

The background image shows a laboratory setup for optical communications. It features a perforated metal plate with a grid of small holes. Several bright blue laser beams are directed through the plate, creating a pattern of light spots. The beams originate from various points, some from a device on the left and others from a central component. The overall scene is dark, with the blue light providing the primary illumination.

ETSI Telecomunicación

# Laboratorio de Comunicaciones Ópticas

Apuntes de Pak

## **Laboratorio de Comunicaciones Ópticas**

Apuntes de Pak (Fco. J. Rodríguez Fortuño)  
ETSI Telecomunicación. Universidad Politécnica de Valencia.  
Segundo cuatrimestre de 4º curso  
Curso 2006/2007

### **Contenido**

- Referencia rápida: una hoja resumiendo cada práctica

**Fecha de última actualización:** 30 Marzo 2008

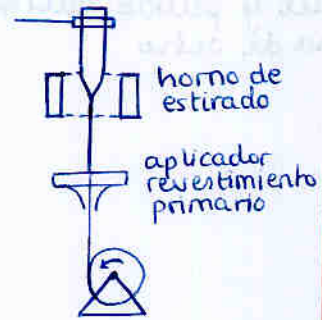
Práctica 1. Cableado e Interconexión de Fibras Ópticas

• Fabricación de fibras ópticas:

- Fabricación de la preforma

	Fase de vapor (mejor)	Fase líquida
Deposición interna (ambiente + puro y controlado)		
Deposición externa		

- Estirado de la preforma



• Cableado de fibra óptica

Incorporar la fibra a la estructura llamada "cable"

- protección
- estabilidad
- consistencia mecánica
- identificación



• Uniones de fibra óptica

• Conectores: para poner y quitar

- ↳ de contacto ej: →
- ↳ de haz expandido



FC-APC



los del lab.

ST-PC



SC-PC



APC  
angle physical connection



• Empalmes

uniones permanentes

Mecánicos:

- substratos ranurados en V
- tubos elastoméricos

~ 0'25 dB

Fusión: ~ 0'06 dB

- microposicionadores

• Preparación de la fibra para realizar conector o empalme

• pelar el cable hasta dejar sólo revestimiento primario  
↳ sujeción mediante arrollamiento en dedos  
↳ raspado ceñido 0'9 mm

• quitar el revestimiento primario

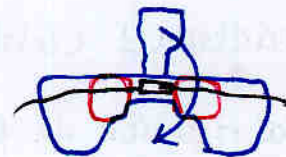
- o bien pelado con pinzas
- o bien sumergir en diclorometano o acetona

• realizar corte transversal al extremo de la fibra

→ cortadoras

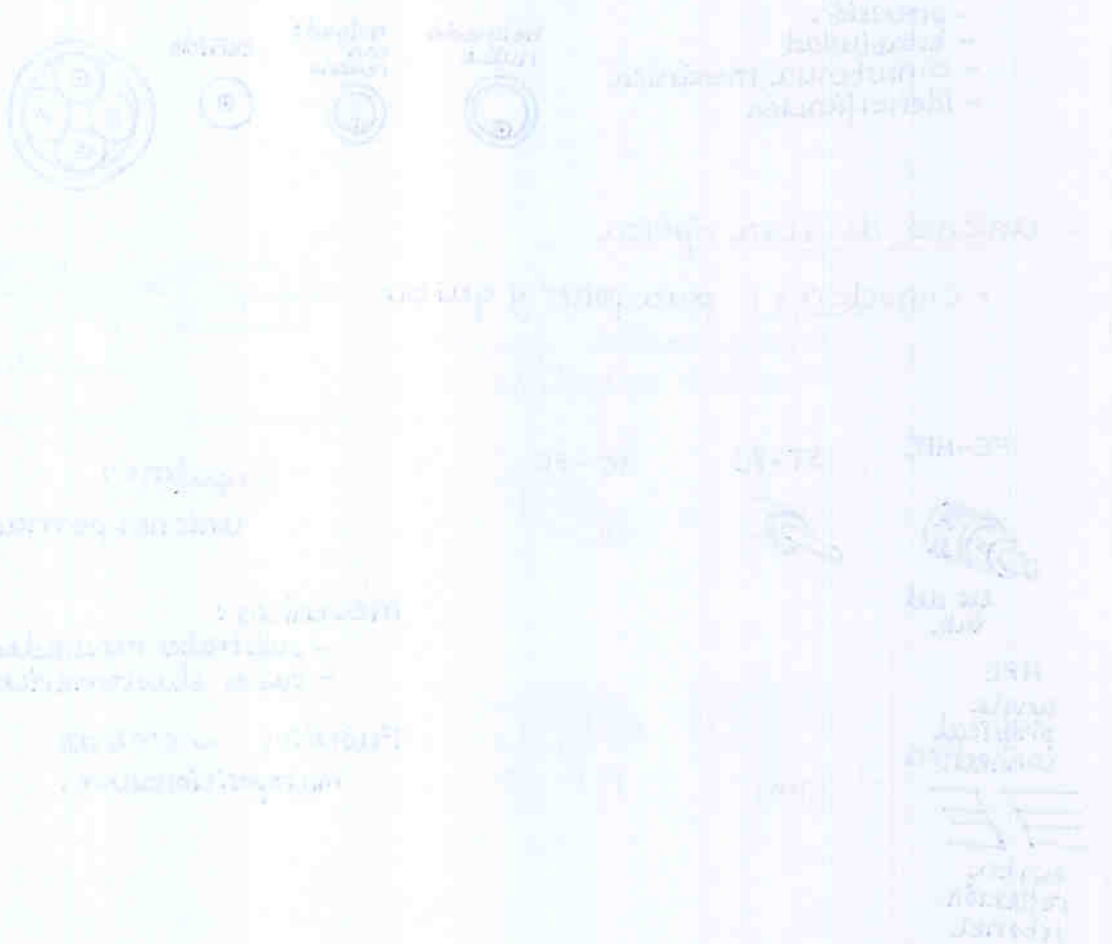
- Para conector :
    - Retirada y corte de las fibras de aramida
    - meter cuerpo desnudo de la fibra en el conector
    - Crimpar al conector las fibras de aramida
    - sujeción de la fibra al cuerpo del conector
    - Cortar fibra sobrante con cuchilla
- Pulido fino mediante soporte vertical y pulido haciendo forma de ocho

- Para empalme
  - mecánico :
    - empalme elástico



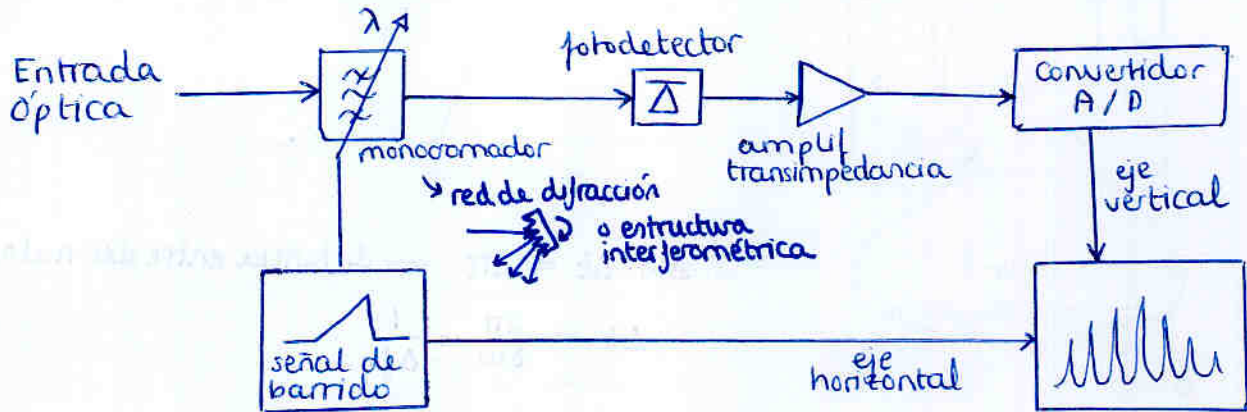
→ Fusión

- Colocar extremos de la fibra en la maquina
- Presionar SET
  - ↳ si algun corte mal o fibra mal colocada la maquina nos avisa
  - ↳ si todo bien pulsamos SET
- autoalineamiento en ejes X e Y
- arco eléctrico que funde los extremos de la fibra

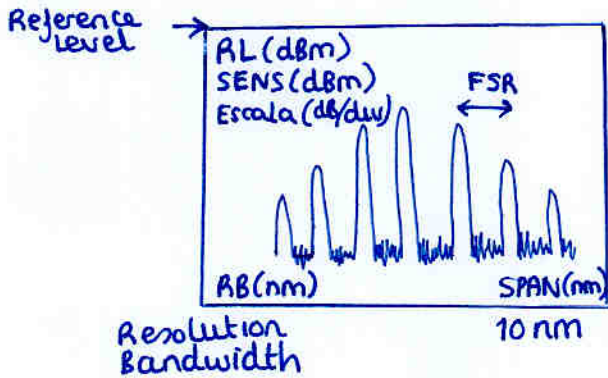


# Práctica 2. Analizador de Espectros y Analizador de Redes Ópticas

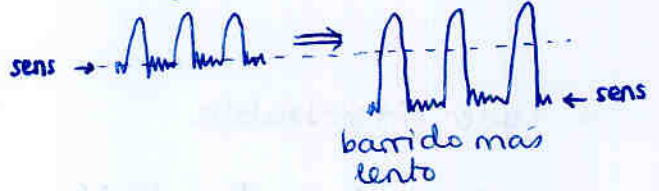
## • Optical Spectrum Analyzer (OSA)



midiendo un Fabry-Perot



Reducir (mejorar) la sensibilidad hace bajar el nivel de ruido

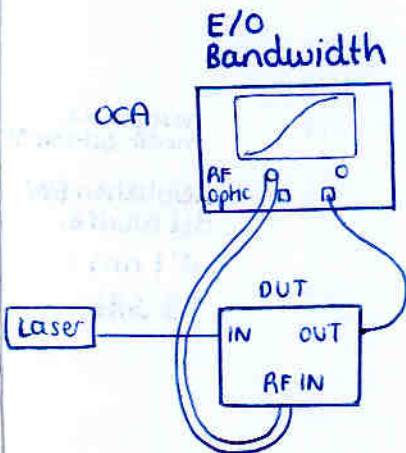


## • Optical Components Analyzer (OCA)

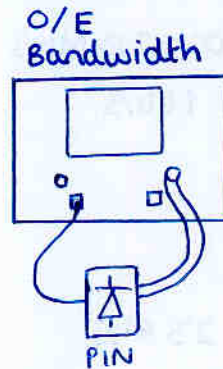
- Tipo de dispositivo
- | Tipo señal Moduladora / Tipo señal Modulada |
|---|
| • O/E                                       |
| • E/O                                       |
| • O/O                                       |
| • E/E                                       |

- Tipo de medida
- Bandwidth
  - Reflection
  - Reflection sensitivity

ej: medida de modulador electroóptico

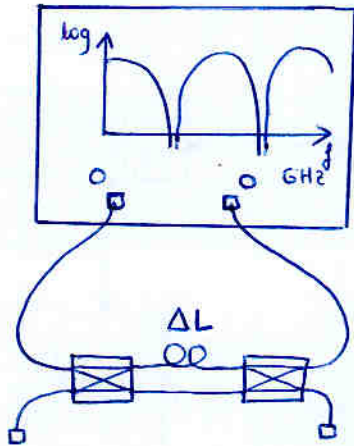


ej: medida de detector PIN



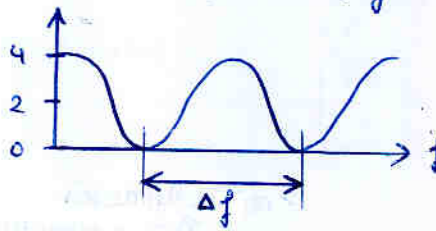
# ej: medida del Mach-Zender

- 0/0
- Bandwidth



$$h(t) = \delta(t) + \delta(t - \Delta t)$$

$$H(\omega) = 2 [1 + \cos(2\pi f \Delta t)]$$



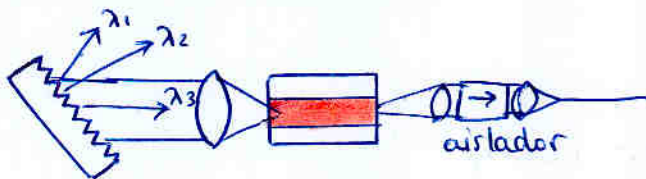
$$2\pi \Delta f \cdot \Delta t = 2\pi \leftarrow \text{distancia entre dos mínimos del coseno}$$

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f}$$

$$\Delta L = \Delta t \cdot v_g$$

## • Laser sintonizable

Ajustamos la realimentación con una cavidad externa

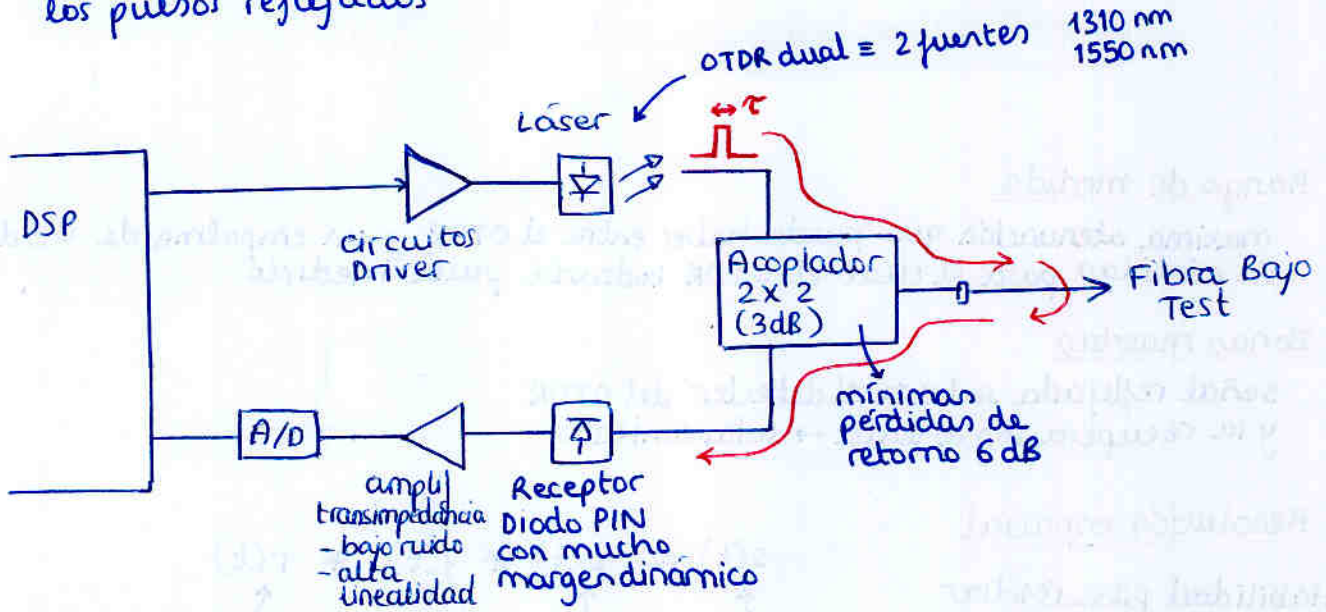


## Anchuras de línea y AB modulación de algunos dispositivos

	AB modulación (señal eléctrica)	Ancho de línea Δλ	$\Delta\lambda = -\frac{\lambda^2}{c} \Delta f$
LED	100 ~ 200 Mb/s	80 - 100 nm	
SuperLED	1 Gb/s	30 nm	
F-P (laser multimodo)		$< 0.01 \text{ nm}$ 	no se puede medir Δλ con OSA: Resolution BW del analiz. 0.01 nm 1.3 GHz
DFB	2.5 Gb/s	1 - 10 MHz ~ 150 MHz	

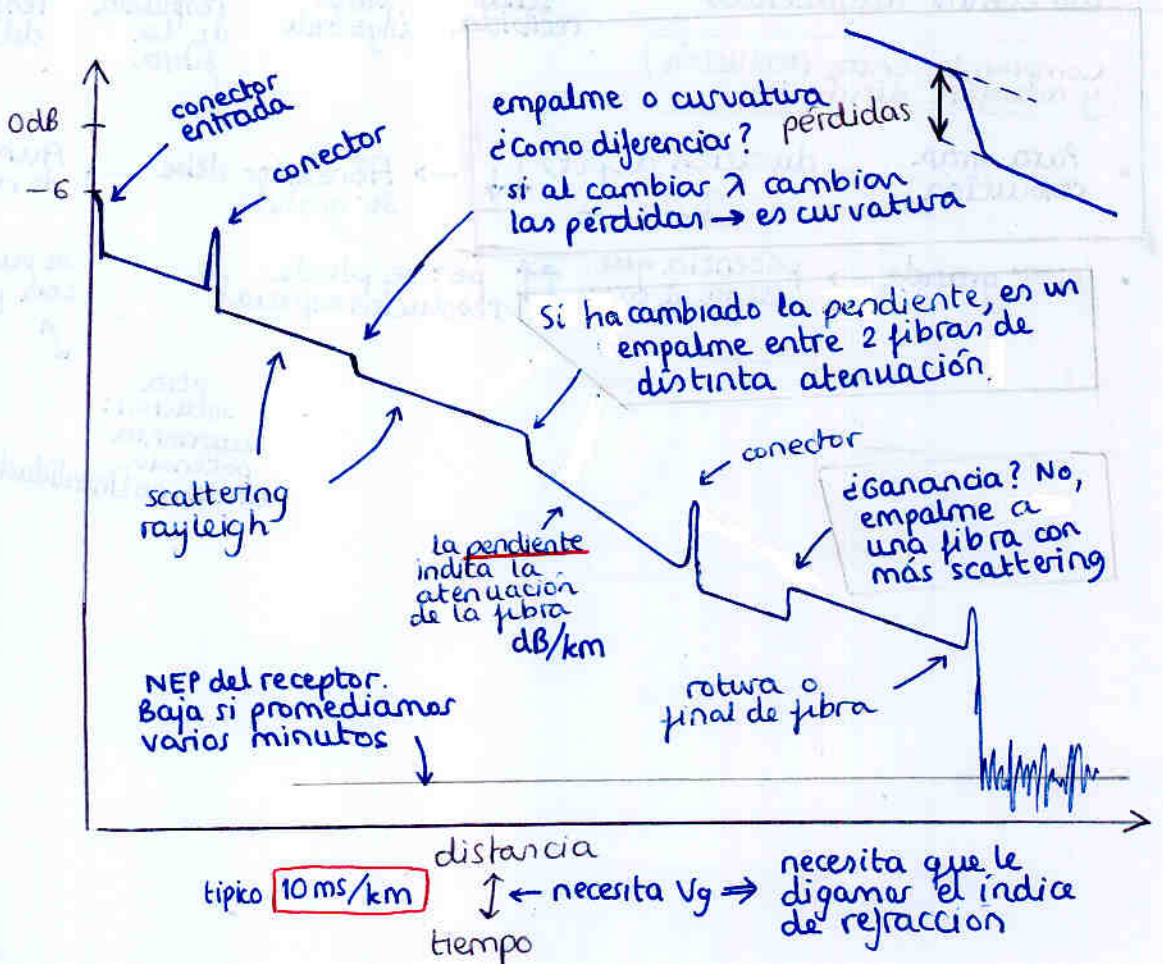
# Práctica 3. Reflectómetro óptico en el dominio temporal OTDR

- OTDR: instrumento que inyecta pulsos ópticos de corta duración a un enlace de fibra
  - ↳ rectangular: anchura [5ns a 10 ms]
- mecanismos que redirigen parte de la energía del pulso en el sentido contrario:
  - Scattering Rayleigh (a lo largo de la fibra; cuanto más nos alejamos en la fibra más se atenúa el pulso y el eco)
  - Reflexión Fresnel (conectores/roturas)
- Posible determinar la localización mediante el tiempo de llegada de los pulsos reflejados



**Pérdidas de retorno**  
 Ya que el impulso va y vuelve, para no contar las pérdidas dos veces se hace  $5 \log(P_r/P_e)$  para la escala vertical

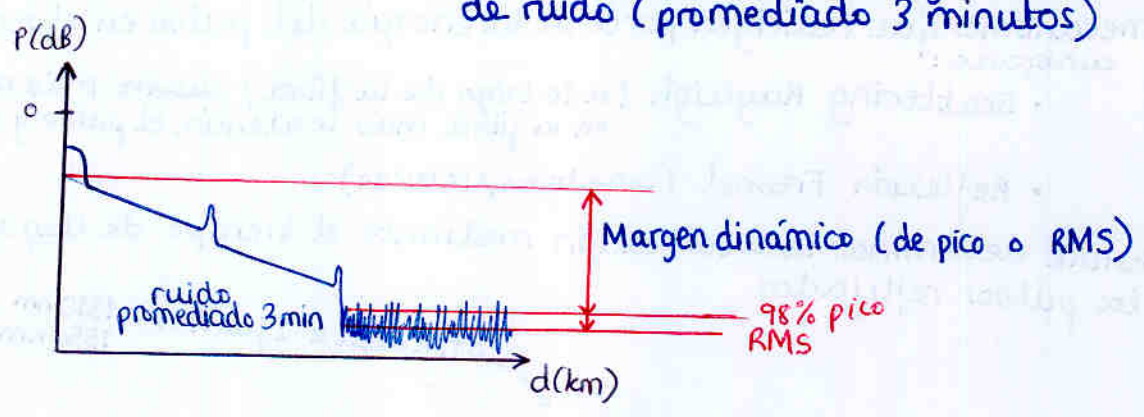
La traza del OTDR es en realidad la convolución de la respuesta impulsiva deseada y del pulso temporal inyectado



Parámetros de calidad del OTDR

• Margen dinámico:

Diferencia entre nivel de potencia de backscattering inicial y el nivel de ruido (promediado 3 minutos)



• Rango de medida

maxima atenuación que puede haber entre el OTDR y un empalme de 0.5 dB de pérdidas para el cual el OTDR todavía puede medirlo

• Zonas muertas

señal reflejada satura el detector del OTDR y la recuperación es lenta → solapamiento



• Resolución espacial

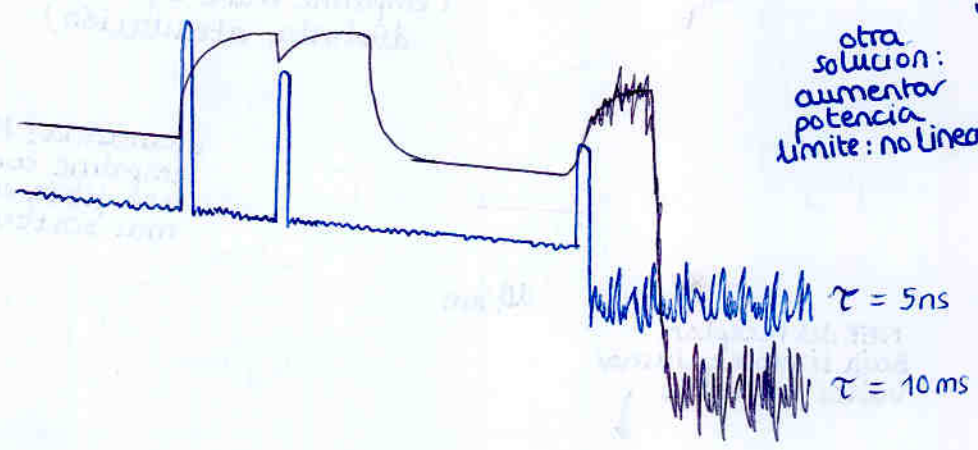
Habilidad para resolver dos eventos adyacentes

$$s(t) = p(t) * f(t) * r(t)$$

↑                    ↑                    ↑                    ↑  
 señal            pulso            respuesta            respuesta  
 recibida        inyectado        de la fibra        del receptor

Compromiso entre resolución y margen dinámico

- Para gran resolución → duración de  $p(t)$  ↓↓ → A receptor debe ser grande → Aumenta nivel de ruido de fondo
- si  $\tau$  grande → potencia que llega al OTDR ↑↑ pero se pierde resolución espacial (se puede solucionar con promediado)



otra solución: aumentar potencia límite: no linealidad

• eventos fantasma por múltiples reflexiones



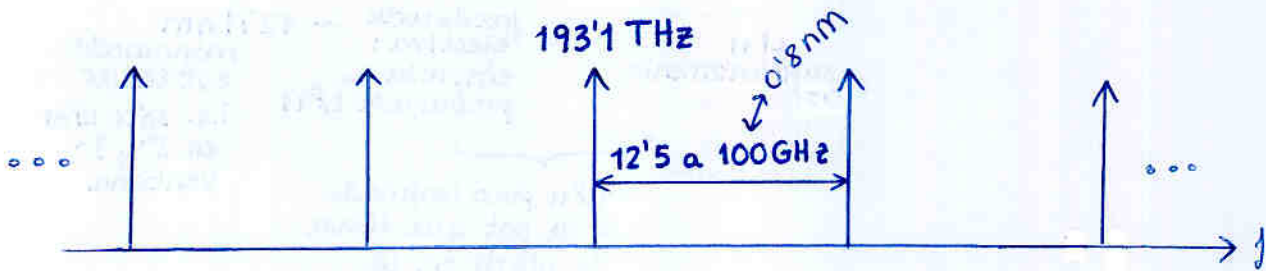
# Práctica 4. Legislación y AWG

## organismos de normalización

- Nacionales :
  - ↳ AENOR → normas UNE
  - comité CTN
- Regionales :
  - ↳ CEN, CENELEC, ETSI (Europa)
  - COPANT (Panamericana)
- Internacionales :
  - ↳ IEC, ITU-T, ISO
  - ↓
  - conferencia CMNT

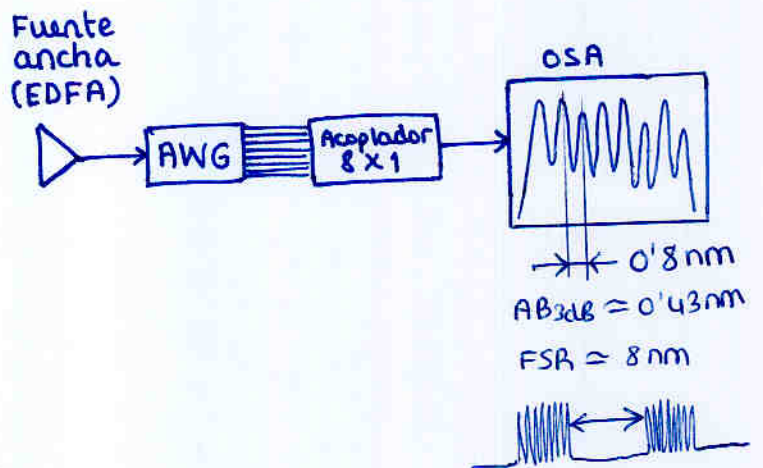
ej: max dispersión en fibra de dispersión desplazada 3'5 ps/nm.km

## Canalización WDM en tercera ventana

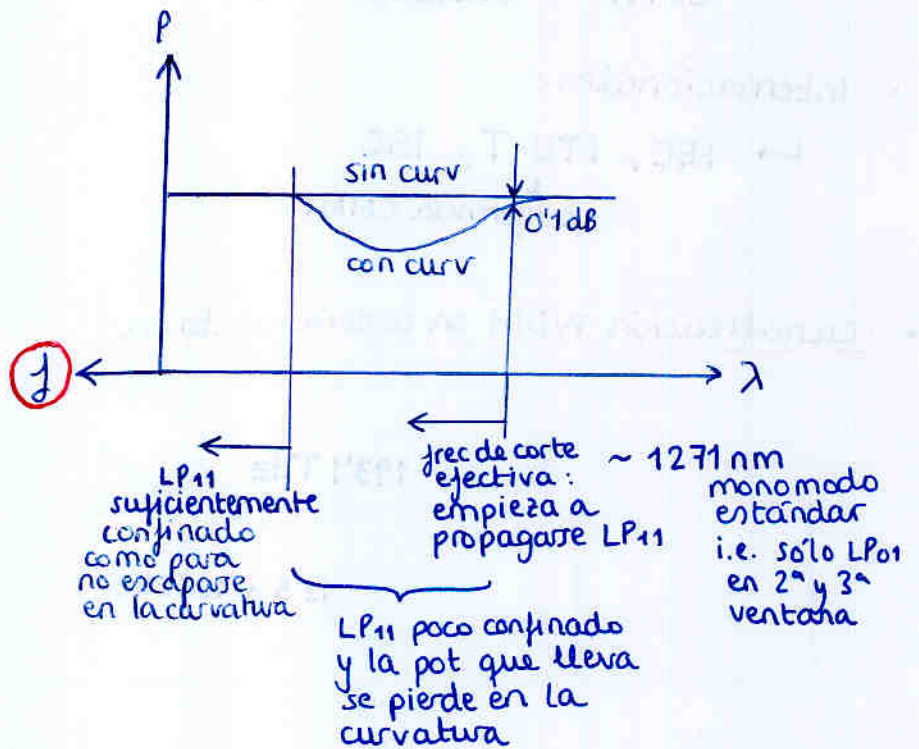
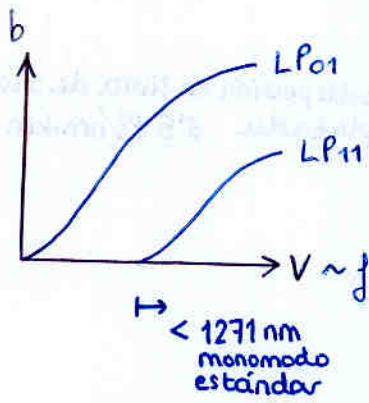


El WDM tiene sus salidas 'sintonizadas' a cada canal

Para comprobarlo:



método de medida de la long. de onda de corte de una F.O.

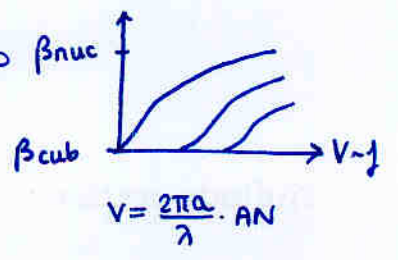
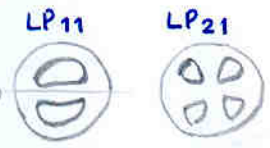


# Práctica 5: Propagación en la fibra óptica

## Programa simulador de modos

LP<sub>lm</sub>  
 ↓  
 n° de ciclos del seno/coseno en θ (cada ciclo = max y min)  
 ↘  
 variación radial

A mayor frec: { modo más confinado  
 nuevos modos se propagan



## Medida de patrones de radiación

Helio-Neón

laser visible  
 633nm

requiere óptica para meter luz en F.O. tan pequeña

F.O. monomodo adaptada a luz visible  
 4 μm !!!

2x2

empalme

Patrón multimodo:

F.O. multimodo con pocos modos  
 8 μm

pantalla

Presionando zonas de la fibra se puede variar el patrón de radiación multimodo

fenómeno granular speckle (interferencias entre modos)

campo lejano

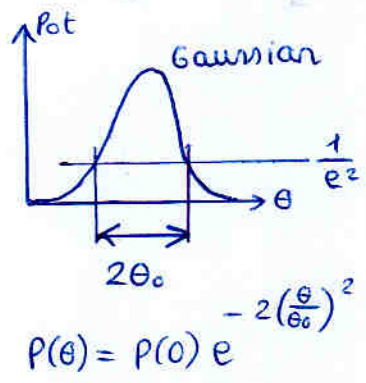
Variador angular

fotodetector

medidor pot

medición del patrón de radiación modo fundamental

medir la pot recibida variando el ángulo

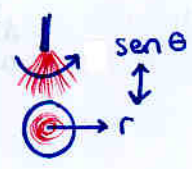


si la pantalla cumple la aprox de campo lejano

$$L > \frac{(2a)^2}{\lambda}$$

entonces la distribución angular = distrib radial en la fibra (r ~ sen θ)

$$\frac{r}{a} = \frac{\text{sen } \theta}{AN}$$



entonces:

$$2\theta_0 \Rightarrow 2w_0 : \text{diámetro de campo modal} \quad w_0 = a \cdot \frac{\text{sen } \theta_0}{AN}$$

$$w_0 = a(0.65 + 1.619V^{-1.5} + 2.879V^{-6})$$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} AN$$

# Medida de AN

recuerda:  $AN = n_{out} \sin(\theta_{max})$

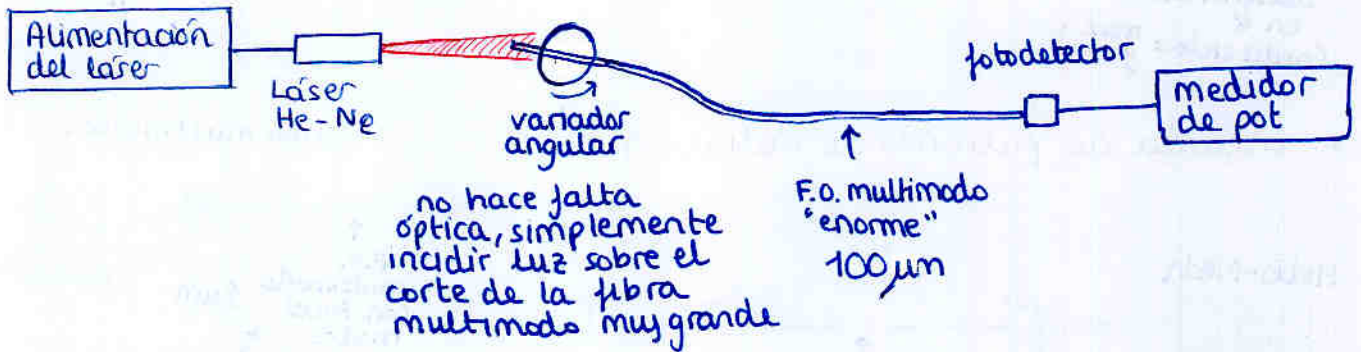
$= n_{core} \cos(\theta_{crit}) \approx n_{core} \sqrt{2\Delta}$

$= \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$

$\Delta = \frac{n_{core} - n_{cl}}{n_{cl}}$   
si  $\Delta \ll 1$

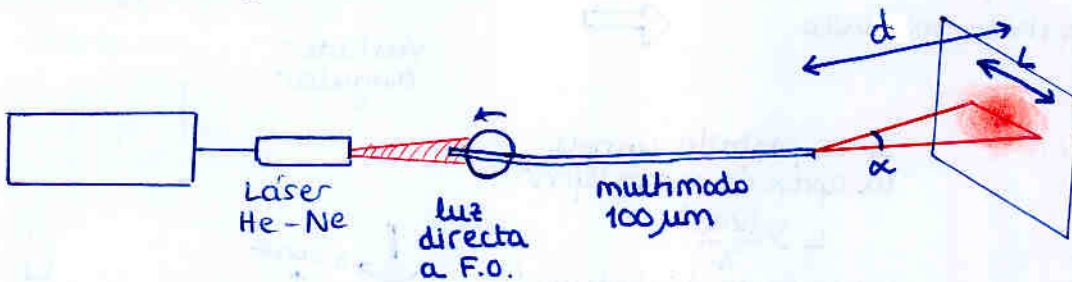
valores típicos: 0.1 para monomodo  
0.2-0.3 multimodo

• método preciso:



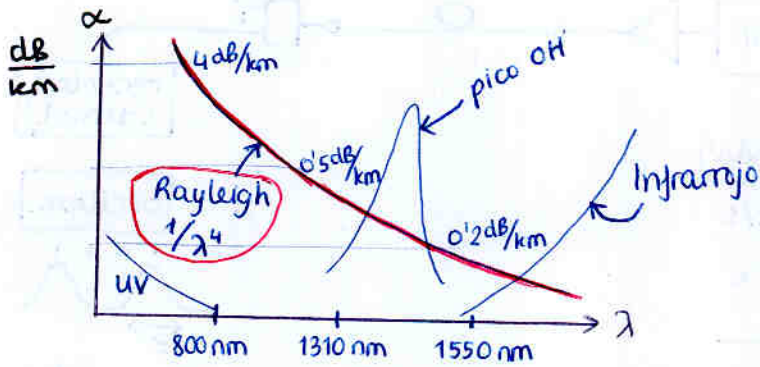
Ir variando el ángulo hasta que la potencia caiga a un 5% ( $5\% = \div 10 \div 2 \rightarrow -13\text{dB}$ )  
tomamos eso como  $\theta_{max}$

• método sencillo



# Practica 6. Atenuación y Dispersión

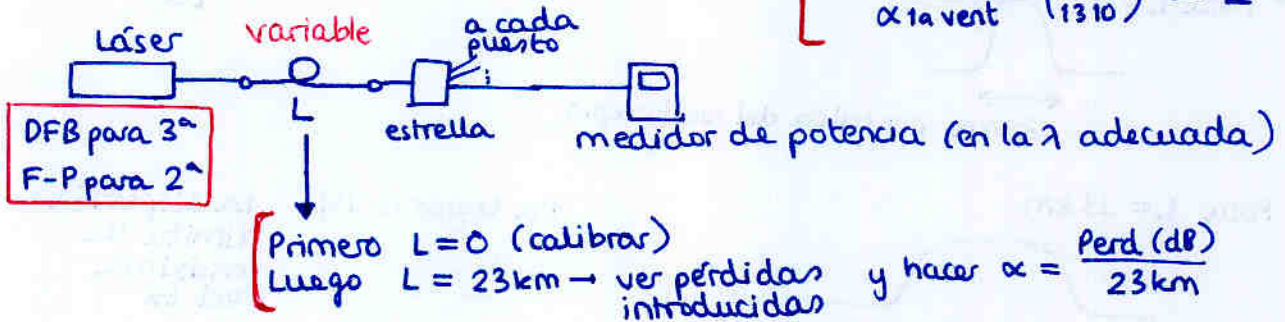
## Medida Atenuación



Previo: Adaptar osciloscopio a 50 Ohm  
 Puertos 5a, 8: configurable por menú  
 Puertos 1a, 4: carga 50 Ohm en paralelo a 1 M Ohm

Suponiendo sólo Rayleigh (es la que marca la diferencia entre 2ª ventana y 3ª)  
 $\alpha \approx k \cdot \frac{1}{\lambda^4}$   
 $\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^4$   
 $\frac{\alpha_{2a vent}}{\alpha_{1a vent}} = \left(\frac{1550}{1310}\right)^4 \approx 2$

### Atenuación en cada ventana:



### Para ver la gráfica $\alpha$ vs. $\lambda$

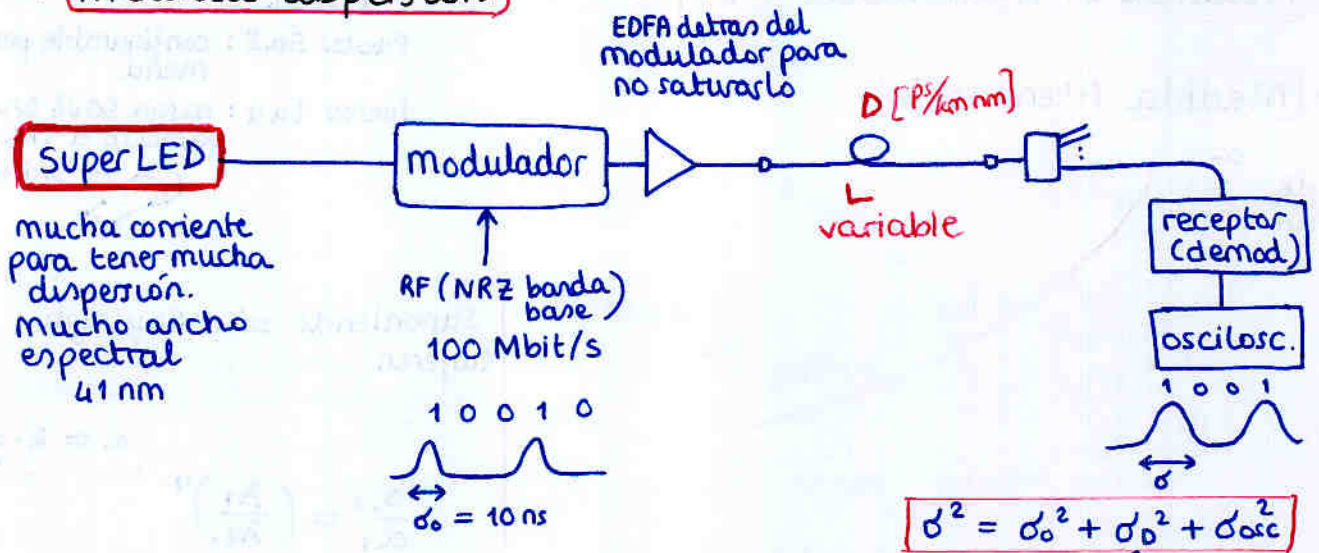
- Igual pero con OSA en lugar del medidor de potencia
- $L=0 \rightarrow$  normalizar

### Pérdidas por curvatura



- Para DFB (3ª ventana)
- señal cae hasta 14 dB para  $R \sim 1$  cm
- Para F-P (2ª ventana)
- apenas afecta (modo más confinado)

medida dispersión



• Para  $L=0$

$\geq 10 \text{ ns}$  por culpa del osciloscopio

• Para  $L=23 \text{ km}$

$\sigma = 18 \text{ ns}$  : por la dispersión

Da lugar a ISI

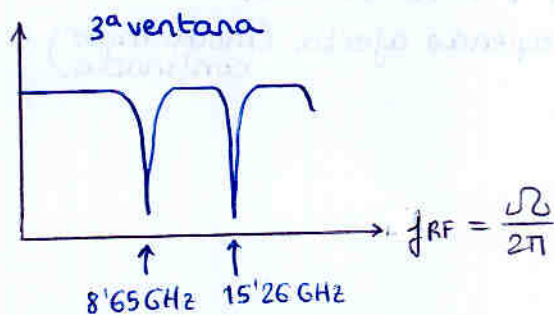
La dispersión limita la máxima vel tx

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma^2 - \sigma_0^2} = 15 \text{ ns}$$

$$= |D| \cdot L \cdot \sigma_\lambda \rightarrow D = 15'9 \text{ ps/km.nm}$$

↑  
superLED  
41 nm

Supresión de portadora



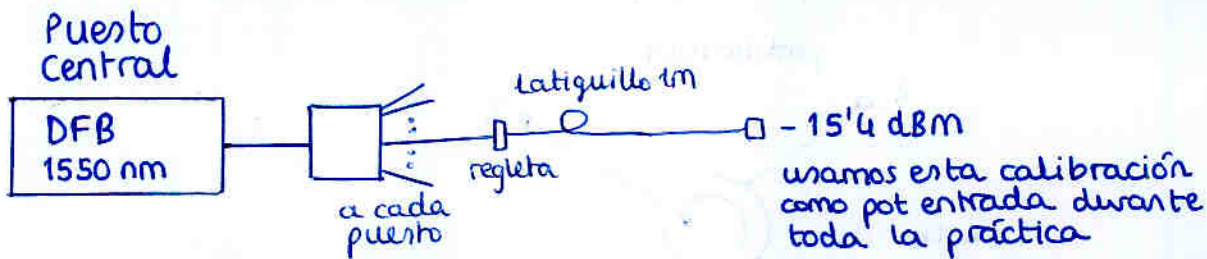
se anula en  $\omega = \sqrt{\frac{(2k+1)\pi}{\beta_2 z}}$

Primer nulo  $\omega_1 = \sqrt{\frac{\pi}{\beta_2 z}} = 2\pi \cdot 8'65 \text{ GHz}$

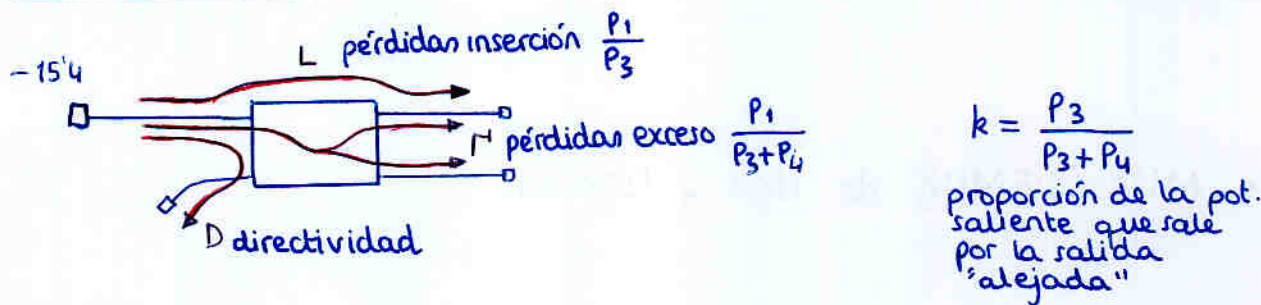
$\beta_2 \text{ s}^2/\text{m}$

$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$   $\frac{\text{s}^2/\text{m}}{\text{km} \cdot \text{nm}} \times 10^6$

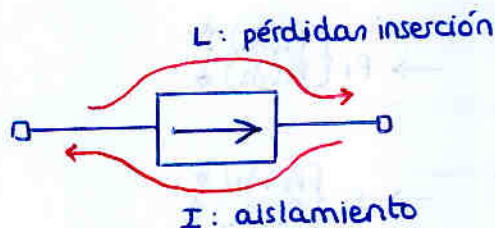
# Práctica 7 - Componentes pasivos en comunicaciones ópticas



## • Acoplador 2x2



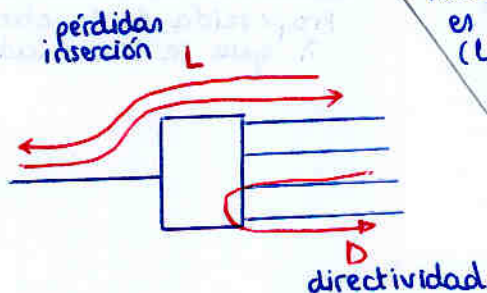
## • Aislador



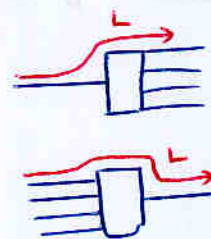
## • Atenuador fijo variable



## • Acoplador 4x1

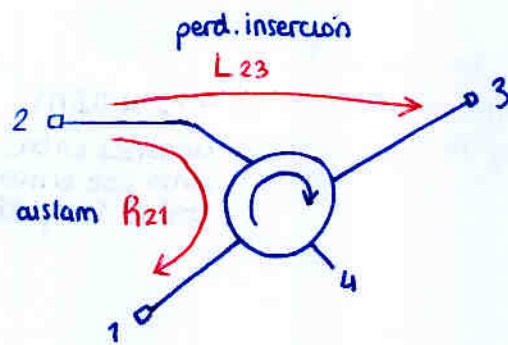


nota: pérdidas de inserción es en ambas direcciones (lo no intuitivo de un acoplador 1xN) piensa que es un NxN con menos 'patillas'

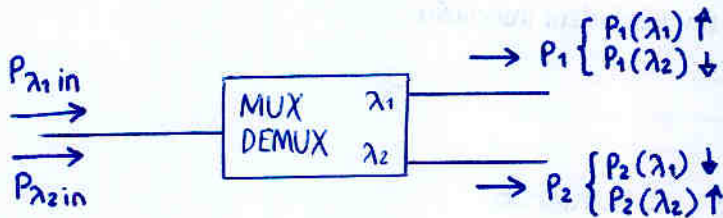


• Circulador

Nota: el circulador de la práctica es de 4 puertos, pero el 4º es inaccesible !



• MUX / DEMUX de 1300 y 1550 nm



Pérdidas inserción  $L = 10 \log \left( \frac{P_1(\lambda_1)}{P_{\lambda_1 in}} \right)$

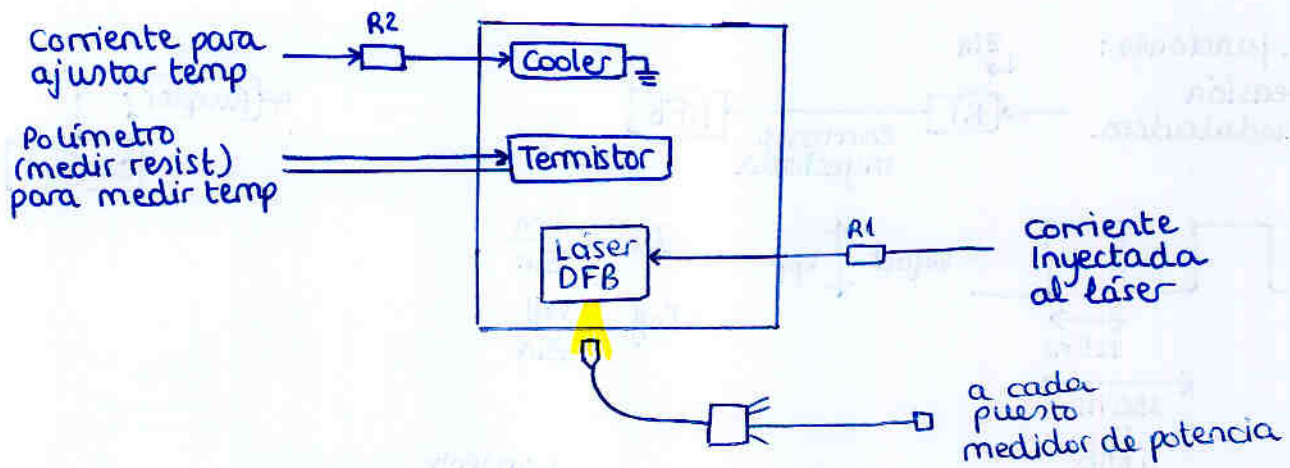
Diafonía  $D = 10 \log \left( \frac{P_1(\lambda_1)/P_{\lambda_1 in}}{P_1(\lambda_2)/P_{\lambda_2 in}} \right)$

para la salida 1.

$\frac{\text{Proporción de la } \lambda \text{ buena que ha pasado}}{\text{Proporción de la otra } \lambda \text{ que se ha colado}}$

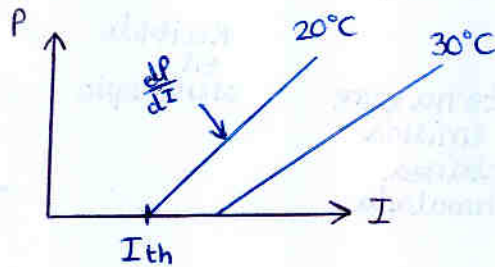


# Práctica 8. El láser de semiconductor



## • Curva potencia vs. corriente

Ir variando corriente y midiendo potencia a distintas temp.



Variación corriente umbral con temp:  $I_{th}(T) = I_0 \cdot e^{\frac{T}{T_0}}$

como  $T_2 = T_1 + 10$

$$I_0 \cdot e^{\frac{T_1}{T_0}} = 19 \text{ mA}$$

$$I_0 \cdot e^{\frac{T_2}{T_0}} = \underbrace{I_0 \cdot e^{\frac{T_1}{T_0}}}_{19 \text{ mA}} \cdot e^{\frac{10}{T_0}} = 22 \text{ mA}$$

$\downarrow$   
 $T_0$

Parámetros:

$$\frac{dP}{dI} = \frac{h\nu}{2e} \cdot \eta_d$$

eficiencia cuántica diferencial  
externa  
total

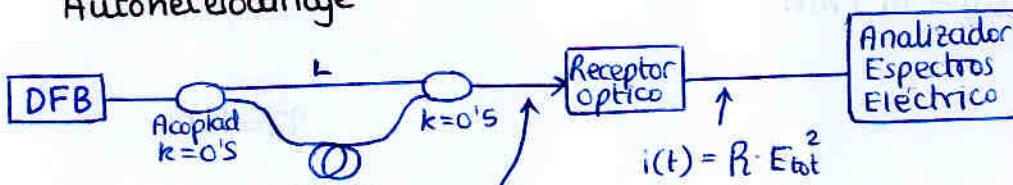
$$\eta_d = \eta_i \cdot \frac{\alpha_{es}}{\alpha_{es} + \alpha_e}$$

$$\eta_{ext} = \frac{n^2 \cdot \text{Pot out}}{n^2 \cdot e^- \cdot \text{in}} = \eta_d \cdot \left(1 - \frac{I_{th}}{I}\right)$$

$$\eta_{tot} = \frac{\text{Pot out}}{\text{Pot in}} = \frac{h\nu}{eV} \cdot \eta_{ext} = \frac{P}{IV}$$

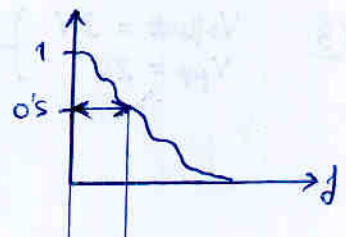
## • Medida del ancho de línea DFB

Autoheterodinaje



$$E_{total} = \frac{E_0}{4} \left( e^{j(\omega_0 t + \theta(t))} + e^{j(\omega_0(t+td) + \theta(t+td))} \right)$$

$\Delta L >$  long. de coherencia de la fuente

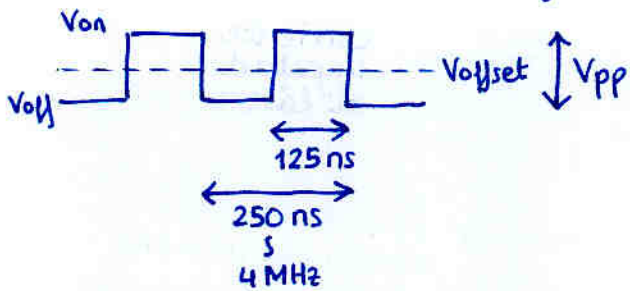
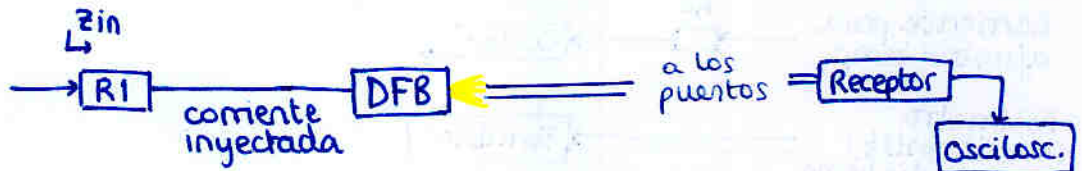


$$\frac{\Delta \nu_{2FWHM}}{2} = \Delta \nu_{DFB}$$

$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\Delta \nu_2}{\Delta \nu_1}$  → 60 ~ 125 MHz a más potencia, menor ancho línea

• Tiempo de conmutación del laser

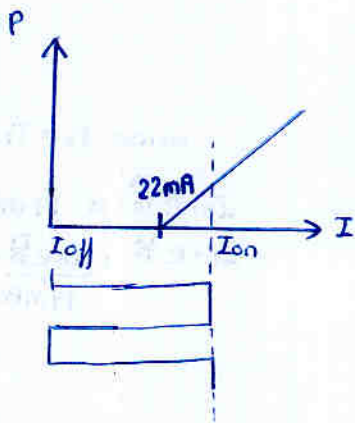
gen. funciones:  
tensión  
moduladora



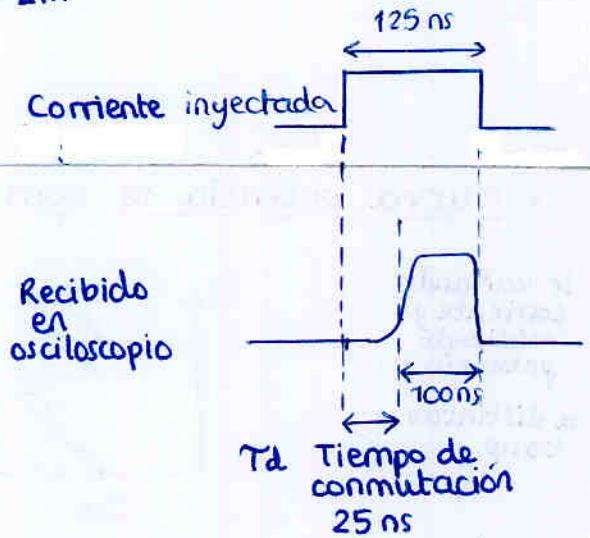
$$I_{on} = \frac{V_{on}}{Z_{in}}$$

$$I_{off} = \frac{V_{off}}{Z_{in}}$$

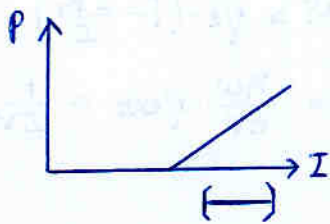
①  $V_{offset} = 2V$   
 $V_{pp} = 4V$  }  $I_{on} = 28.6 mA$   
 $I_{off} = 0 mA$



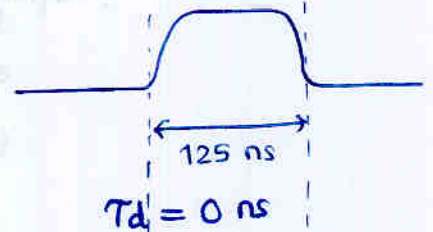
se alterna entre zona emisión espontánea y estimulada



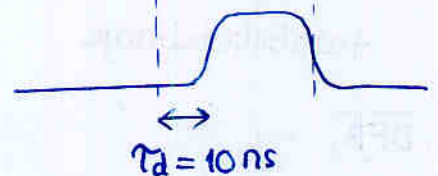
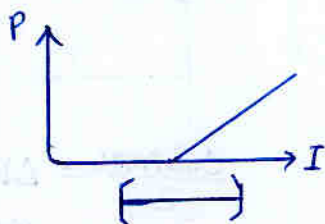
②  $V_{offset} = 4V$   
 $V_{pp} = 2V$  }  $I_{on} > I_{th}$   
 $I_{off} > I_{th}$



si tanto Ion como Ioff > Ith, no hay tiempo de conmutación



③  $V_{offset} = 3V$   
 $V_{pp} = 2V$  }  $I_{on} = 28.6 mA$   
 $I_{off} = 16.3 mA$



A partir de Td (tiempo de conmutación) saca Tc (tiempo vida portadores)

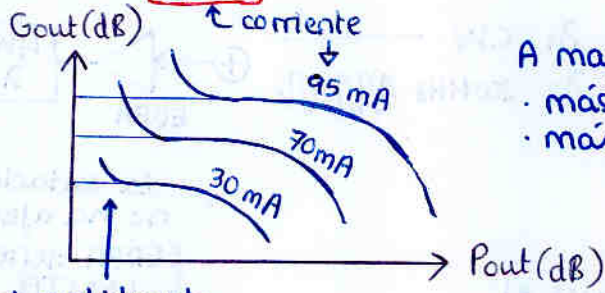
$$T_d = T_c \cdot \ln\left(\frac{I_{on} - I_{off}}{I_{on} - I_{th}}\right)$$

# Práctica 9. El amplificador óptico

## Ganancia óptica y fenómeno de saturación



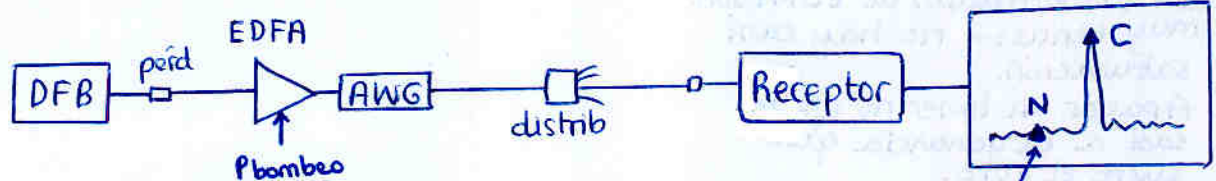
Midiendo obtenimos:



A mayor bombeo  
 • más ganancia  
 • más tarda en saturarse

se debe a que el medidor de pot no sabe distinguir señal amplificada y ruido.

## Ruido en amplificadores ópticos

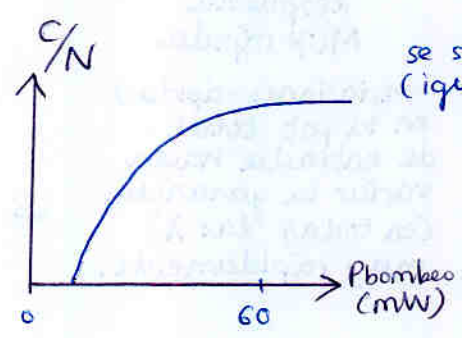
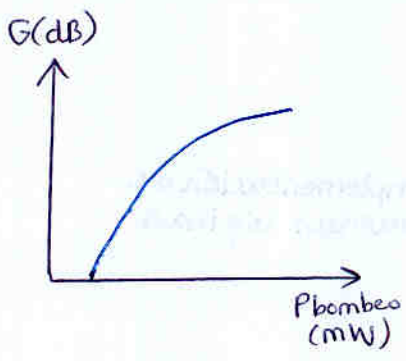


- sin receptor encendido → Ruido del propio analizador
- encendiendo receptor, pero sin láser → Ruido térmico del receptor
- encendiendo láser:

recuerda: la pot de ruido que mides es para un  $\Delta f = \Delta f$  resolution i.e.  $-14 \text{ dBm}/30 \text{ kHz}$



midiendo para distintos bombeos

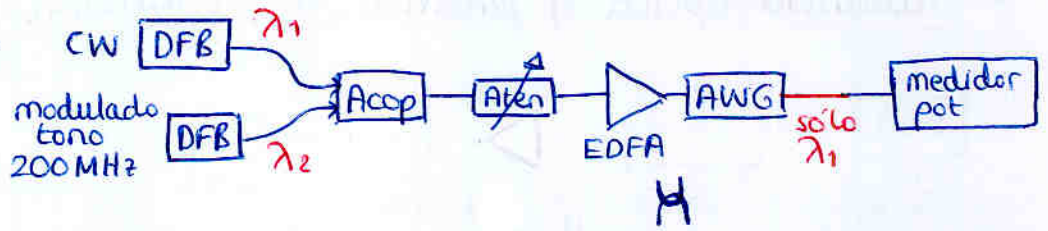


se satura la  $C/N$  (igual que la ganancia)

• Comportamiento dinámico lento

i.e. como varía la ganancia con la potencia media a la entrada

Dos láseres que podemos apagar y encender



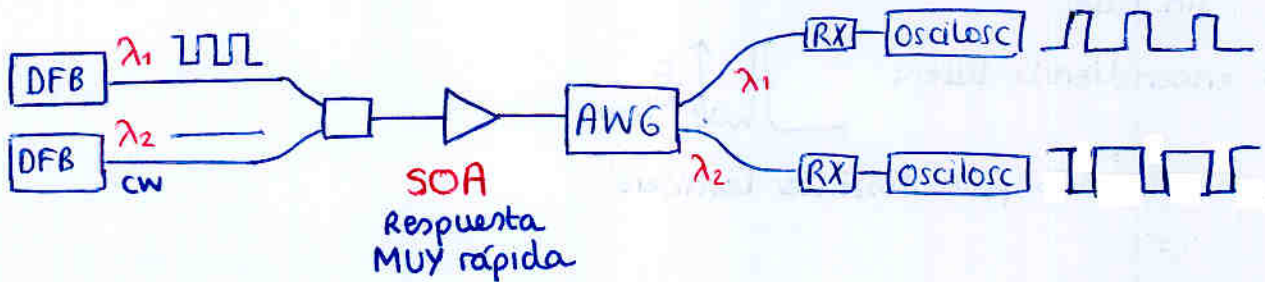
Variaciones lentas:

- Con poca atenuación
  - Apagar un láser hace que el otro sufra mayor ganancia (menor pot. entrada al EDFA = menor sat. ganancia)
- Con mucha atenuación
  - Las dos entradas al EDFA son muy tenues → no hay casi saturación. Apagar un láser no afecta casi a la ganancia que sufre el otro.

la variación rápida de  $\lambda_2$  no afecta a  $\lambda_1$  (EDFA tiene respuesta) LENTA

nota: tras el receptor no hay señal ya que no hay nada modulado

• Comportamiento dinámico rápido (XGM: cross modulation)

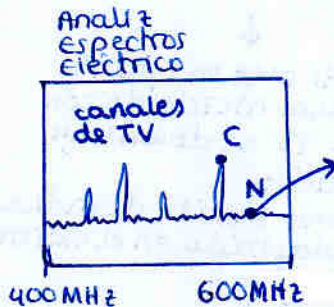
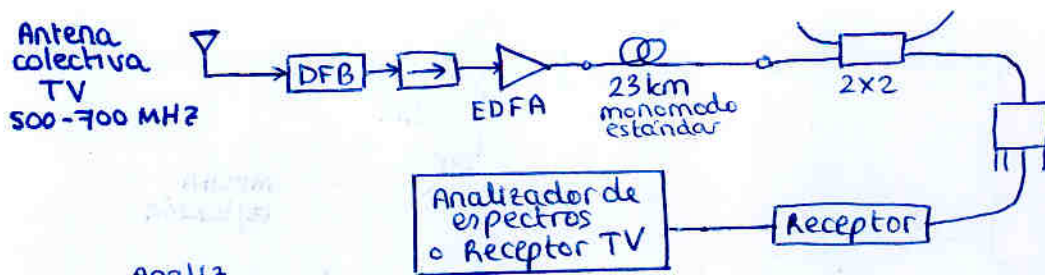


variaciones rápidas en la pot total de entrada hacen variar la ganancia (en todas las  $\lambda$ ) muy rápidamente.

→ Implementación de puertas lógicas

# Práctica 10. Sistemas ópticos de transmisión multiplexados

## • SCM (Sub Carrier Multiplexing)

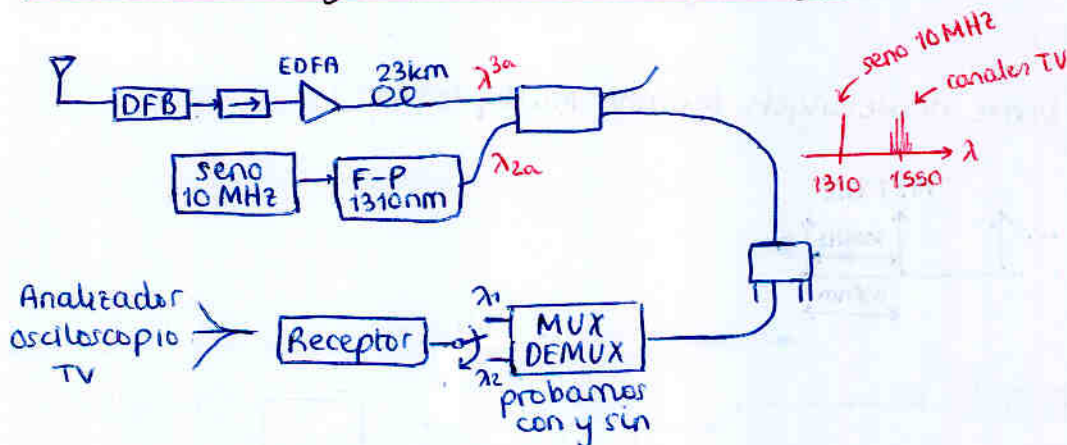


cuidado  
 $A_{\text{analizador}} = 100 \text{ kHz}$   
 $A_{\text{canal TV}} = 6 \text{ MHz}$   
 Por tanto para obtener  $\frac{C}{N}$  / canal  
 hay que multiplicar el  
 ruido en lineal por 60

nº canal	frec	C/N (dB)
28	527'25	23
22	479'25	8

En el receptor de TV se ven bien los canales con buena C/N

## • WDM (wavelength Division Multiplexing)



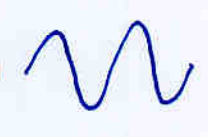
### → Sin DEMUX:

- En el osciloscopio vemos el seno 10 MHz superpuesto a TV y FM
- En el receptor de TV, el canal se ve bien  
 Lógico que un tono de 10 MHz no moleste al canal de TV en 527'25 MHz si ponemos el tono a la frecuencia de UHF, el tono destroza el canal TV



### → Con DEMUX

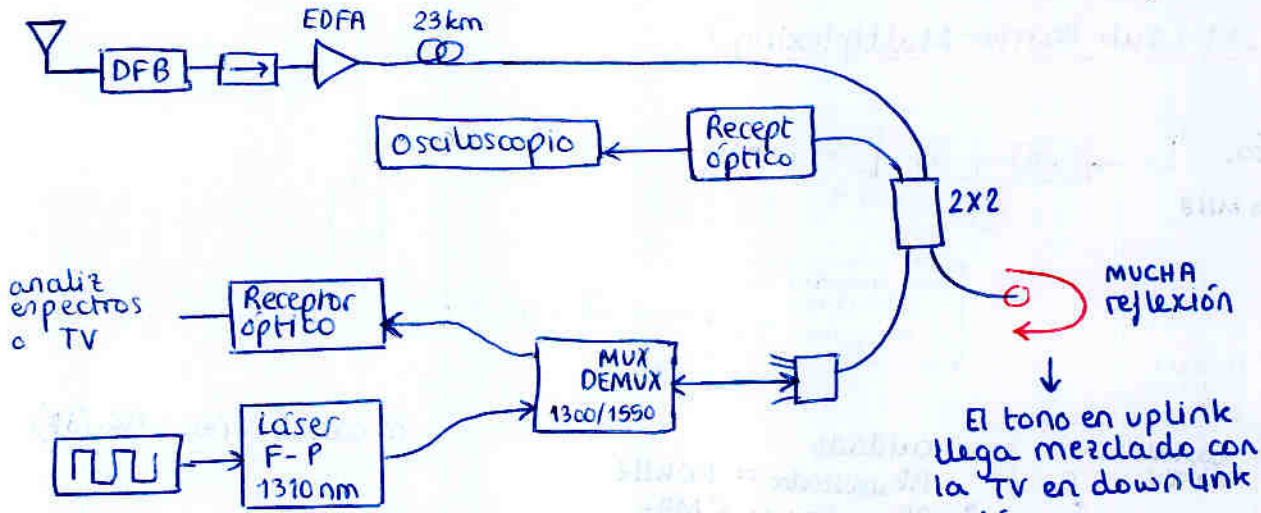
- En el osciloscopio vemos el tono 10 MHz (i.e. antes del receptor el DEMUX a filtrado los 1310 nm)
- El canal de TV se ve bien  
 Si ponemos el tono a la frec de UHF, el canal de TV empeora un poco  
 ⇒ Diafonía entre las dos  $\lambda$ 's en el DEMUX (se cuela algo) pero se sigue viendo



• WDM bidireccional

Bajada: 3ª ventana  
Subida: 2ª ventana

} aunque se podría hacer a la misma  $\lambda$ , pero daría más problemas



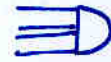
análisis espectro de TV

Limitaciones:

- Funcionamiento unidireccional de ciertos equipos
- Reflexiones (conectores, cables al aire, ...)
- Elevada potencia → señal reflejada por backscattering

Solución:

- Poner líquido de índice adaptado en el extremo



- usar conector APC



• DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

