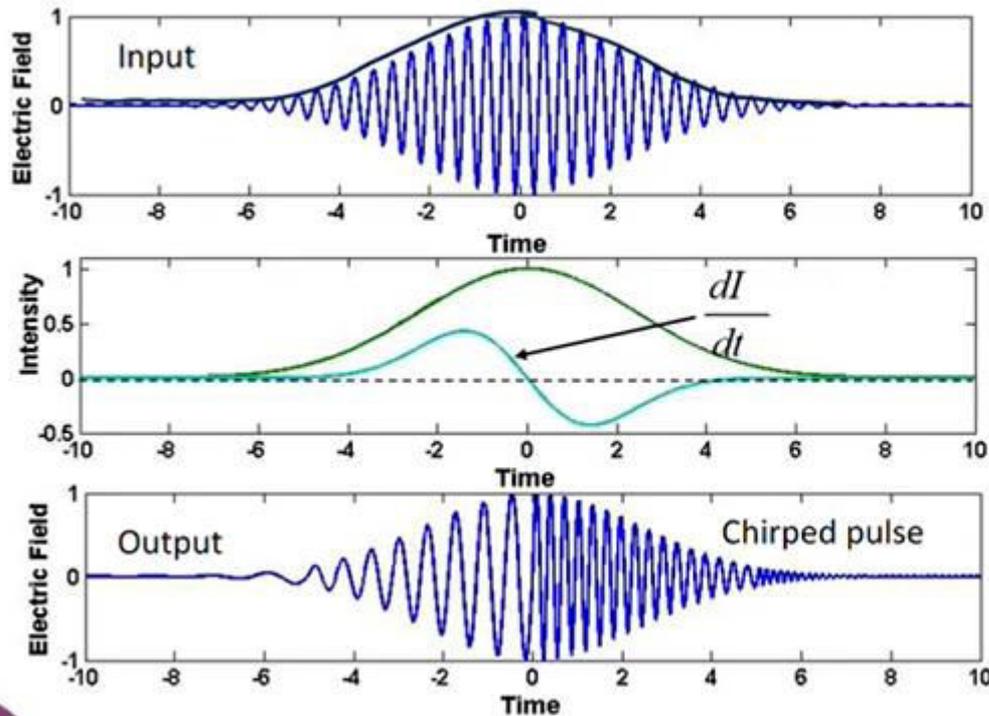
$$\frac{2\pi}{\lambda} * \eta_2 * \frac{1}{A_{eff}}$$

$$L_{eff}$$



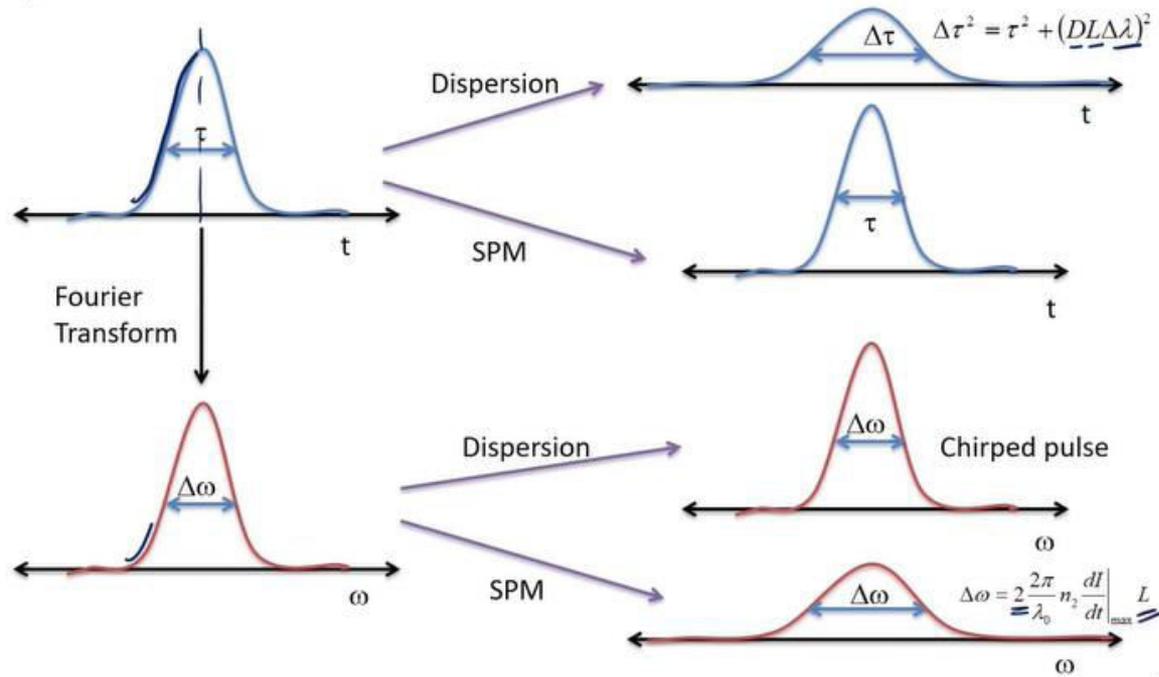
# SPM – Self Phase Modulation

Volviendo a la componente fase y su efecto en la frecuencia (derivada respecto al tiempo):

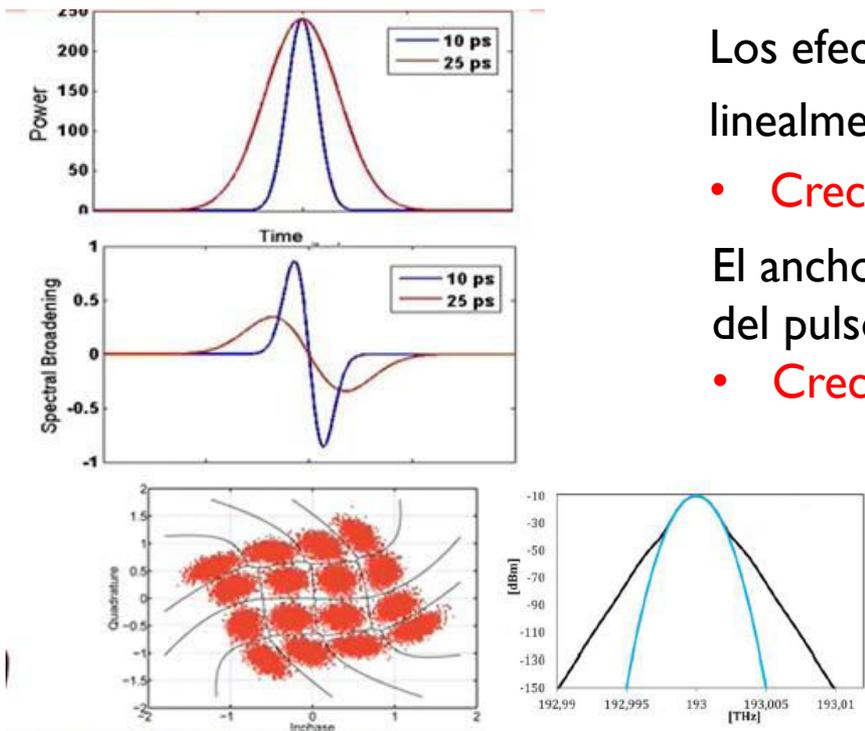


$$\phi = \omega_0 t - \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_0 + n_2 I) z$$
$$\omega = \frac{\partial \phi}{\partial t} = \omega_0 - \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 \frac{dI}{dt} z$$

# DC vs SPM



# SPM – Self Phase Modulation



Los efectos No lineales de SPM escalan linealmente con  $\left(\frac{dP(t)}{dt}\right)$ .

- **Crece con el incremento de la potencia.**

El ancho espectral crece cuando el ancho del pulso decrece (bitrate crece).

- **Crece con el bitrate de información.**
- Se “ensanchan” en frecuencia con modulaciones simple.
- Se “retuerce” modulaciones complejos.



***BREAK !!!***

# Incidencia de dos señales ópticas

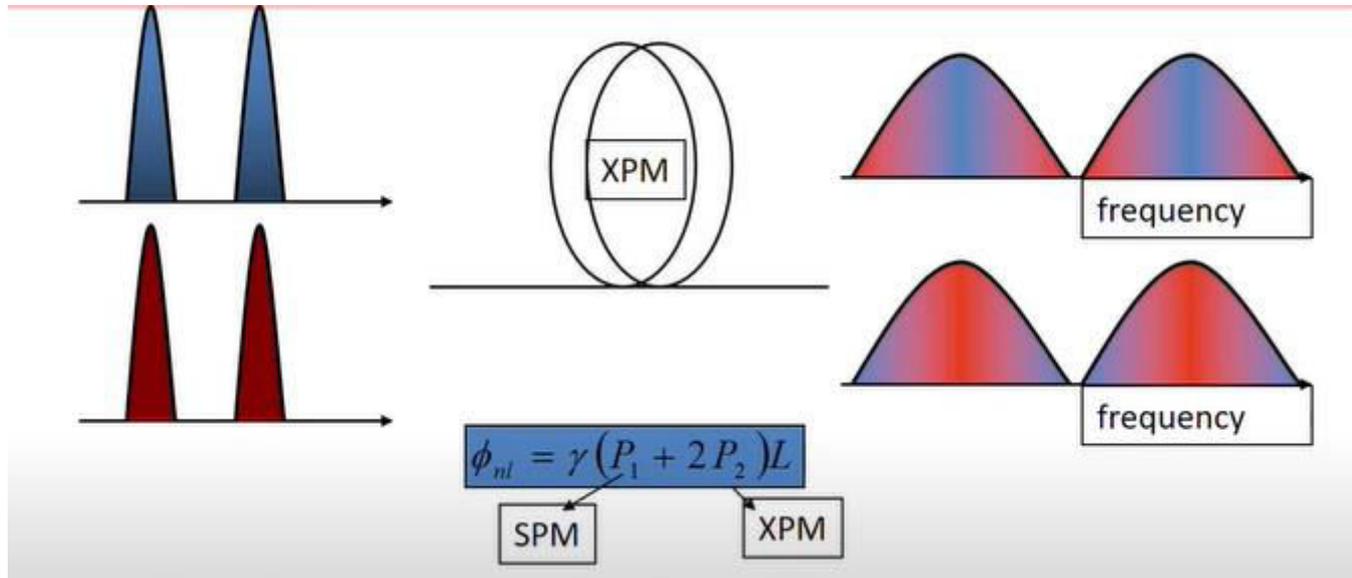
$$\text{Electric field } \vec{E}(z,t) = \frac{1}{2} \left( \hat{E}_1(z) e^{j(\omega_1 t - \beta_1 z)} + \hat{E}_2(z) e^{j(\omega_2 t - \beta_2 z)} + c.c \right)$$

$$P_{NL} = \frac{\epsilon_0 \chi^{(3)}}{8} \left( \begin{aligned} & E_1^3 e^{j(3\omega_1 t - 3\beta_1 z)} + E_2^3 e^{j(3\omega_2 t - 3\beta_2 z)} \\ & + 3|E_1|^2 E_1 e^{j(\omega_1 t - \beta_1 z)} + 6|E_2|^2 E_1 e^{j(\omega_1 t - \beta_1 z)} \\ & + 3|E_2|^2 E_2 e^{j(\omega_2 t - \beta_2 z)} + 6|E_1|^2 E_2 e^{j(\omega_2 t - \beta_2 z)} \\ & + 3|E_1|^2 E_2^* e^{j((2\omega_1 - \omega_2)t - (2\beta_1 - \beta_2)z)} + \\ & 3|E_2|^2 E_1^* e^{j((2\omega_2 - \omega_1)t - (2\beta_2 - \beta_1)z)} + \\ & 3|E_1|^2 E_2 e^{j((2\omega_1 + \omega_2)t - (2\beta_1 + \beta_2)z)} + \\ & 3|E_2|^2 E_1 e^{j((2\omega_2 + \omega_1)t - (2\beta_2 + \beta_1)z)} + cc \end{aligned} \right)$$

SPM

XPM

# XPM – Cross Phase Modulation



Se suma al SPM, pero crece con el doble con la potencia del canal adyacente

# FWM – Four Wave Mixing

## ➤ FWM

- Es un fenómeno que se hace presente con la generación de una frecuencia “fantasma” a partir de la presencia de tres debido a los efectos No lineales en la fibra óptica.

$$\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$$

- Si bien el análisis requiere 3 señales, bien podemos retomar la ecuación vista en el punto anterior para hacer el análisis con 2 señales.

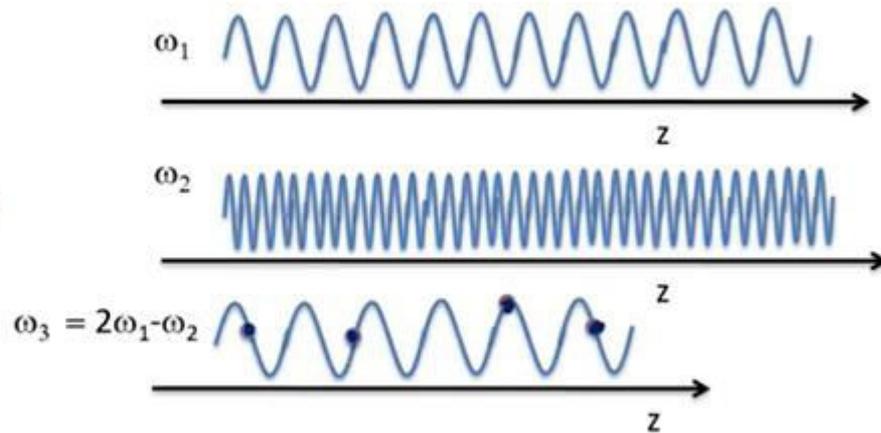
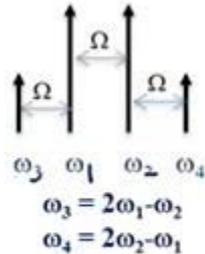
$$\text{Electric field } \bar{E}(z, t) = \frac{1}{2} \left( \hat{E}_1(z) e^{j(\omega_1 t - \beta_1 z)} + \hat{E}_2(z) e^{j(\omega_2 t - \beta_2 z)} + c.c \right)$$

# Incidencia de dos señales ópticas

$$P_{NL} = \frac{\epsilon_0 \chi^{(3)}}{8} \left( \begin{aligned} & E_1^3 e^{j(3\omega_1 t - 3\beta_1 z)} + E_2^3 e^{j(3\omega_2 t - 3\beta_2 z)} \\ & + 3|E_1|^2 E_1 e^{j(\omega_1 t - \beta_1 z)} + 6|E_2|^2 E_1 e^{j(\omega_1 t - \beta_1 z)} \\ & + 3|E_2|^2 E_2 e^{j(\omega_2 t - \beta_2 z)} + 6|E_1|^2 E_2 e^{j(\omega_2 t - \beta_2 z)} \\ & + 3|E_1|^2 E_2^* e^{j((2\omega_1 - \omega_2)t - (2\beta_1 - \beta_2)z)} + \\ & 3|E_2|^2 E_1^* e^{j((2\omega_2 - \omega_1)t - (2\beta_2 - \beta_1)z)} + \\ & 3|E_1|^2 E_2 e^{j((2\omega_1 + \omega_2)t - (2\beta_1 + \beta_2)z)} \\ & 3|E_2|^2 E_1 e^{j((2\omega_2 + \omega_1)t - (2\beta_2 + \beta_1)z)} + cc \end{aligned} \right)$$

SPM (indicated by a blue dashed arrow pointing to the first two terms)  
XPM (indicated by a green dashed arrow pointing to the fourth and fifth terms)  
FWM (indicated by a red dashed arrow pointing to the sixth and seventh terms)

# FWM – Four Wave Mixing



$\omega_3$  existe y se propaga en el medio de la FO solo cuando se cumple que su fase cumpla con:

$$e^{j((2\omega_1 - \omega_2)t - (2\beta_1 - \beta_2)z)}$$

$$\omega_3 = 2\omega_1 - \omega_2$$

$$\beta_3 = 2\beta_1 - \beta_2$$

# FWM – Four Wave Mixing

Significa que si:

$$\beta_3 = 2\beta_1 - \beta_2 \quad \Rightarrow \quad \beta(\omega_3) = 2\beta(\omega_1) - \beta(\omega_2)$$

Entonces:

$$\frac{2\pi}{\lambda_3} \eta = 2 \frac{2\pi}{\lambda_1} \eta - \frac{2\pi}{\lambda_2} \eta \quad \Rightarrow \quad \eta = \eta_0 + \eta_2 * I$$

$$\frac{2\pi\omega_3}{c} \eta_0 = 2 \frac{2\pi\omega_1}{c} \eta_0 - \frac{2\pi\omega_2}{c} \eta_0$$

Como:

$$\omega_3 = 2\omega_1 - \omega_2 \quad \Rightarrow \quad \eta_0(\omega_3) = \eta_0(\omega_1) = \eta_0(\omega_2) \text{ ???}$$

**$\eta_0$**  es dependiente de la longitud de onda / frecuencia

# FWM – Four Wave Mixing

Volviendo a la ecuación de  $\beta$  vemos de que manera puede igualarse....

$$\beta(\omega_3) = 2\beta(\omega_1) - \beta(\omega_2) \quad \Rightarrow \quad \Delta\beta = \beta(\omega_3) - [2\beta(\omega_1) - \beta(\omega_2)]$$

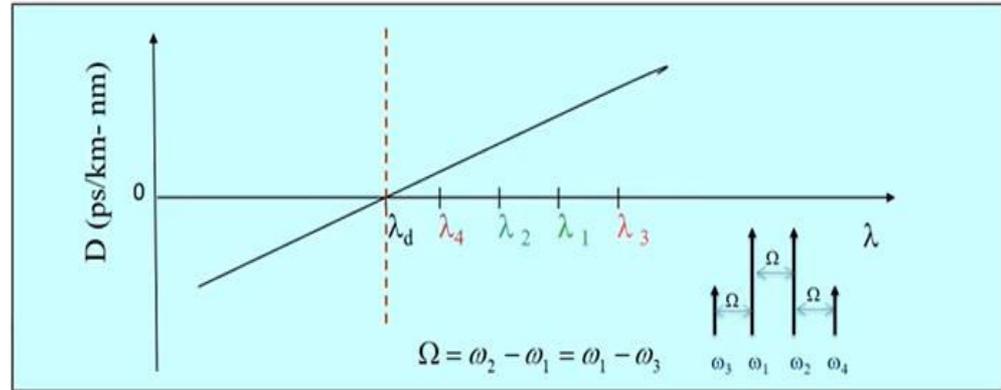
Luego de pasos matemáticos...

$$\Delta\beta = \beta_2 * \Omega^2$$

$$\lim_{\Delta\beta \rightarrow 0} \Delta\beta = \lim_{\Delta\beta \rightarrow 0} \beta_2 * \Omega^2$$

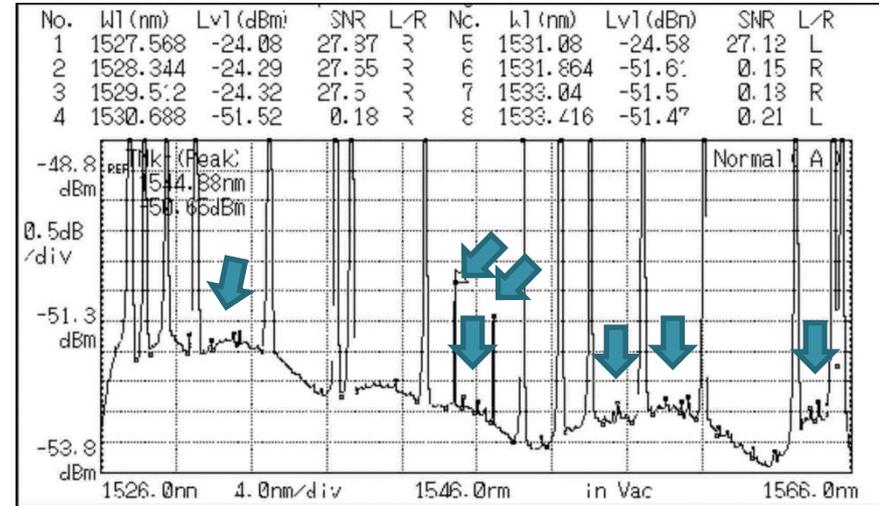
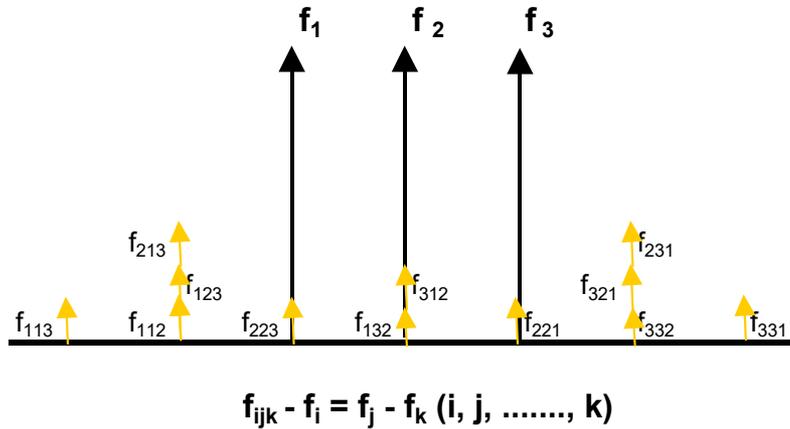
$\omega / \lambda$  con DC~0

$\Omega \rightarrow 0$



Siendo  $\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2$  el parámetro GVD (dispersión de velocidad de grupo).  
Determina cuánto se ensancharía un impulso al propagarse dentro de la fibra.

# FWM – Four Wave Mixing



# Resumen Efecto Kerr

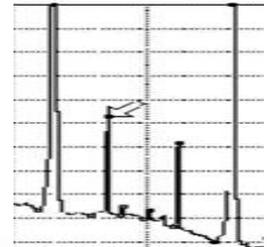
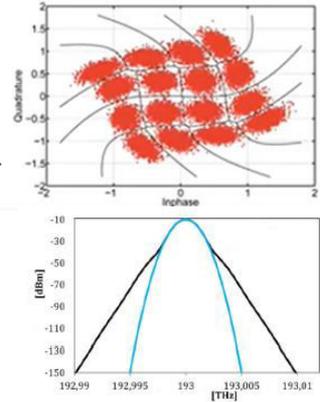
$$P_{(NL-SPM)}(\omega_1) = f \left\{ (P_{in(\omega_1)}, \text{Baudrate}, L_{eff}) / (A_{eff}) \right\}$$

$$P_{(NL-XPM)}(\omega_1) = f \left\{ (P_{in(\omega_2)}, \text{Baudrate}, L_{eff}) / (A_{eff}, \Delta w) \right\}$$

$$P_{(NL-FWM)}(\omega_4) = f \left\{ (P_{in(\omega_1)}, P_{in(\omega_2)}, P_{in(\omega_3)}, L_{eff}) / (A_{eff}, DC, \Delta w^2) \right\}$$

DC ~ 0

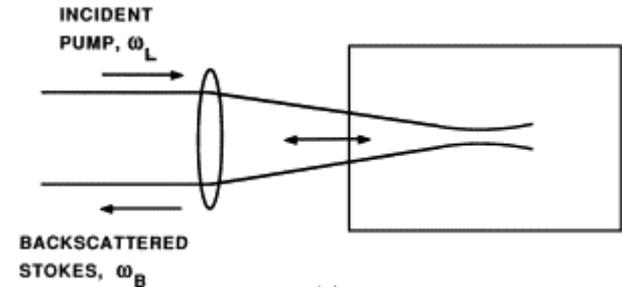
Reduce canales utilizables  
Limita Longitud de enlace



# SRS – Stimulated Brillouin Scattering

## ➤ **SBS**

- Es la interacción de un fotón de alta potencia de una longitud de onda incidente contra las moléculas que produce:
  - A) Una onda “acústica” de vibración (fonón) en las moléculas de la fibra.
  - B) Una onda lumínica llamada “Stokes”, con una frecuencia menor (11 GHz), que se propaga en dirección opuesta a la onda incidente.



# SRS – Stimulated Brillouin Scattering

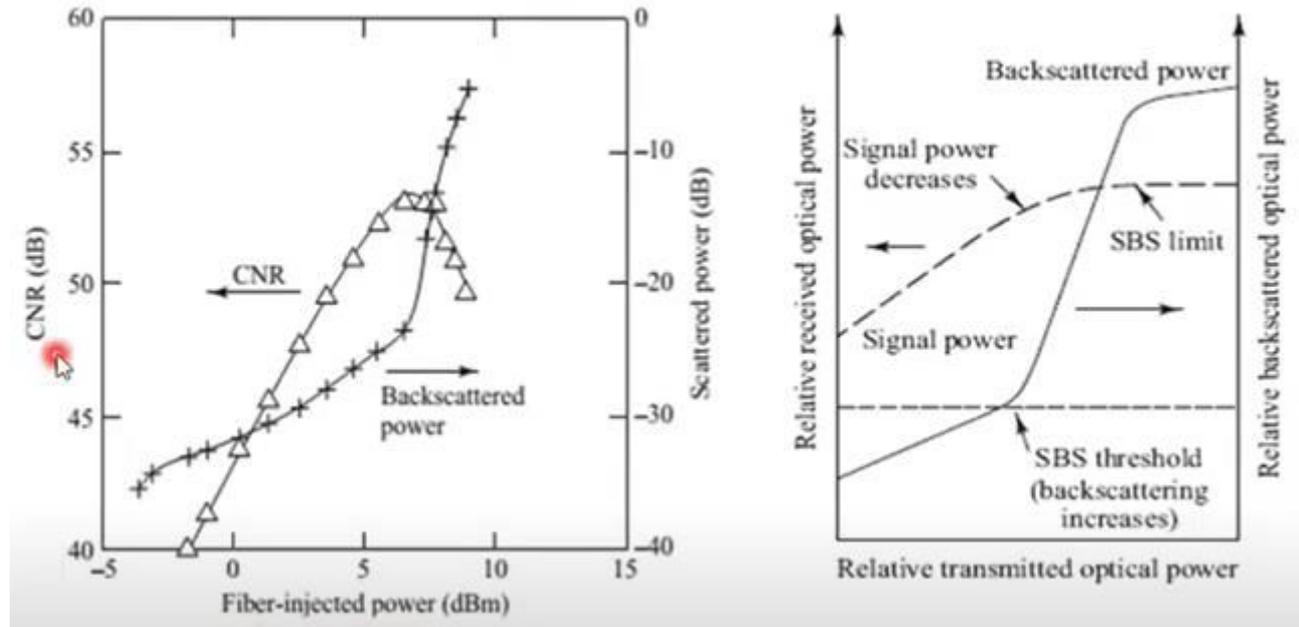
- Un importante parámetro de este efecto no lineal es la potencia límite en SBS, en el cual la potencia incidente y la potencia dispersada son iguales;
- Este valor de la potencia límite puede ser calculado por:

$$P_{\text{lim}}(\text{SBS}) \approx \frac{21A_e}{g_B L_d}$$

- Por debajo del umbral llamado “SBS Threshold” la potencia de la señal puede crecer linealmente siendo el efecto SBS despreciable.
- Por encima de este umbral, ante un incremento de la potencia de la señal se evidencia una reducción de la potencia dentro de la fibra.

# SRS – Stimulated Brillouin Scattering

- Este efecto SBS solo afecta la potencia del mismo canal.



# SRS – Stimulated Raman Scattering

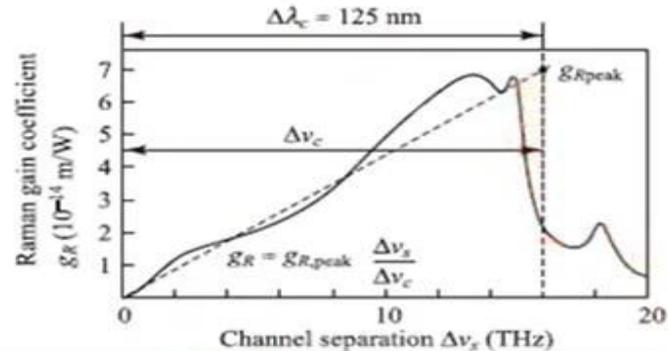
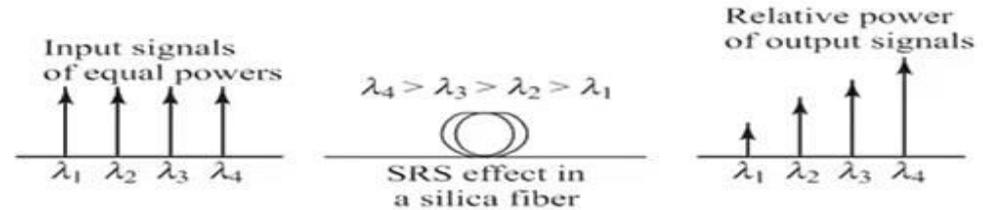
## ➤ SRS

- Es la interacción de un fotón de longitud de onda incidente con energía  $h\nu_1$  con las moléculas de la fibra que producen:
  - A) Una vibración ( $V_m$ ) que queda absorbida en la molécula.
  - B) Se libera otro el fotón de mas baja frecuencia  $\nu_2$  (alta longitud de onda) y energía  $h\nu_2$  en el mismo sentido de la onda incidente. Es decir que es un “generador” o “bomba inyectora” de ondas
- Si esta nueva longitud de onda ( $\nu_2$ ) coincide con otra existente, la misma es amplificada. El límite de potencia debido a SRS es el nivel crítico en el cual la potencia incidente y la potencia dispersada son iguales,

# SRS – Stimulated Raman Scattering

- La potencia transferida a esta nueva longitud de onda crece linealmente con espaciamento de longitudes de ondas hasta 125 nm aproximadamente (@1550 nm)

$$P_{\text{limit}} \approx \frac{16A_{\text{eff}}}{g_R L_{\text{eff}}}$$





# ***Fin Lección N° 3***

Ing. Daniel Torrabadella  
formacion.dotcom@gmail.com



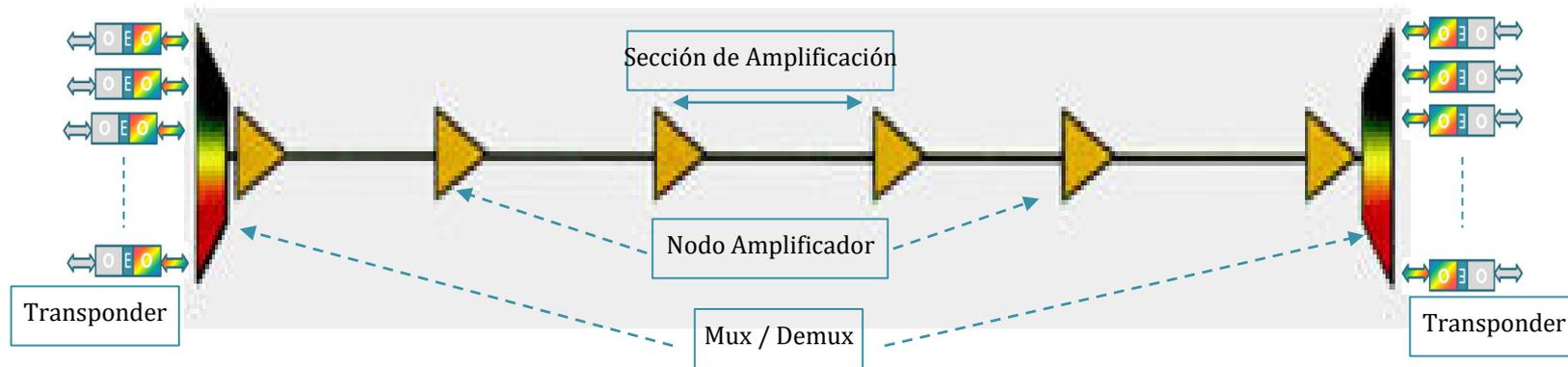
# ***Módulo VII***

## **Diseño Óptico de Sistemas DWDM**

Ing. Daniel Torradella  
formacion.dotcom@gmail.com

# Diseño Óptico de Sistemas DWDM

- Teniendo el modelo tipo de un enlace óptico DWDM (> 150 Km):



- Analizaremos elementos a tener en cuenta para el diseño así como su posterior cálculo para asegurar una performance adecuada de todos los canales de información que se transportan en el sistema DWDM.

# Diseño Óptico de Sistemas DWDM

- No hay una solución única que resuelva el enlace óptico. Puede que, dependiendo de la complejidad del caso, la solución mas apta surja de la iteración de distintas solución.
- Para el diseño del sistema óptico hay tres etapas básicas:
  - ❑ Necesidades de BW y Despliegue de Fibra Óptica.
  - ❑ Diseño de Nodo Terminal y Amplificador con Balances de Potencias.
  - ❑ Performance del sistema óptico (OSNR end to end)

# Agenda

- I. **Diseño Óptico de Sistemas DWDM.**  
Necesidades de BW y Despliegue de Fibra Óptica
- II. **Diseño Óptico de Sistemas DWDM.**  
Balance de Potencias
- III. **Diseño Óptico de Sistemas DWDM.**  
Performance óptica

# Necesidades de BW y Despliegue de Fibra Óptica

- ❖ Cantidad y velocidad de cada uno de los canales de información que deseo transmitir.
- ❖ Tipo de Fibra Óptica desplegada o a desplegar.
- ❖ Atenuación / PMD de cada tramo de Fibra Óptica @1550nm
- ❖ Traza de Fibra entre los Nodos extremos A y B y los puntos intermedios en los cuales “podría” ser Nodo Amplificador.

# Necesidades de BW y Despliegue de Fibra Óptica

## ❖ Cantidad y velocidad de canales de información.

- La cantidad de canales determinará la grilla a utilizar:
  - Hasta 40 Canales ópticos -> Grilla de 100GHz banda C
  - Hasta 80 canales óptico -> Grilla 50GHz banda C.
  - Hasta 160 Canales ópticos -> Grilla de 50 GHz bandas C+L.
- La velocidad del canal de información determinará si se usarán Transponder Coherente o No coherentes.
- De acuerdo a la demanda de velocidad de información de los canales de información, pueden surgir 3 variantes:

# Necesidades de BW y Despliegue de Fibra Óptica

- **A) Todos los canales hasta 10 Gb/s (Transponders No Coherentes).**  
Requeriría el uso de DCM a efectos de compensar la DC del enlace.
- **B) Algunos canales hasta 10 Gb/s o otros a mas de 10Gb/s.**  
Requeriría el uso de DCM igual que en el caso anterior pero se deberá tener en cuenta la distribución en el espectro óptico de las lambdas No Coherentes por un lado y en otra parte las lambdas Coherentes a fin de minimizar los efectos no lineales de SPM y XPM.
- **C) Todos los canales a mas de 10 Gb/s (Transponders Coherentes).**  
Por el DSP de los receptores ópticos, hace que estos transponders presenten una elevada tolerancia al DC por lo cual no tendrá sentido incorporar DCM en los enlaces.  
Además también presentan una elevada tolerancia al DGD.

# Necesidades de BW y Despliegue de Fibra Óptica

## ❖ Tipo de Fibra Óptica desplegada o a desplegar.

- El tipo de fibra óptica juega un papel preponderante en el cálculo óptico dado que, de acuerdo a la elección (a desplegar) o a lo disponible en campo, tendrá mas o menos problemas a la hora de alcanzar una adecuada performance los canales de información.
- Algunos de los aspectos son:
  - **A) Área Efectiva de la Fibra.**

El  $A_{eff}$  (Área efectiva) es un elemento importante a la hora de establecer cuales serán las penalidades del OSNR del enlace debido a los efectos No lineales.

Cuanto mayor sea el  $A_{eff}$ , mejor se comportará para la performance a la hora del cálculo de OSNR.

# Necesidades de BW y Despliegue de Fibra Óptica

## ➤ B) Características de DC @ 1550nm.

Es importante conocer la “cantidad de DC” que tendrá el enlace entorno de los 1550nm, porque:

- En caso de necesidad de DCM define cuanto se necesita compensar.
- El tipo de DCM a utilizar indicará las perdidas introducidas que son necesario compensar con amplificación.
- Para alinealidades como el FWM, el DC=0 hace limitar el uso de la banda C (bajar la potencia, reducir cantidad de lambdas o el uso de la banda L directamente).

# Necesidades de BW y Despliegue de Fibra Óptica

## ❖ Atenuación y PMD de Fibra Óptica desplegada o a desplegar.

- En caso de una fibra óptica a desplegar, es razonable que a partir de los datos del fabricante, mas los empalmes que deben realizarse y los conectores previstos, se puede estimar el valor de atenuación que tendrá cada tramo de fibra óptica y PMD en el entorno @ 1550nm.
- En caso de ser una fibra tendida con algunos años de antigüedad, será necesario medirla.
  - **A) Atenuación @ 1550nm**
  - **B) PMD @ 1550nm si el enlace tendrá canales a 10Gb/s**

# Necesidades de BW y Despliegue de Fibra Óptica

## ❖ Traza de Fibra entre los Nodos extremos A, B y puntos intermedios.

- Para enlaces superiores a 150 Km donde ya puede pensarse en al menos dos secciones de Amplificación, se trata de buscar que las secciones de Amplificación (Span) sean de igual longitud y con valores de entre 60 a 80 Km.

### ➤ **A)** *Span de Amplificación de igual longitud.*

*Significa que cada sección de amplificación aportara el mismo ruido y será la mejor ecuación para lograr el mas alto OSNR entre los extremos A y B.*

### ➤ **B)** *Distancia entre 60 y 80 Km de Span.*

*Es la distancia “típica” que un amplificador tiene su mejor performance (figura de ruido vs rango de amplificación).*

$$\frac{1}{OSNR_{final}} = \frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2} + \frac{1}{OSNR_3} \dots \dots \dots \frac{1}{OSNR_N}$$

# Agenda

- I. Diseño Óptico de Sistemas DWDM.  
Necesidades de BW y Despliegue de Fibra Óptica
- II. Diseño Óptico de Sistemas DWDM.  
Balance de Potencias
- III. Diseño Óptico de Sistemas DWDM.  
Performance óptica

# Balance de Potencias

- En función de la necesidad de canales de información a transportar se selecciono el esquema de multiplexación a utilizar.
- En cada sección de Amplificación (span) se debe realizar la selección de los Booster y Preamplificadores que conformarán el sistema óptico.

## ❑ Nodos Terminales

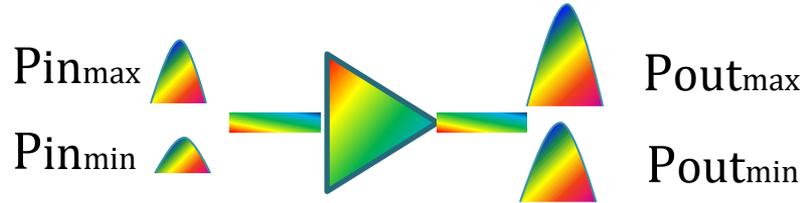
Son aquellos donde se encuentran la etapa de Mux / Demux y los transponders

- **Elección de Booster (sentido Tx).**

Al conocer el tipo de fibra a utilizar, nos da su  $A_{eff}$  y como consecuencia la máxima potencia de salida por canal ( $P_{out \lambda}$ ) a aplicar que minimicen efectos de “Dispersión Estimulada” (SBS y SRS) y el Efecto Kerr (SPM, XPM, FWM).

# Balance de Potencias

Las características del Booster, es de fijar una “Potencia” de salida de todos los canales ópticos dentro de un rango máximo y mínimo ( $P_{outmax}$ ,  $P_{outmin}$ ) independiente de la Potencia de entrada de todos los canales dentro de un cierto rango, ( $P_{inmax}$ ,  $P_{inmin}$ ).



- Analizando Potencia de salida....

$$P_{out} (booster) [dBm] = P_{out} \lambda [dBm] + 10 \log N [dB]$$

$P_{outmax} > P_{out} > P_{outmin}$

Valor acorde al tipo de fibra  
Potencia de lanzamiento por canal.

Función de Capacidad  
Cantidad de canales ópticos

# Balance de Potencias

- Analizando Potencia de entrada....

$$Pin(booster)[dBm] = Ptrp\_out[dBm] - AttMux [dB] - AttSC[dB] + 10logN[dB]$$

$Pin_{max} > Pin > Pin_{min}$

Atenuaciones  
Multiplexor

Cantidad de  
canales ópticos

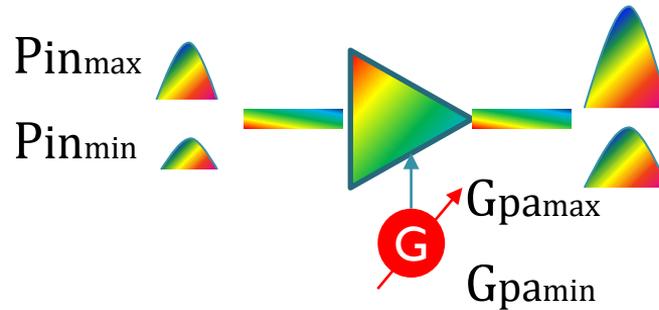
Potencia de salida  
Transponder

Atenuaciones  
SC (3,5 dB)

# Balance de Potencias

- **Elección de Preamplificador (sentido Rx)**

Las características del Preamplificador es de fijar una “Ganancia” de todos los canales ópticos dentro de un rango máximo y mínimo ( $G_{pmax}$ ,  $G_{pamin}$ ) independiente de la Potencia de entrada de todos los canales dentro de un cierto rango, ( $P_{inmax}$ ,  $P_{inmin}$ ).



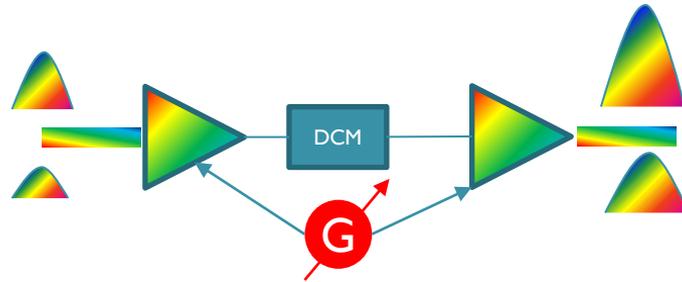
# Balance de Potencias

El preamplificador se encargará de elevar el nivel de señal recibida llevándola a un Nivel “adecuado” al receptor del Transponder después de las pérdidas en fibras y conectores.

Valor adecuado = nivel mas alto posible (mayor OSNR) sin saturar el Rx.

Estos amplificadores pueden ser de una o dos etapas.

De ser de dos etapas, entre las mismas se instala el DCM.



# Balance de Potencias

$$G_{pa \lambda} [dB] = P_{out \lambda} [dBm] - Att_{fo} [dB] - Att_{Demux} [dB] - Att_{SC} [dB] - Pin_{trp} [dBm]$$

Valor acorde al tipo de fibra  
Potencia de lanzamiento por canal.

Atenuaciones de FO +  
Empalmes+ Conectores

Atenuaciones  
Demultiplexor

Atenuaciones  
SC (3,5 dB)

Potencia entrada  
Transponder

$$G_{pa} (\text{preamplificador}) [dB] = G_{pa \lambda} [dB] + 10 \log N [dB]$$

$G_{pmax} > G_{pa} > G_{pamin}$

$$P_{pa \text{ in}} [dB] = P_{out \lambda} [dBm] - Att_{fo} [dB] + 10 \log N [dB]$$

$P_{inmax} > P_{pa \text{ in}} > P_{inmin}$

# Balance de Potencias

## ❑ Nodos Amplificadores

Los nodos amplificadores, a diferencia en los terminales, tienen que compensar las pérdidas de la fibra y volver a poner la potencia de lanzamiento prevista nuevamente en la línea (por sentido)

Los nodos amplificadores pueden ser de una o varias etapas:

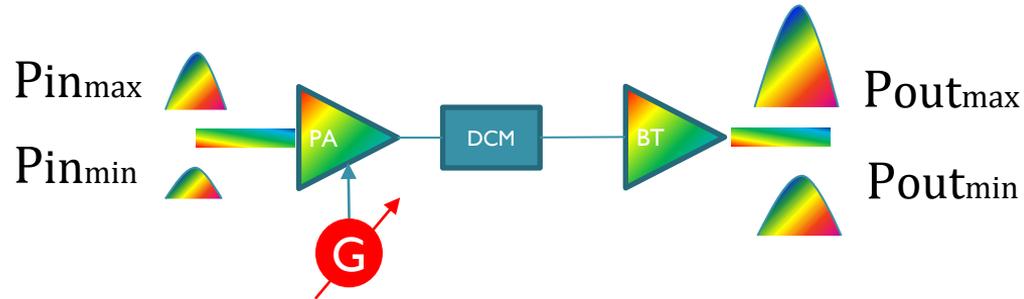
- Una etapa: Preamplificador puro de ganancia variable.
- Dos Etapas: Compuesta por un preamplificador (EDFA o Raman) + Booster.
- Tres Etapas: Preamplificador Raman + Preamplificador EDFA + Booster.

La elección de la cantidad de etapas dependerá de la ganancia necesaria y la presencia o no de DCM.

# Balance de Potencias

Analizando Potencia de salida para el próximo link....

$$P_{out} (booster) [dBm] = P_{out} \lambda [dBm] + 10 \log N [dB]$$



Analizando Potencia de entrada a partir del link precedente....

$$P_{pa} in [dB] = P_{out} \lambda [dBm] - Att_{fo} [dB] - Att_{DCM} [dB] + 10 \log N [dB]$$



***BREAK !!!***

# Agenda

- I. Diseño Óptico de Sistemas DWDM.  
Necesidades de BW y Despliegue de Fibra Óptica
- II. Diseño Óptico de Sistemas DWDM.  
Balance de Potencias
- III. Diseño Óptico de Sistemas DWDM.  
Performance óptica

# Performance Óptica

- ¿Que es una performance adecuada?  
Tener un enlace óptico que **asegure** una tasa de error de bit en el tiempo.
- ¿Cual es una tasa de error de bit adecuada?.

**“Es la tasa de error de bit del parámetro “maximum error rate” de la interfaz seleccionada para el enlace”.**

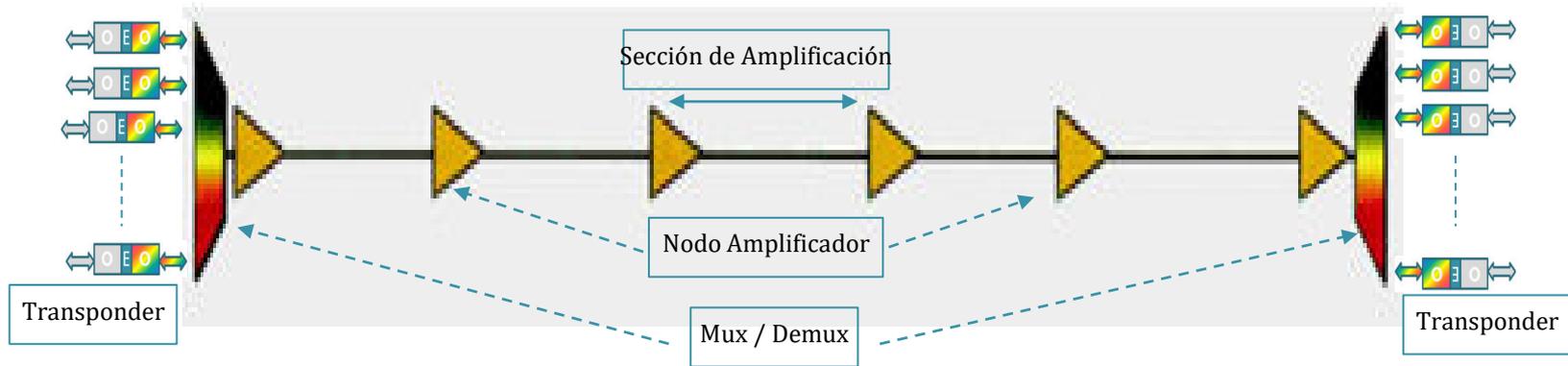
Características de  
Transceptor Óptico

IV  
VI

Atenuación de fibra óptica  
Dispersión de fibra óptica  
Ruido de Amplificadores

# Performance Óptica

- Volviendo a nuestro esquema:



- Terminada la etapa de balance de potencia, ahora ya solo nos centraremos en los End Point (transponders) para verificar la performance óptica.
- Pero que vamos a Verificar?

# Performance Óptica

- **Atenuación Máxima y Mínima?**

*La presencia de Amplificadores y el balance de potencia, descarta la necesidad de hacer el cálculo.*

- **Dispersión Cromática?**

*La utilización de DCM compensa lo aportado por la fibra y, de usar transponder Coherentes, la tolerancia es elevada para un enlace terrestre (verificar).*

- **Dispersión de Modo de Polarización?**

*Solo para canales a 10Gb/s. Velocidades mayores con Modulación Coherente tienen una elevada tolerancia al DGD (verificar).*

# Performance Óptica - DGD

- **DGD**

Para velocidad de 10Gb/s (No Coherente) deberá calcularse para todo el enlace de modo de verificar:

$$\text{Tolerancia DGD}_{Mod. Opt.} [ps] \geq \text{DGD}_{Max Link total} [ps]$$

En caso que la fibra este tendida durante un tiempo y haya sufrido el stress y estiramiento por cortes, será.....

$$\text{DGD}_{max Link total} = 3 \times \sqrt{\sum_1^N (DGD_{ave})^2} [ps]$$

# Performance Óptica

- **OSNR**

*Cada transponder tiene su tolerancia al OSNR llamado OSNR back to back valor que no contempla las degradaciones sufridas por la señal óptica por efectos lineales (DC, PMD) y no lineales (SPM, XPM, etc) en la fibra óptica.*

*Por otro lado, el sistema óptico con sus amplificadores generará su propio ruido.*

*Recordemos también que la atenuación varía en el tiempo por degradaciones debido a cortes y estiramientos y el sistema deberá seguir funcionando hasta esos límites.*

*Es por esto que deberá considerarse en el cálculo de OSNR de la red, atenuaciones por criterio de envejecimiento que nos dará el  $OSNR_{EoL}$  – OSNR a fin de vida del enlace.*

# Performance Óptica - OSNR

$$\text{Tolerancia OSNR}_{btb} [\text{dB}] + \text{OSNR}_{Pen \text{ lineal}} + \text{OSNR}_{Pen \text{ alineal}} \leq \text{OSNR}_{EoL \text{ total}}$$

$\text{OSNR}_{btb}$  = OSNR especificado del transponder

$\text{OSNR}_{EoL \text{ final}}$  = OSNR de la red óptica a fin de vida (EoL)

$\text{OSNR}_{Pen \text{ lineal}}$  = Penalidad de OSNR por efectos lineales (DC, PMD)

$\text{OSNR}_{Pen \text{ alineal}}$  = Penalidad de OSNR por efectos NO lineales

$$\frac{1}{\text{OSNR}_{EoL \text{ total}}} = \frac{1}{\text{OSNR}_{EoL 1}} + \frac{1}{\text{OSNR}_{EoL 2}} + \frac{1}{\text{OSNR}_{EoL 3}} + \dots + \frac{1}{\text{OSNR}_{EoL N}}$$

$$\text{OSNR}_{EoL N} [\text{dB}] = P_{out \lambda} [\text{dBm}] - Att_{fo_{EoL}} [\text{dB}] - Nf [\text{dB}] - 10x \log(h\nu \Delta\nu_0) [\text{dBm}]$$

$$Att_{fo_{EoL}} [\text{dB}] = Att_{fo @ 1550nm} + Mar. Env [\text{dB}]$$

# Performance Óptica

- **OSNR Penalidad Lineal.**

Es similar a las penalidades vistas para las interfaces grises y CWDM como degradación de la sensibilidad pero ahora vistas desde el punto de vista de OSNR.

Al igual que en las otras interfaces, la componente de estas penalidades son debidas a la DC y PMD.

Estas penalidades se reducen, para un determinado link óptico, a medida que la tolerancia de la interfaz a las dispersiones aumenta.

# Performance Óptica

- **OSNR Penalidad No Lineal.**

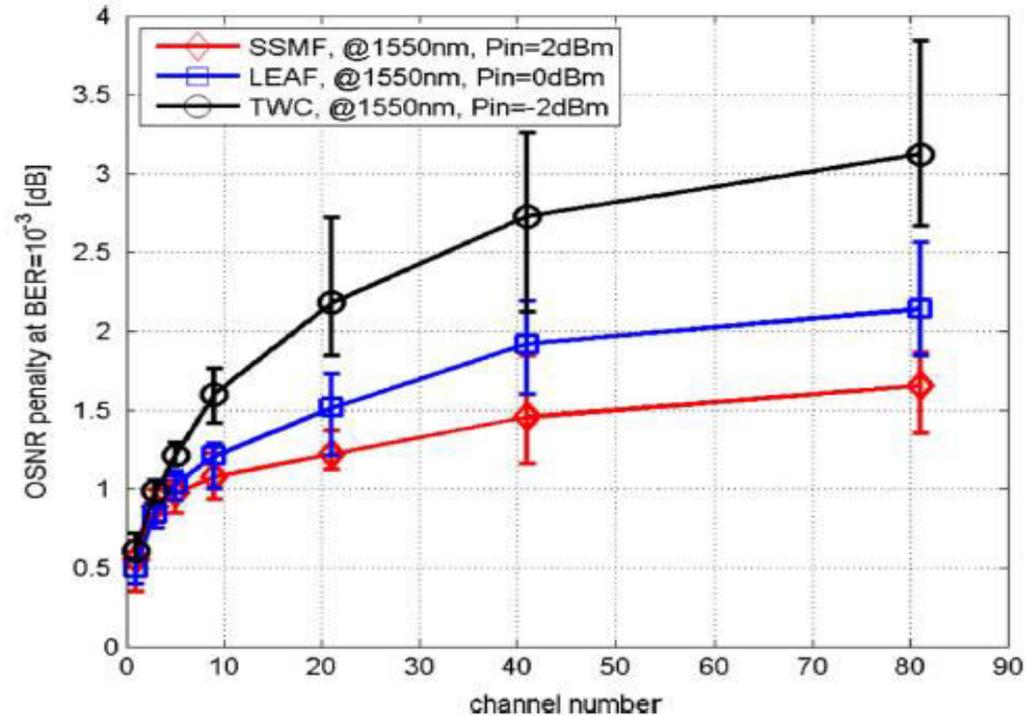
*Como vimos, los efectos No lineales en la fibra son fuertemente dependientes de:*

- Tipo de fibra (DC, Aeff, etc)
- Cantidad de canales.
- Separación de canales.
- Potencia de lanzamiento de cada longitud de onda  $P_{in}$ .

*A los efectos de conocer la penalidad total introducida que empeora el OSNR del enlace, la misma se realiza con programas de SW que, a partir de la modelización de cada tipo fibra, se puede ver como se penaliza el OSNR con la cantidad de canales, su separación, y la potencia de lanzamiento ( $P_{in}$ ) por canal.*

# Performance Óptica

A modo de ejemplo se muestra, para distintos tipos de fibra a una determinada potencia de lanzamiento, la penalidad que se debe introducir al enlace en función de la cantidad de canales que se deseen transportar .





***Fin Lección 4***

***Fin Parte 2***

Ing. Daniel Torrabadella  
formacion.dotcom@gmail.com