

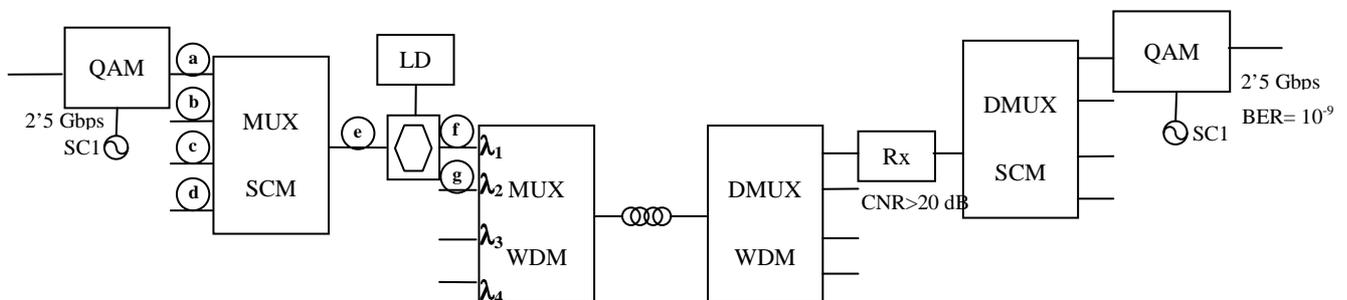
## COMPARATIVA ENTRE UN ENLACE PUNTO A PUNTO TDM Y SCM

Dados ambos sistemas SCM/WDM y TDM/WDM que se muestran en las figuras 2a y 2b, y que incorporan una serie de dispositivos cuyas características se adjuntan en los anexos, se pide:

- 1) Comparar los espectros de la señal óptica modulada a la salida de uno de los transmisores ópticos, gráficamente y numéricamente, en el caso SCM, descrito anteriormente (ver figura 2a), con el caso del sistema TDM (ver figura 2b) que trabaja con una modulación digital banda base 10 Gbps con codificación NRZ (fruto de la multiplexación de 4 canales a 2'5 Gbps) de una portadora óptica monocromática (Láser del tipo DFB) mediante el uso de un modulador externo linealizado y la misma técnica DWDM utilizada en el caso SCM/DWDM. ¿Cuánto mejora la eficiencia espectral el sistema SCM frente al sistema TDM?

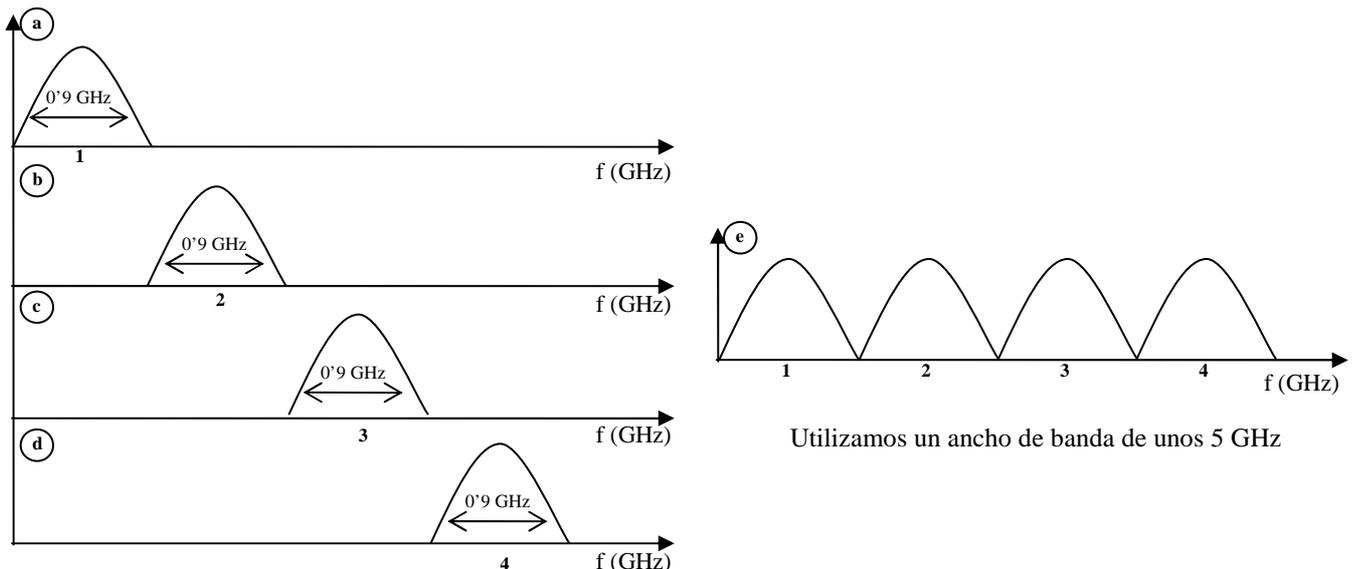
### SISTEMA SCM

Figura 2a



En la siguiente figura (figura 3) se muestran los espectros de la señal justo antes del multiplexor SCM, en los puntos a, b, c, y d.

Figura 3



**Comparativa entre un enlace punto a punto TDM y SCM**

Queremos transmitir centrados en tercera ventana (1550 nm). La frecuencia asociada a esta

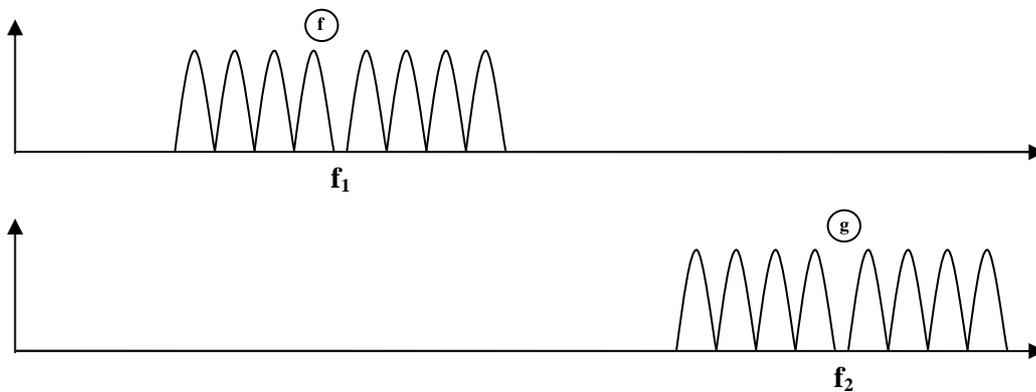
longitud de onda es  $f_0 = \frac{c}{n \cdot \lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,45 \cdot 1550} = 133'452 \text{ THz}$

Como las frecuencias  $f_1, f_2, f_3$  y  $f_4$  (asociadas a las longitudes de onda  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  respectivamente) tienen que estar separadas 10 GHz, tenemos unos valores referidos a  $f_0$ , que son los siguientes:

- $f_1 = f_0 - 300 \text{ GHz} = 133'152 \text{ THz}$ .
- $f_2 = f_0 - 100 \text{ GHz} = 133'352 \text{ THz}$ .
- $f_3 = f_0 + 100 \text{ GHz} = 133'552 \text{ THz}$ .
- $f_4 = f_0 + 300 \text{ GHz} = 133'752 \text{ THz}$ .

La figura 4 muestra los espectros en los puntos f y g, justo después de modular

**Figura 4**

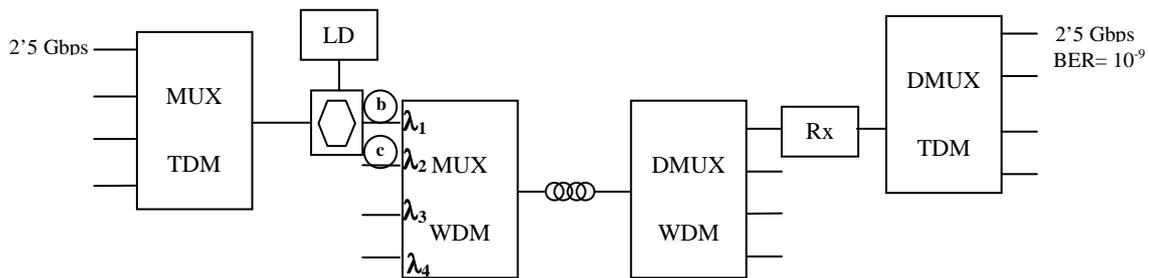


Con este diseño se consigue una eficiencia espectral de:

$$\eta_{SCM} = \frac{BR_c}{BW_c} = \frac{2,5 \text{ Gbps}}{0,9 \text{ GHz}} = 2,778$$

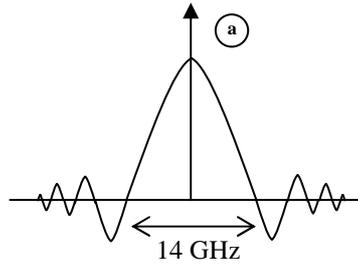
**SISTEMA TDM**

**Figura 2b**



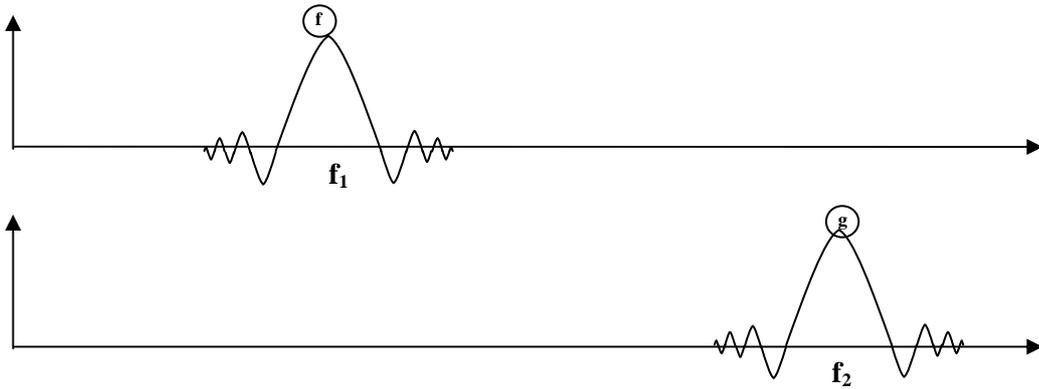
A la salida del multiplexor TDM tenemos una señal a 10 Gbps, codificada en NRZ. Esta señal ocupa un ancho de banda de  $BW = 0,7 \cdot BR = 7 \text{ GHz}$  y tiene la forma que muestra la figura 5

**Figura 5**



Después de modular estas señales, obtenemos unos espectros en los puntos b y c que son los que se muestran en la figura 6.

**Figura 6**



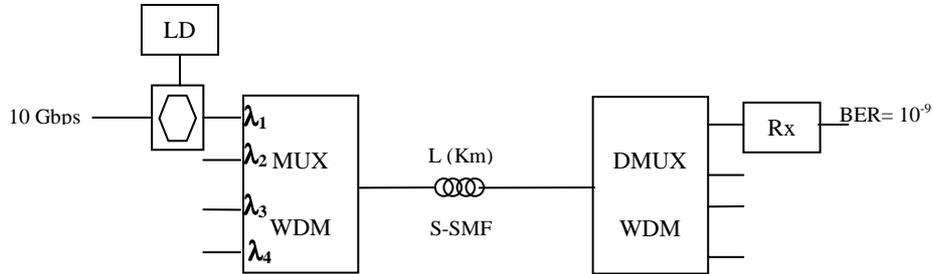
Con este diseño se consigue una eficiencia espectral de:

$$\eta_{TDM} = \frac{BR_c}{BW_c} = \frac{10 \text{ Gbps}}{14 \text{ GHz}} = 0.714$$

Como se puede ver,  $\eta_{SCM} = 3.891 \eta_{TDM}$ . La eficiencia espectral de un sistema SCM es casi cuatro veces mayor que la de un sistema TDM

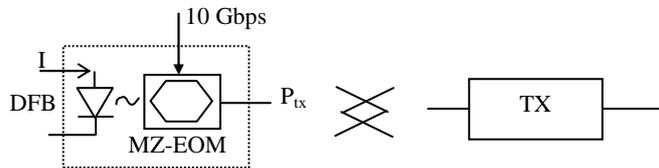
- 2) Comparar las limitaciones para la máxima longitud del enlace de fibra,  $L$ , impuestas por el balance de potencias y balance de dispersión en ambos casos, si se desea una calidad mínima medida en tasa de error de  $10^{-9}$  en la transmisión de canales a 2'5 Gbps.

**SISTEMA TDM (Sección fotónica)**



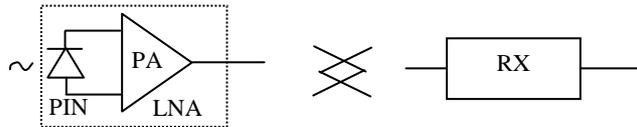
**Transmisor:**

- Diodo Láser DFB + MZ-EOM.
- Bit Rate: 10 Gbps.
- $\lambda = 1550 \text{ nm}$ . (3ª Ventana).
- $P_{tx} = 0'9 \text{ mW}$  (-0'457 dBm)
- $PP_{dispersión} = 1 \text{ dB}$
- $T_{subida \text{ óptico}} = 50 \text{ ps}$ .



**Receptor:**

- Fotodetector PIN + LNA
- Bit Rate= 10 Gbps.
- $BW_e = 10 \text{ GHz}$ .
- $R_{PIN} = 0'83 \text{ A/W}$
- $I_{eq-ruido} = 16'5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$



**Multiplexores/Demultiplexores:**

- Tienen 4 canales.
- $IL_{mux} = 2'2 \text{ dB}$ .
- $IL_{demux} = 2'6 \text{ dB}$
- $PDL = 0'3 \text{ dB}$
- $PMD = 0'2 \text{ ps}$

**Fibra óptica:**

- S-SMF
- $\lambda = 1550 \text{ nm}$  (3ª Ventana)
- $D_\lambda = 17 \text{ ps/nm Km} \Rightarrow \beta_2 = -21'67 \text{ ps}^2/\text{Km}$
- $S = 0'09 \text{ ps}^2/\text{nm Km} \Rightarrow \beta_3 = 0'292 \text{ ps}^3/\text{Km}$
- Pérdidas = 0'25 dB /Km

Así, tenemos un sistema WDM con 4 longitudes de onda ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ), que se transmiten a través de una fibra S-SMF en tercera ventana.

**Balance de potencias**

Como el sistema es WDM, tenemos una  $P_{rx}$  para cada una de las longitudes de onda.

Todas las longitudes de onda está en torno a los 1550 nm, sufriendo de esta manera la misma atenuación.

En el receptor tenemos un fotodiodo PIN sin Amplificador óptico, como necesitamos una  $BER = 10^{-9}$  ( $\Rightarrow \gamma=6$ ), la fórmula que nos da la mínima potencia necesaria en el receptor es:

$$P_{RX}|_{1\lambda} = \frac{\gamma}{R} (q \cdot BW_e \cdot \gamma + \sigma_{th}) \quad \sigma_{th}^2 = I_{th}^2 \cdot BW_e$$

$$(R=0'83 \text{ A/W}, q=1'6 \cdot 10^{-19}, BW_e=10\text{GHz}, I_{th}=16'5 \cdot 10^{-12} \text{ A}/\sqrt{\text{Hz}})$$

## Comparativa entre un enlace punto a punto TDM y SCM

$$\sigma_{th}^2 = (16,5 \cdot 10^{-12})^2 10 \cdot 10^9 = 2,72 \cdot 10^{-12} A^2 \Rightarrow \sigma_{th} = 1,65 \cdot 10^{-6} A$$

$$P_{RX}|_{1\lambda} = \frac{6}{0,83} (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 10^9 + 1,65 \cdot 10^{-6}) = 11,997 \cdot 10 \mu W$$

Así, la potencia mínima que necesitamos en el receptor es de 11'97  $\mu W$ , es decir, -19'21 dBm. De esta manera:

$$P_{rx} < P_{tx} - \text{Pérdidas (dB)} = -0'457 \text{ dBm} - (2'2 + 0'3 + L_{\text{máx}} 0'25 + 2'6 + 0'3) = -5'857 - 0'25 L$$

$$\text{Por lo tanto: } -19'21 \text{ dBm} < -5'857 \text{ dBm} - 0'25 L \Rightarrow L < 53'408 \text{ Km}$$

### **Balance de dispersión:**

Como el estándar SDH utiliza codificación NRZ, necesitamos que  $t_{SYS} < 0'7 T_B$

El Bit Rate es de 10 Gbps (por canal)  $\Rightarrow T_B = 100 \text{ ps} \Rightarrow t_{sys} < 70 \text{ ps}$

$$t_{SYS} = \left[ t_{tx}^2 + t_{mat}^2 + t_{go}^2 + t_{mod}^2 + t_{pmd}^2 + t_{rx}^2 \right]^{1/2}$$

$t_{tx} = 50 \text{ ps}$  (tiempo de subida)

$$t_{mat} = \left[ \frac{|\beta_2| \cdot L}{2} + \left( \frac{|\beta_3| \cdot L}{4} \right)^{2/3} \right]^{1/2} \cong \left[ \frac{|\beta_2| \cdot L}{2} \right]^{1/2} = \left[ \frac{21,7 \cdot L}{2} \right]^{1/2} \text{ ya que } |\beta_2| \gg |\beta_3|$$

Utilizamos esta fórmula por que el láser LD-DFB tiene  $\Delta\lambda \ll \text{BR}$

$t_{go} = 0$

$t_{mod} = 0$  (la fibra es S-SMF)

$t_{pmd} = 0'2 \text{ ps}$  (despreciable frente a otros valores)

$$t_{rx} = \frac{350}{BW_{rx} \text{ (MHz)}} = \frac{350}{10 \text{ GHz} \cdot 1000} = 0'035 \text{ ns} = 35 \text{ ps}$$

$$t_{SYS}^2 = \left[ 50^2 + \frac{21,27 \cdot L}{2} + 35^2 \right] < (70)^2 \text{ Así, tenemos que } L < 108'3 \text{ Km}$$

Como  $L_{pot} < L_{disp} \Rightarrow$  La longitud máxima del enlace es de:

|  |
|--|
| <b><math>L_{\text{máx}} = 54 \text{ Km}</math></b> |
|--|

### SISTEMA SCM (Sección fotónica)

El sistema SCM están limitados por el balance de potencias. Veámoslo:

#### **Balance de dispersión:**

$$t_{SYS} = \left[ t_{tx}^2 + t_{mat}^2 + t_{go}^2 + t_{mod}^2 + t_{pmd}^2 + t_{rx}^2 \right]^{1/2}$$

$t_{tx}=50$  ps (tiempo de subida)

$$t_{mat} = \left[ \frac{|\beta_2| \cdot L}{2} + \left( \frac{|\beta_3| \cdot L}{4} \right)^{2/3} \right]^{1/2} \cong \left[ \frac{|\beta_2| \cdot L}{2} \right]^{1/2} = \left[ \frac{21,7 \cdot L}{2} \right]^{1/2} \text{ ya que } |\beta_2| \gg |\beta_3|$$

Utilizamos esta fórmula por que el láser LD-DFB tiene  $\Delta\lambda \ll BR$

$t_{go}=0$

$t_{mod}=0$  (la fibra es S-SMF)

$t_{pmd}=0,2$  ps (despreciable frente a otros valores)

$$t_{rx} = \frac{350}{BW_{rx} (MHz)} = \frac{350}{10 GHz \cdot 1000} = 0,035 ns = 35 ps$$

$$t_{sys} = \left[ 50^2 + \frac{21,27 \cdot L}{2} + 35^2 \right]^{1/2} = \sqrt{3725 + 10,850 \cdot L}$$

Como el ancho de banda del sistema es aproximadamente 5 GHz, tenemos que:

$$BW_{SYS} (MHz) = \frac{350}{t_{sys} (ns)} = 5000 \Rightarrow L = 108,29 Km$$

#### **Balance de potencias:**

Nos piden que  $CNR_c=20$  dB  $\cong 100$ , y consideramos que  $m_c=25\%$  y que el ancho de banda por canal es  $BW_c=0,9$  GHz=900 MHz.

$$CNR_c = \frac{\frac{1}{2}(R \cdot m_c \cdot P_{RX})^2}{N_{TX} + N_{ASE} + N_{Th} + N_{shot}} = 100$$

$$\frac{1}{2}(R \cdot m_c \cdot P_{RX})^2 = \frac{1}{2}(0,83 \cdot 0,25 \cdot P_{RX})^2 = 21,52 \cdot 10^{-3} P_{RX}^2$$

$$N_{TX} = R_{in} \cdot (R \cdot P_{RX})^2 \cdot BW_c = 10^{-18} \cdot (0,83 \cdot P_{RX})^2 \cdot 900 = 620 \cdot 10^{-12} P_{RX}^2$$

$$N_{ASE} = 0$$

$$N_{Th} = I_{Th}^2 \cdot BW_c = 16,5^2 \cdot 900 = 245,025 \cdot 10^{-15} A^2$$

$$N_{shot} = 2 \cdot q \cdot R_{pin} \cdot P_{RX} \cdot BW_c = 2 \cdot 1,69 \cdot 10^{-19} \cdot 0,83 \cdot P_{RX} \cdot 900 = 239,04 \cdot 10^{-12} P_{RX}$$

$$100 = \frac{21,52 \cdot 10^{-3} P_{RX}^2}{620 \cdot 10^{-12} P_{RX}^2 + 245,025 \cdot 10^{-15} + 239,04 \cdot 10^{-12} P_{RX}} \Rightarrow \begin{cases} P_{RX} = -33,19 \mu W \\ P_{RX} = 34,30 \mu W \cong -14,64 dBm \end{cases}$$

Así, la potencia mínima que necesitamos en el receptor es de 34,30  $\mu$ W, es decir, -14,64 dBm. De esta manera:

### Comparativa entre un enlace punto a punto TDM y SCM

---

$$P_{rx} < P_{tx} - \text{Pérdidas (dB)} = -0'457 \text{ dBm} - (2'2 + 0'3 + L_{\text{máx}} 0'25 + 2'6 + 0'3) = -5'857 - 0'25 L$$

$$\text{Por lo tanto: } -14'64 \text{ dBm} < -5'857 \text{ dBm} - 0'25 L \Rightarrow L < \mathbf{35'132 \text{ Km}}$$

#### En resumen:

Hemos encontrado que la distancia máxima para un enlace con multiplexación TDM es de 53'408 Km, y si utilizamos multiplexación SCM, la distancia máxima del enlace es de 35'132 Km.

**3) ¿Qué sistema se beneficiaría más al incluir un EDFA antes del demultiplexor óptico?  
Comentar la respuesta.**

Si se introdujese un EDFA beneficiaría más al sistema TDM.

Con un EDFA el ruido dominante sería el producido por el amplificador, lo cual haría que la  $CNR_c$  disminuyese considerablemente, haciendo menor la distancia de transmisión.