

BLOQUE	TÍTULO
<i>Tema 0</i>	Introducción a las Comunicaciones ópticas
<i>BLOQUE I</i>	La transmisión de información por enlaces básicos de comunicación por fibra óptica
<i>I.1.-</i>	Generación de la portadora: fuentes de luz
<i>I.2.-</i>	Modulación de la portadora óptica con la información
<i>I.3.-</i>	Multiplexación de varias fuentes de información
<i>I.4.-</i>	Transmisión de información por la fibra óptica
<i>I.5.-</i>	La detección de la información: receptores ópticos
<i>I.6.-</i>	Componentes activos y pasivos





# Ing. Telecom., CC.OO.: el receptor



## Tema que se va a presentar



U. P b. Navarra

BLOQUE	I.5 La detección de la información: receptores ópticos
Objetivos	<p>Se pretende que el alumno sea capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Conocer los procesos de detección de luz y los tipos básicos de detectores.</li><li>• Identificar los parámetros relevantes de la conversión óptico-eléctrica.</li><li>• Entender el funcionamiento de los fotodiodos PIN y APD, siendo capaz de comparar ambos dispositivos.</li><li>• Asimilar los conceptos de límite cuántico y NEP.</li><li>• Establecer las ventajas y desventajas de los distintos tipos de preamplificadores.</li><li>• Aprender los mecanismos que provocan la aparición de ruido en el receptor y saber cuál limita la calidad de la señal según la configuración del sistema.</li><li>• Definir el concepto de sensibilidad y describir las causas de degradación.</li><li>• Interpretar las curvas potencia recibida-B.E.R. y similares..</li></ul>
Duración	4 horas
Programa	<p><b>Tipos: detección directa y detección coherente</b></p> <p><b>Detectores ópticos</b></p> <p>Conceptos básicos</p> <p>Tipos: PIN; APD</p> <p>Ruido en fotodiodos</p> <p><b>Receptores ópticos</b></p> <p>Diseño del receptor (preamplificador, filtrado, recuperación reloj circuito de decisión)</p> <p>Ruido en el receptor</p> <p>Sensibilidad de receptores digitales</p> <p><b>Resumen Conclusiones</b></p>

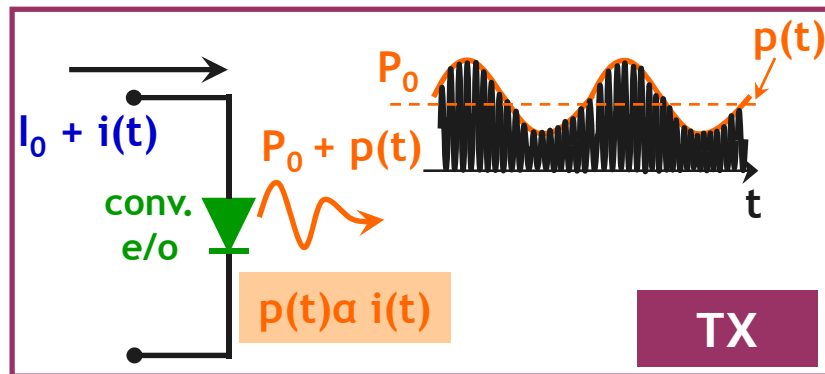
- 
- Introducción: tipos de detección
  - Detectores  pticos
    - Conceptos básicos
    - Fotodiodos PIN y APD
    - Ruido en detectores
  - Receptores  pticos
    - Otros componentes del receptor
    - Ruido en el receptor
    - Sensibilidad y relación con calidad, penalizaciones en potencia
  - Resumen y conclusiones
- 

- 
- Introducción: tipos de detección
  - Detectores  pticos
    - Conceptos básicos
    - Fotodiodos PIN y APD
    - Ruido en detectores
  - Receptores  pticos
    - Otros componentes del receptor
    - Ruido en el receptor
    - Sensibilidad y relación con calidad, penalizaciones en potencia
  - Resumen y conclusiones
- 

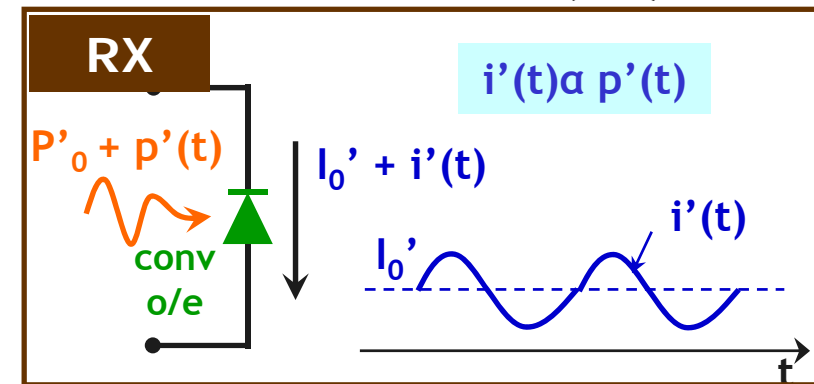
La función de los receptores ópticos es **convertir las señales ópticas a señales eléctricas** y **recuperar la información** transmitida a través de los sistemas comunicación óptica.

Dos tipos según estuviese codificada la información: coherente, incoherente (detección directa)

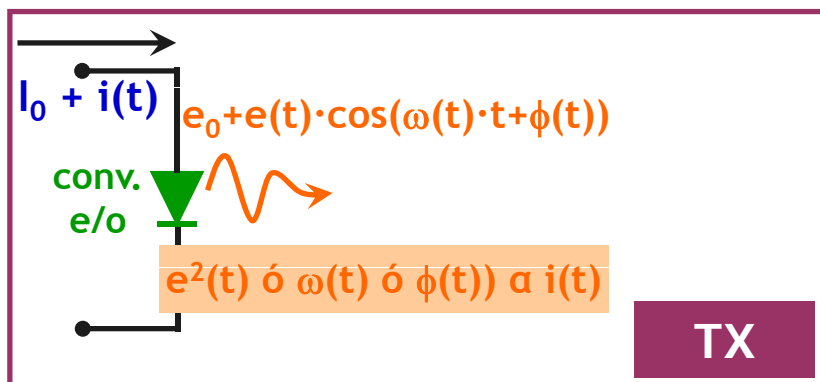
### Modulación en intensidad (IM)



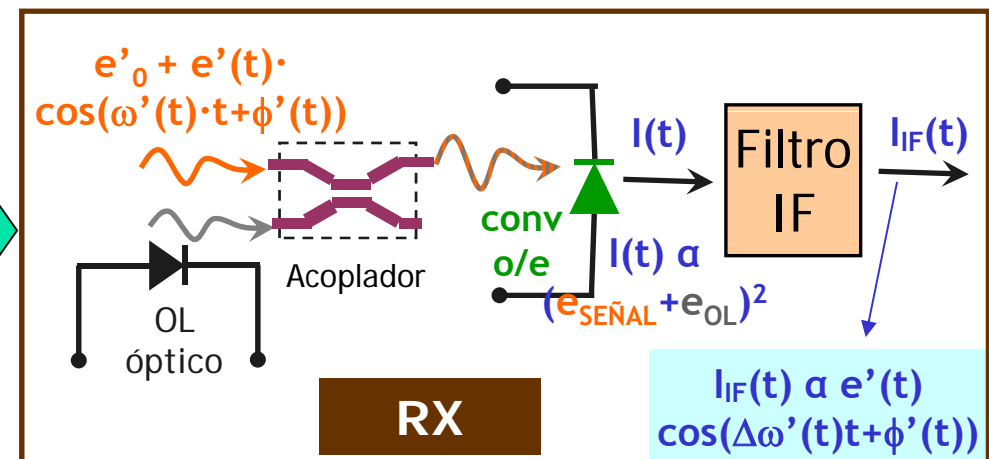
### Detección directa (DD)



### Mod. intens, fase o frecuencia



### Detección coherente



# Ing. Telecom., CC.OO.: el receptor

## Introducción: diagrama de bloques del receptor

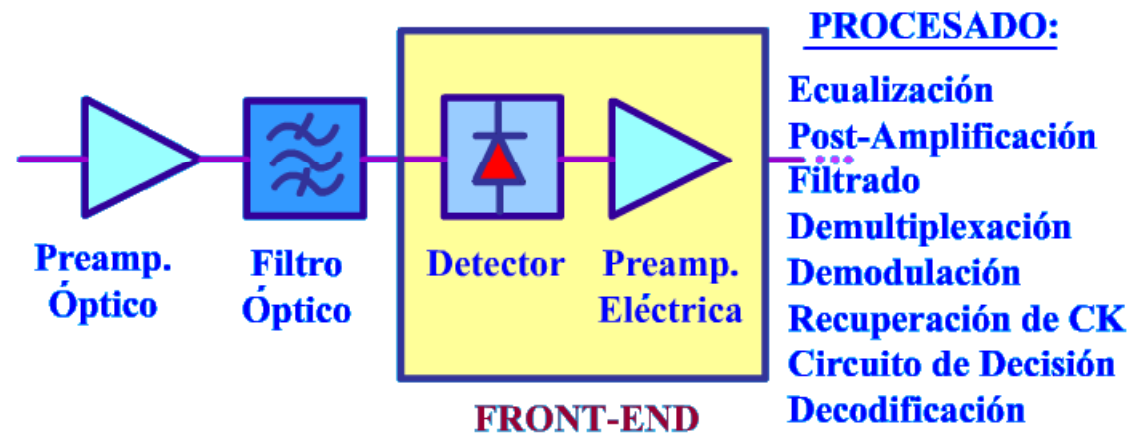


U. Pùb. Navarra

Los receptores están formados por varios componentes, de los cuales el fundamental es el **fotodetector** que realiza la conversión óptico-eléctrica

Pueden incluir preamplificadores ópticos o no, pero prácticamente siempre incluyen un preamplificador eléctrico a la salida del PD puesto que las señales eléctricas obtenidas son débiles.

El resto de circuitos del receptor dependen de si el sistema emplea señales analógicas o digitales

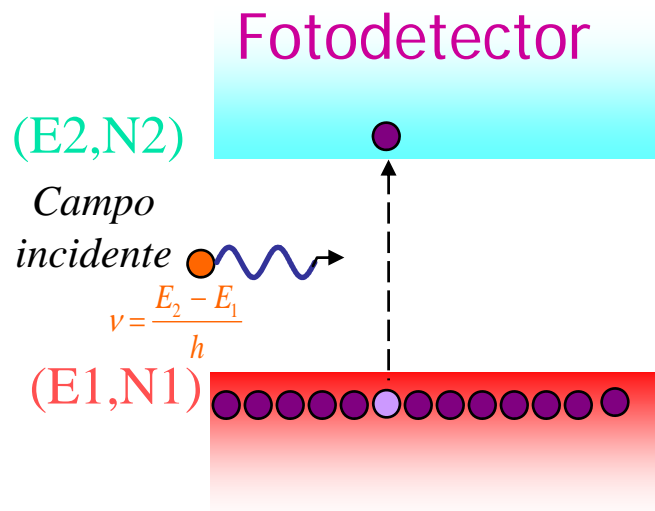


Los fotodetectores deberían tener las siguientes propiedades idealmente

- Alta sensibilidad
- Alta velocidad de respuesta
- Poco ruido
- Compacto, robusto
- Bajas tensiones o int. de polarización
- Respuesta lineal

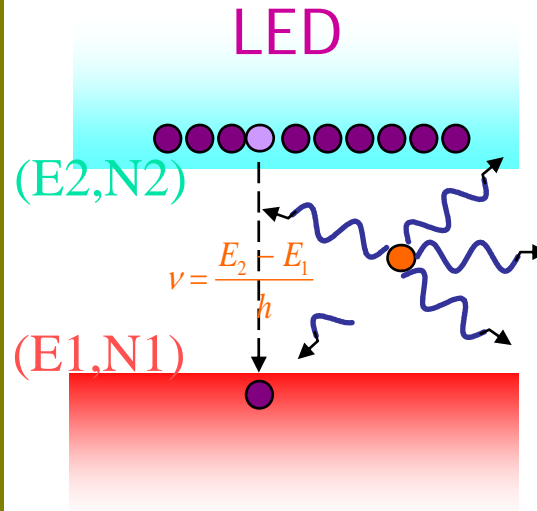
- 
- Introducción: tipos de detección
  - Detectores  pticos
    - Conceptos básicos
    - Fotodiodos PIN y APD
    - Ruido en detectores
  - Receptores  pticos
    - Otros componentes del receptor
    - Ruido en el receptor
    - Sensibilidad y relación con calidad, penalizaciones en potencia
  - Resumen y conclusiones
- 

La interacción entre fotones y materia (semiconductores) se explica con tres mecanismos básicos



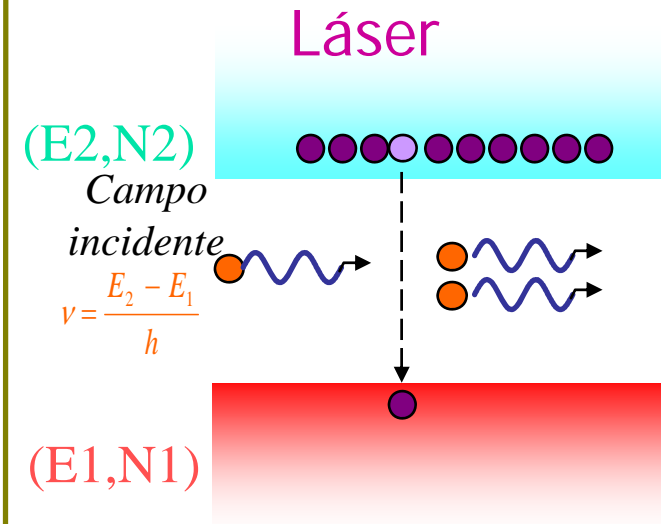
### Absorción

- Un fotón incide en el material
- La energía del fotón es absorbida por el material, que queda en un estado de mayor energía
- Un electrón pasa de la banda de valencia a la de conducción



### Emisión Espontánea

- Un electrón pasa de la BC a la BV, donde se recombina con un hueco
- El sistema pasa a un estado de menor energía
- Se genera un fotón (de fase y direcc. propagación arbitrarias)

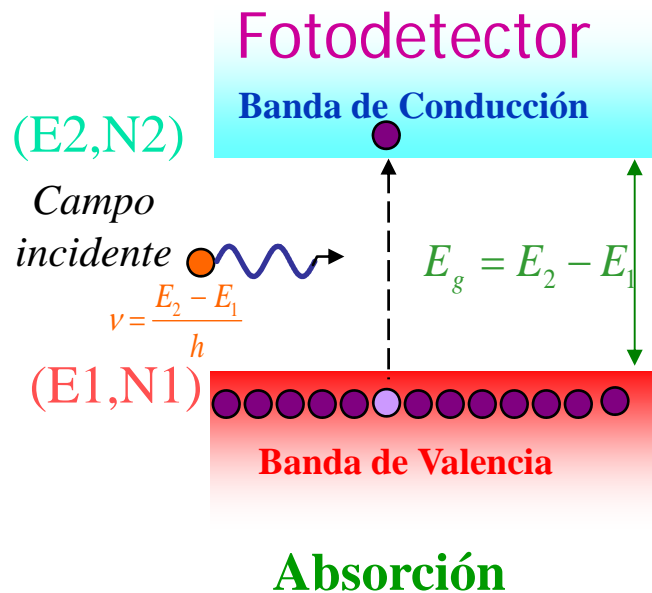


### Emisión Estimulada

- Un fotón incide en el material
- Un electrón pasa de la BC a la BV, donde se recombina con un hueco
- Se genera un fotón (de fase y direcc. propagación idénticas al incidente)



El primer paso en la detección es generar pares e-h en respuesta a la luz incidente. Se suelen usar materiales semiconductores



- Un fotón incide en el material
- La energía del fotón es absorbida por el material, que queda en un estado de mayor energía
- Un electrón pasa de la banda de valencia a la de conducción

Para que se produzca la absorpci n debe cumplirse

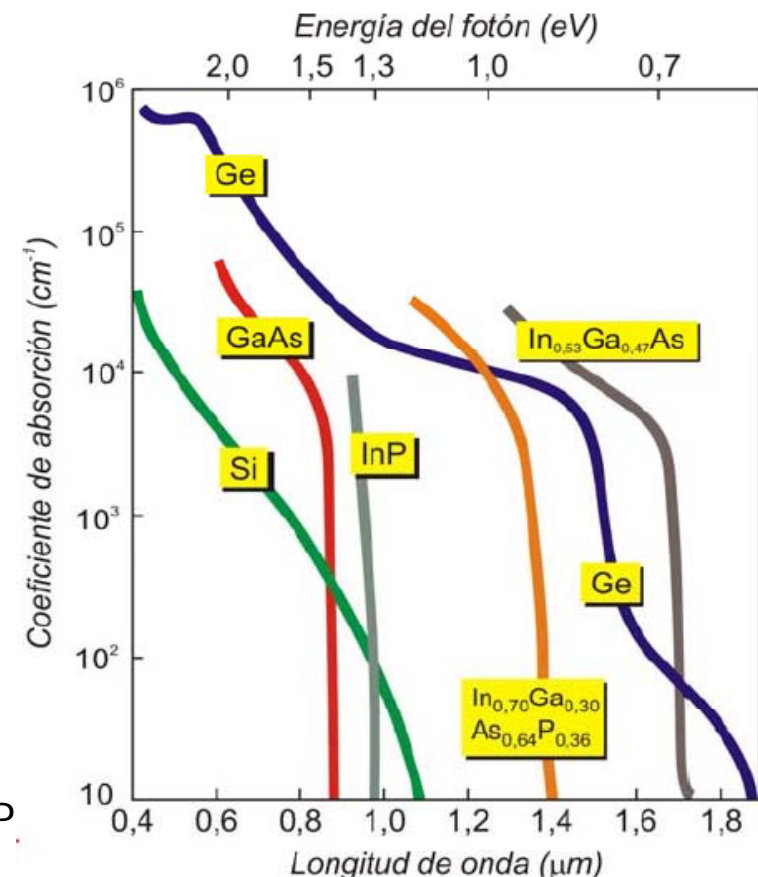
$$E_g < h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

Según la longitud de onda, esto lo cumplen unos materiales u otros.

Se expresa en forma del coeficiente de absorpci n,  $\alpha$

$$P_{abs} = (1 - e^{-\alpha L}) P_{in}$$

- 1  ventana, Si
- 2 , 3  ventana, InGaAs, InGaAsP.

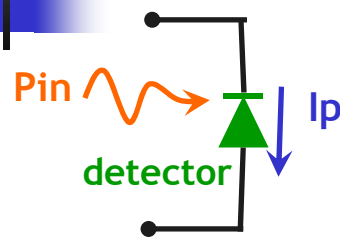


# Ing. Telecom., CC.OO.: el receptor

## Conceptos básicos, parámetros importantes en fotodetectores



U. Pùb. Navarra



*Para conseguir estos valores de  $R$  altos, se necesitan estructuras especiales (PIN)*

**Eficiencia cuántica,  $\eta$** , relación entre la tasa de electrones generados y la tasa de fotones incidentes.

$$\eta = \frac{n_{el}}{n_{fot}} = \frac{I_p / e}{P_{in} / h\nu}$$

**Responsividad,  $\mathcal{R}$** , (A/W), relación entre la intensidad eléctrica de salida y la potencia óptica de entrada

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_{in}} = \frac{\eta e}{h\nu} \approx \frac{\eta \lambda}{1.24}$$

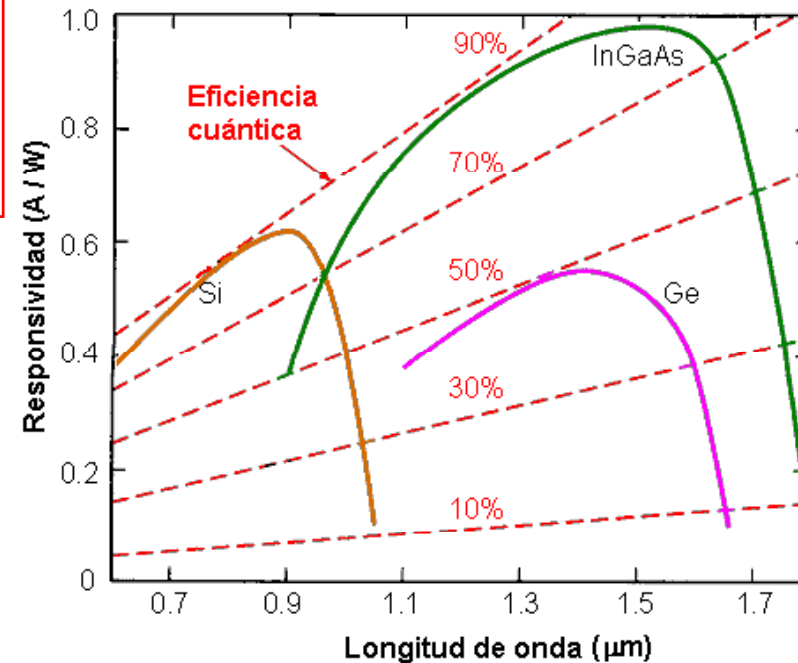
**Tiempo de subida,  $T_r$** , tiempo en el que la corriente va desde el 10% al 90% de su valor final, cuando la pot. ópt. cambia abruptamente

$$T_r = (\ln 9)(\tau_{tr} + \tau_{RC})$$

$\tau_{tr}$  : tiempo que tarda un e en cruzar la zona de absorción

$\tau_{RC}$  : cte de tiempo del circuito RC equivalente

**Ancho de banda,  $\Delta f$** ,  $\Delta f = [2\pi(\tau_{tr} + \tau_{RC})]^{-1}$

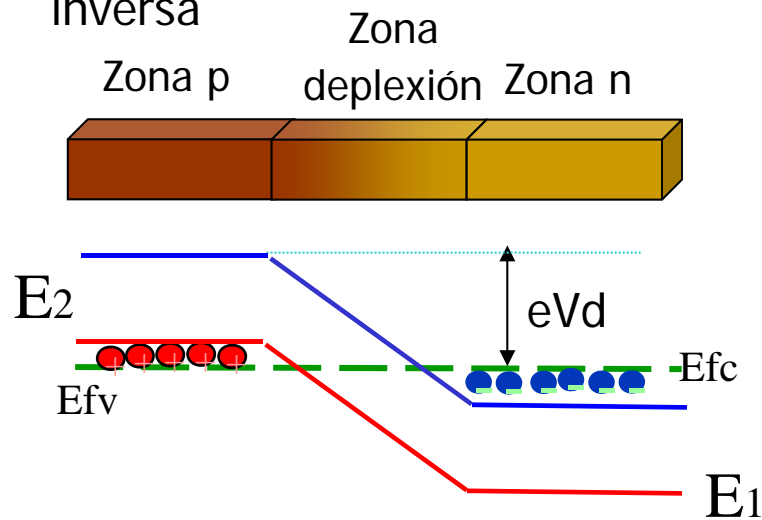


$\mathcal{R}$  aumenta con  $\lambda$  porque hay más fotones para la misma pot. óptica. Y cada fotón contribuye a la formación de pares e-h. Pero esto ocurre hasta el límite en que  $h\nu = E_g$

**Corriente de oscuridad,  $I_d$** , corriente en ausencia de potencia óptica. Se origina por luz ambiental o por pares e-h generados térmicamente.

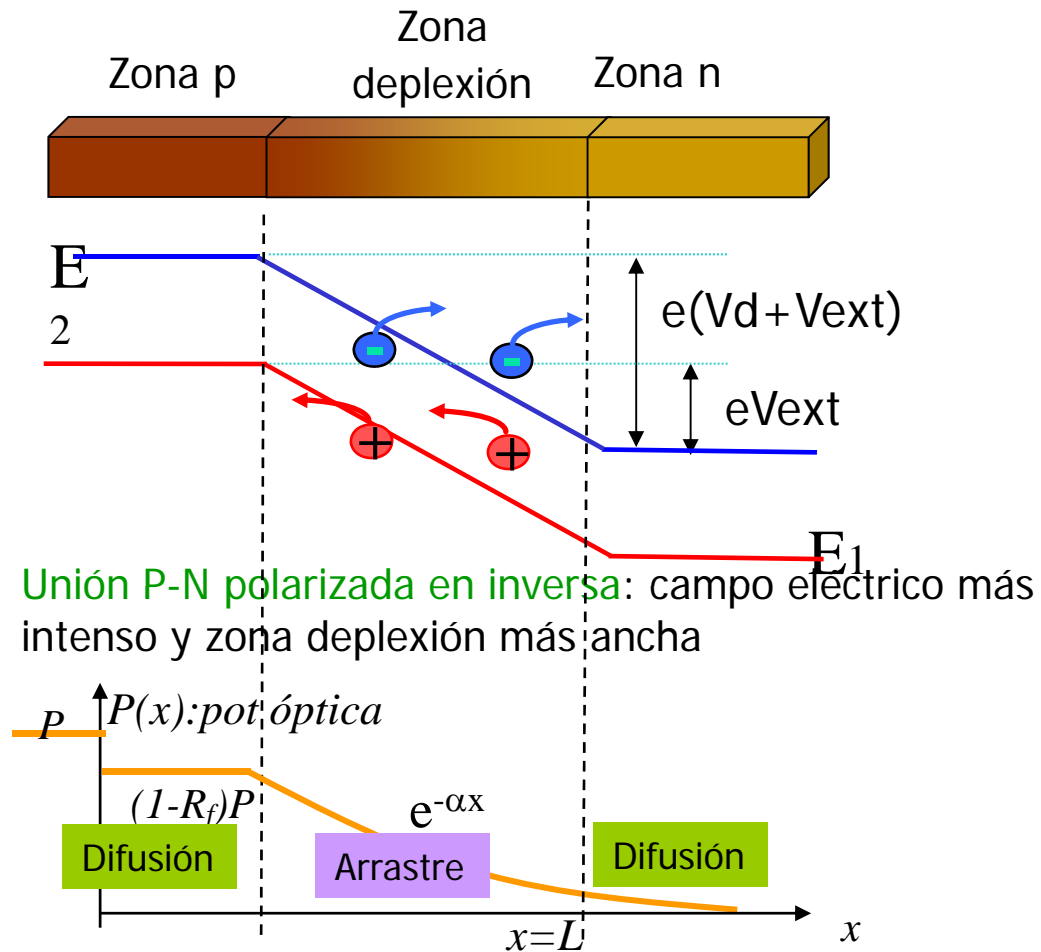
Nivel aceptable :  $I_d < 10$  nA

El segundo paso en la detección es generar una corriente a partir de los pares e-h, sometiéndolos a un campo eléctrico. Para ello, unión P-N y mejor polarizada en inversa



Unión P-N no polarizada: campo eléctrico en la zona deplexión

$$\eta = \frac{P/(h\nu)(1-R_f)[1-\exp(-\alpha L)]}{P/(h\nu)(1-R_f)(1-\exp(-\alpha L))} =$$



Unión P-N polarizada en inversa: campo eléctrico más intenso y zona deplexión más ancha

Para  $\eta=1$ ,  $R_f=0$  (capa de recubrimiento antirreflectante),  $\alpha L \rightarrow \infty$ , aumentar  $L$  al máximo. Evitar tiempo de difusión, que limita ancho de banda

- 
- Introducción: tipos de detección
  - Detectores  pticos
    - Conceptos básicos
    - Fotodiodos PIN y APD
    - Ruido en detectores
  - Receptores  pticos
    - Otros componentes del receptor
    - Ruido en el receptor
    - Sensibilidad y relación con calidad, penalizaciones en potencia
  - Resumen y conclusiones
- 

Una manera simple de aumentar el ancho  $L$  de la región de vaciamiento, consiste en insertar una capa de material semiconductor no dopado (o levemente dopada) (intrínseco) entre los materiales p y n

## Fotodetector PIN

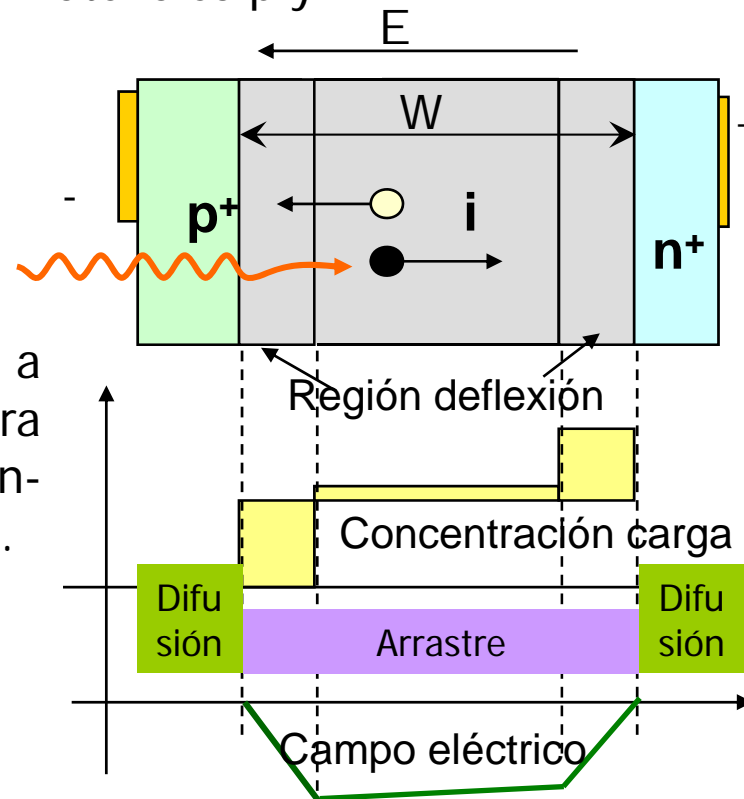
Con respecto a fotodiodo PN, mejora la eficiencia -responsividad- y la rapidez.

### Valores t picos

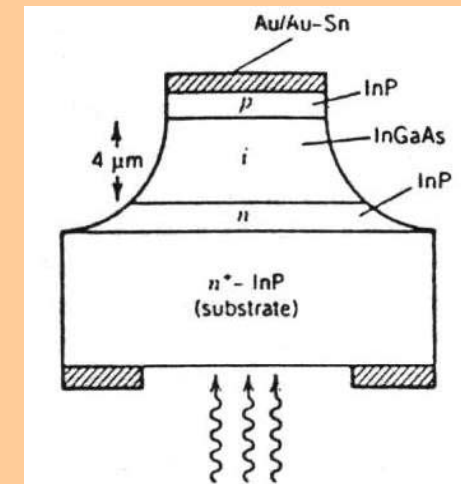
$\eta$  casi del 100%

Anchos de banda  
>10GHz

Respons. 0.5-0.8 A/W



Compromiso para elegir la anchura de capa intrínseca entre rapidez y sensibilidad.

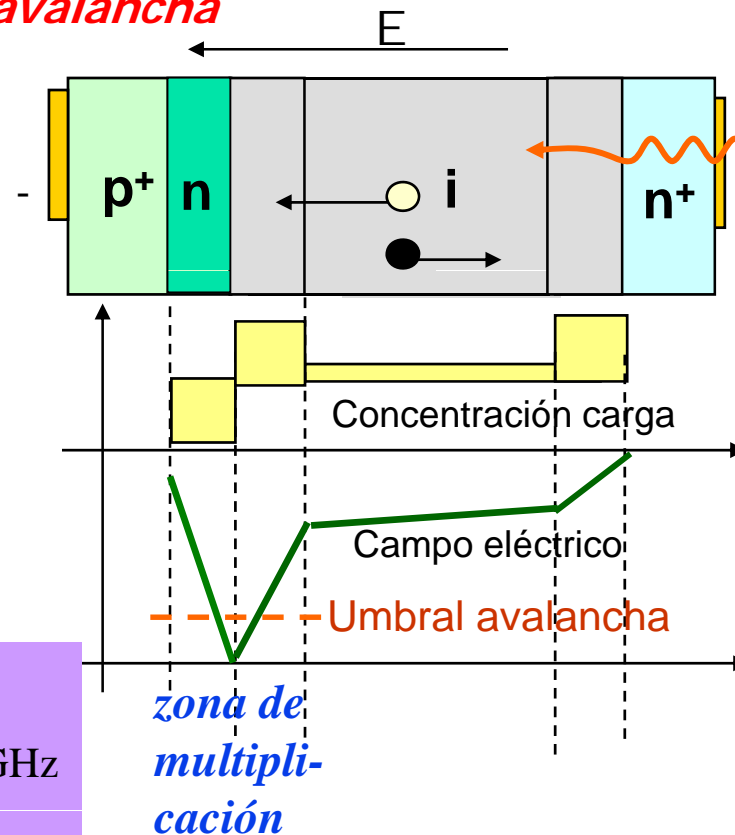


Uso de doble heteroestr.: la capa (i) se ubica entre capas tipo-p y tipo-n de diferentes semiconductores, cuyo *bandgap* se escoge de manera que la luz sea absorbida solamente en la capa i.

En los diodos de avalancha (APD) se busca aumentar la responsividad mediante el efecto de avalancha, basado en crear otra unión p-n polarizada fuertemente en inversa en la que hay un intenso campo eléctrico. Los portadores acelerados en esta zona adquieren una enorme energía cinética y son capaces de liberar nuevos pares e y h. De esta manera, un portador (e o h) primario genera múltiples portadores secundarios mediante la

***multiplicación por avalancha***

**Fotodetector  
APD**



Valores t picos

Anchos de banda >10GHz

Respons. 10-150 A/W

M 10-400

APD requiere menor potencia óptica para funcionar, pero cuatro veces mayor voltaje de alimentación (50-400V)

$$\mathcal{R}_{APD} = \bar{M}\mathcal{R} = \bar{M} \frac{e\eta}{h\nu}$$

El problema principal del APD estriba en que el mecanismo de generación de electrones es aleatorio, es decir,  $M$ , es una variable aleatoria, cuya media es  $\bar{M}$  (factor de multiplicación)

Ello genera ruido adicional al del pin y limita algo el ancho de banda

Material	Tipo	$\lambda$	R/M	$I_d$ (nA)	$\tau_r$ (ns)	B/B·M (GHz)	$V_{pol}$
<i>Si</i>	pin	400-1100	0,4-0,6	1-10	0,5-1	0,3-0,7	5
	APD		20-400	0,1-1	0,1-2	2-5	150-400
<i>Ge</i>	pin	800-1800	0,4-0,5	50-500	0,1-0,5	0,5-3	5-10
	APD		50-200	50-500	0,5-0,8	2-10	20-40
<i>InGaAs</i>	pin	1100-1700	0,75-0,95	0,5-2	0,05-0,5	1-2	5
	APD		10-40	10-50	0,1-0,5	20-250	20-30

**ERM 577**  
2.5 Gb/s High Gain  
Avalanche Photodiode  
Optical Receiver Module



## PIN

### Mini-DIL PINAMPs

PARAMETER	UNIT	LPAD 0052 52 Mb/s		
		Min	Typ	Max
Data Rate	Mb/s		52	
Sensitivity	dBm	-41	-43	
Overload	dBm		0	
Gain				
@1310nm	V/W		17K	
Dark Current	nA			5
Responsivity	A/W			
@1310nm			0.85	
@1550nm			0.95	
Output Impedance	$\Omega$	30		60
Operating Temperature	$^{\circ}\text{C}$	-40		+85
Storage Temperature	$^{\circ}\text{C}$	-40		+85
Supply Voltage	V	4.75		5.25

\* Differential



52 Mb/s, 155 Mb/s, 622 Mb/s and 1 Gb/s Data Rates

High responsivity and low dark current  
InGaAs pin Detector

High sensitivity

Wide dynamic range

Single Supply operation

Hermetic package

Single ended or Differential output

#### Applications:

- Long Haul transmission networks
- Short Haul transmission networks
- DWDM transponders
- SDH/SONET single mode applications
- Instrumentation & testing
- Data Communications
- Gigabit Ethernet

### Specifications

Conditions (unless noted):

Temperature = 25  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\lambda$  = 1550 nm,  $R_L$  = 50 $\Omega$ ,  $V_{ss}$  = -5.2V

All specifications without connector.

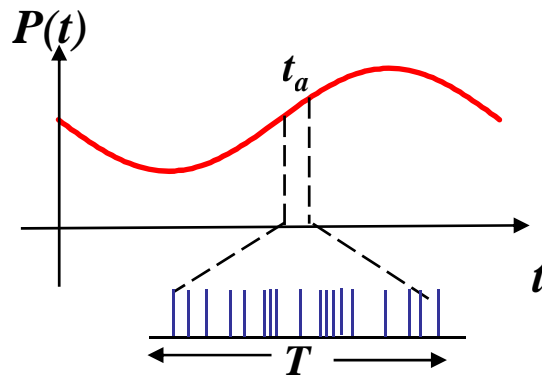
Parameter	Measurement Conditions	Min	Typ	Max	Units
<b>Sensitivity</b>	2.5 Gb/s 1E-10 BER $R_{APD}$ = 8.5 A/W		-34	-32	dBm
<b>Small Signal Gain</b>	Single-ended $f$ = 1.2 GHz $R_{APD}$ = 8.5 A/W	30	50		kV/W
<b>Bandwidth</b>	$R_{APD}$ = 2.5 to 10 A/W	1.5	1.8		GHz
<b>Overload</b>	$R_{APD}$ = 2.5 A/W	-7.0	-3.0		dBm
<b>Optical Back Reflection</b>			-40	-30	dB
<b>Output Impedance</b>	Single-ended		50		$\Omega$
<b>Maximum Output Voltage</b>	Single-ended Voltage (p-p)		550		mV (p-p)

**JDS Uniphase**

- 
- Introducción: tipos de detección
  - Detectores  pticos
    - Conceptos básicos
    - Fotodiodos PIN y APD
    - Ruido en detectores
  - Receptores  pticos
    - Otros componentes del receptor
    - Ruido en el receptor
    - Sensibilidad y relación con calidad, penalizaciones en potencia
  - Resumen y conclusiones
- 



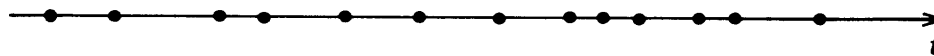
El **ruido shot** (también llamado de **ruido de disparo** o **ruido cuántico**) se debe a que la absorción y la emisión de fotones se genera en intervalos aleatorios, esto es, es un proceso aleatorio estacionario, lo que se traduce en un ruido de cuantificación. Este ruido referido a la fotocorriente que genera el fotodetector se denomina ruido *shot*.



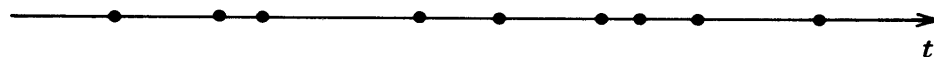
El número de fotones,  $n$ , emitidos por la fuente durante  $T$  sigue una **distribución de Poisson**, de valor medio  $\bar{N}$

$$p(n) = \frac{\bar{N}^n \exp(-\bar{N})}{n!}$$

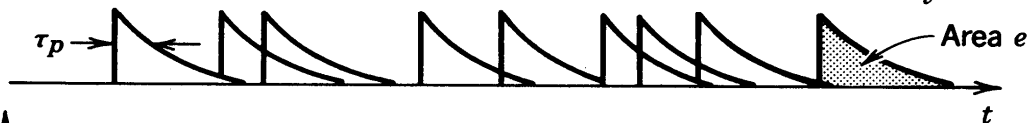
Photons



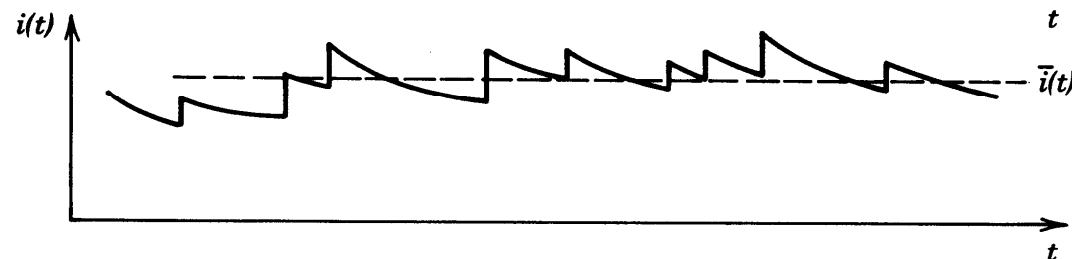
Photoelectrons



Current pulses



Electric current (shot noise)



El **ruido shot** (también llamado de **ruido de disparo** o **ruido cuántico**) se debe a que la absorción y la emisión de fotones se genera en intervalos aleatorios, esto es, es un proceso aleatorio estacionario, lo que se traduce en un ruido de cuantificación. Este ruido referido a la fotocorriente que genera el fotodetector se denomina ruido *shot*.

Estas variaciones producen una intensidad a la salida del fotodetector,  $\Delta i_s(t)$ , añadida al valor medio de la corriente detectada,  $\bar{i}(t)$ :  $i(t) = \bar{i}(t) + \Delta i_s(t)$

siendo  $\bar{i}(t) = \mathcal{R} \bar{P}_{in}(t)$ ,  $\mathcal{R}$  la responsividad,  $\bar{P}_{in}(t)$  la potencia óptica media incidente

Este ruido *shot* tiene una densidad espectral constante,  $S_s(f) = 2q\bar{i}(t)$ , es decir, es un ruido blanco cuya varianza está dada por

$$\sigma_s^2 = \overline{(\Delta i_s(t))^2} = \int_0^\infty S_s(f) df = 2q\bar{i}(t)BW$$

siendo  $q$  la carga del electrón y  $BW$  el ancho de banda del receptor (debido fundamentalmente al preamplificador del front-end o filtros posteriores)

El **ruido shot** no sólo se produce en la generación e-h debido a la señal sino en todo tipos de procesos de generación de portadores eléctricos

e-h debido a luz ambiente y a excitación térmica ➔ **corriente de oscuridad**  
La corriente de oscuridad también se puede expresar como un valor medio y una componente debida al ruido shot

$$i_d(t) = \bar{i}_d + \Delta i_{s,d}(t) \quad \sigma_{s,d}^2 = \overline{(\Delta i_{s,d}(t))^2} = 2q\bar{i}_d BW$$

En el caso de **APD**, el **factor de multiplicación**  $M$  que experimenta la señal también lo sufre el ruido cuántico generado. Pero además la generación e-h debido al efecto avalancha es también un proceso aleatorio, por lo que se incluye un parámetro llamado **factor de exceso de ruido**,  $F=F(M)$

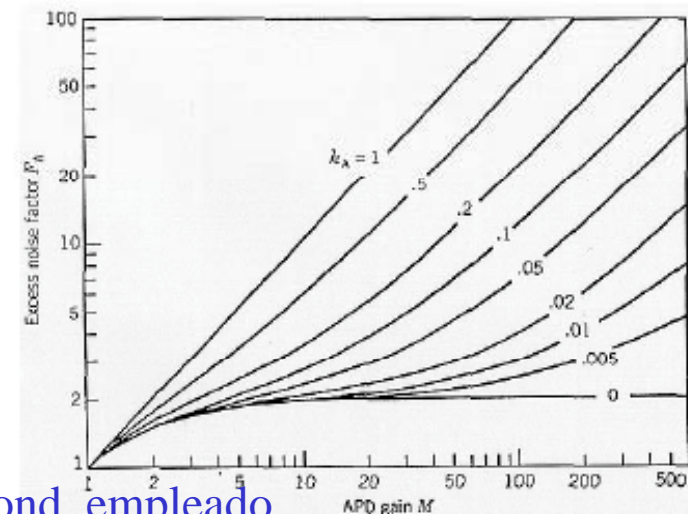
$$i_{APD}(t) = M\bar{i}(t) + \Delta i_{s,APD}(t)$$

$$\sigma_{s,APD}^2 = \overline{(\Delta i_{s,APD}(t))^2} = 2qM^2 F(M) \bar{i}(t) BW$$

$$F(\bar{M}) \cong \bar{M}^x, \quad \begin{array}{l} x=0.3-0.5 \text{ en Si-APD} \\ x=0.7-1 \text{ en Ge-APD} \end{array}$$

$$F(M) = k_A M + (1 - k_A)(2 - 1/M)$$

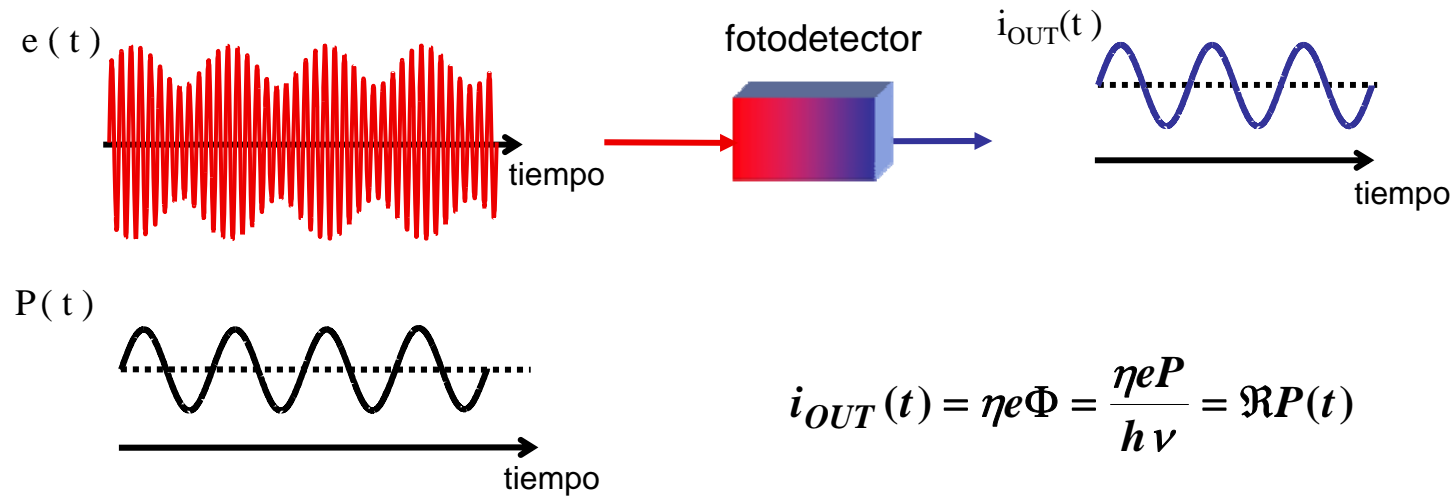
$k_A$  relación de coeficientes de ionización, depende del semicond. empleado



En resumen, la contribución debida al **ruido shot** o cuántico se expresa a la salida del fotodetector como sigue:

	Fotodiodo PIN	Fotodiodo APD
corriente eléctrica a la salida del fotodiodo →	$i(t) = \bar{i}(t) + \Delta i_s(t)$	$i(t) = M \cdot \bar{i}(t) + \Delta i_s(t)$
valor medio de la corriente detectada →	$\bar{i}(t) = \Re \bar{P}_{in}(t)$	$\bar{i}(t) = \Re \bar{P}_{in}(t)$
varianza de ruido shot (★ pot. ruido shot) →	$\sigma_s^2 = \overline{(\Delta i_s(t))^2}$ $\sigma_s^2 = 2q[\bar{i}(t) + \bar{i}_d]BW$	$\sigma_s^2 = \overline{(\Delta i_s(t))^2}$ $\sigma_s^2 = 2q[\bar{i}(t) + \bar{i}_d]M^2 F(M)BW$

- 
- Introducción: tipos de detección
  - Detectores  pticos
    - Conceptos básicos
    - Fotodiodos PIN y APD
    - Ruido en detectores
  - Receptores  pticos
    - Otros componentes del receptor
    - Ruido en el receptor
    - Sensibilidad y relación con calidad, penalizaciones en potencia
  - Resumen y conclusiones
- 



$$i_{OUT}(t) = \eta e \Phi = \frac{\eta e P}{h \nu} = \Re P(t)$$

$\eta$  = eficiencia cuántica

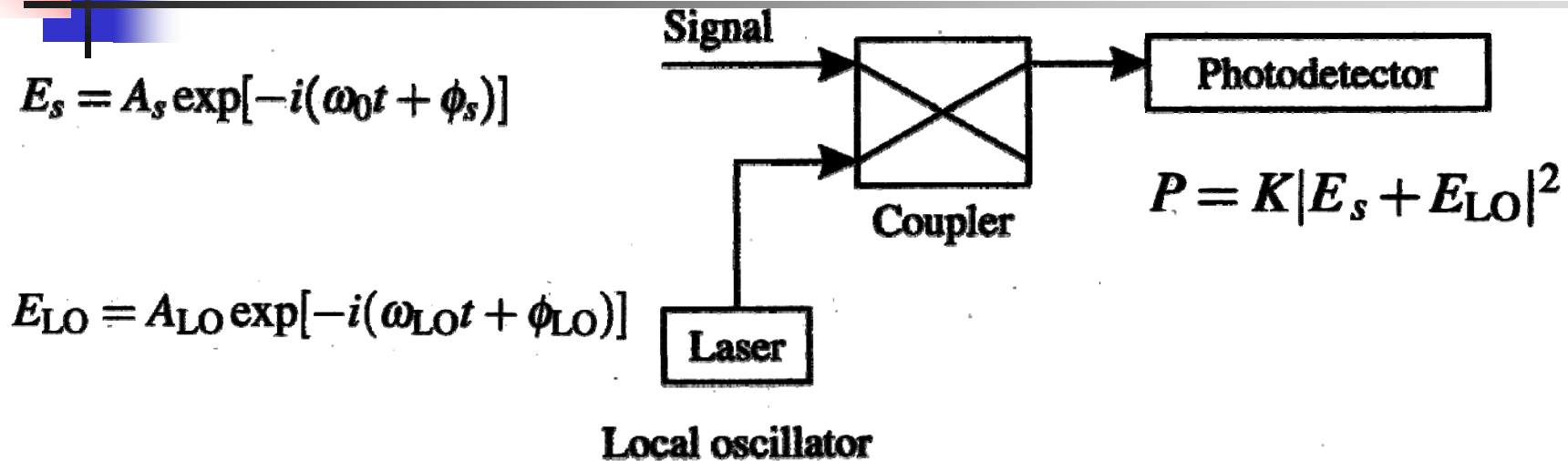
$\Phi$  = flujo de fotones/s

$e$  = carga electrón

$\Re$  = responsividad

$\nu$  = frecuencia  ptica

- Detección cuadrática
- Formato empleado en sistemas de comunicaciones ópticas comerciales



$$P(t) = P_s + P_{LO} + 2\sqrt{P_s P_{LO}} \cos(\omega_{IF} t + \phi_s - \phi_{LO}),$$

$$\text{con } P_s = KA_s^2, \quad P_{LO} = KA_{LO}^2, \quad \omega_{IF} = \omega_0 - \omega_{LO}.$$

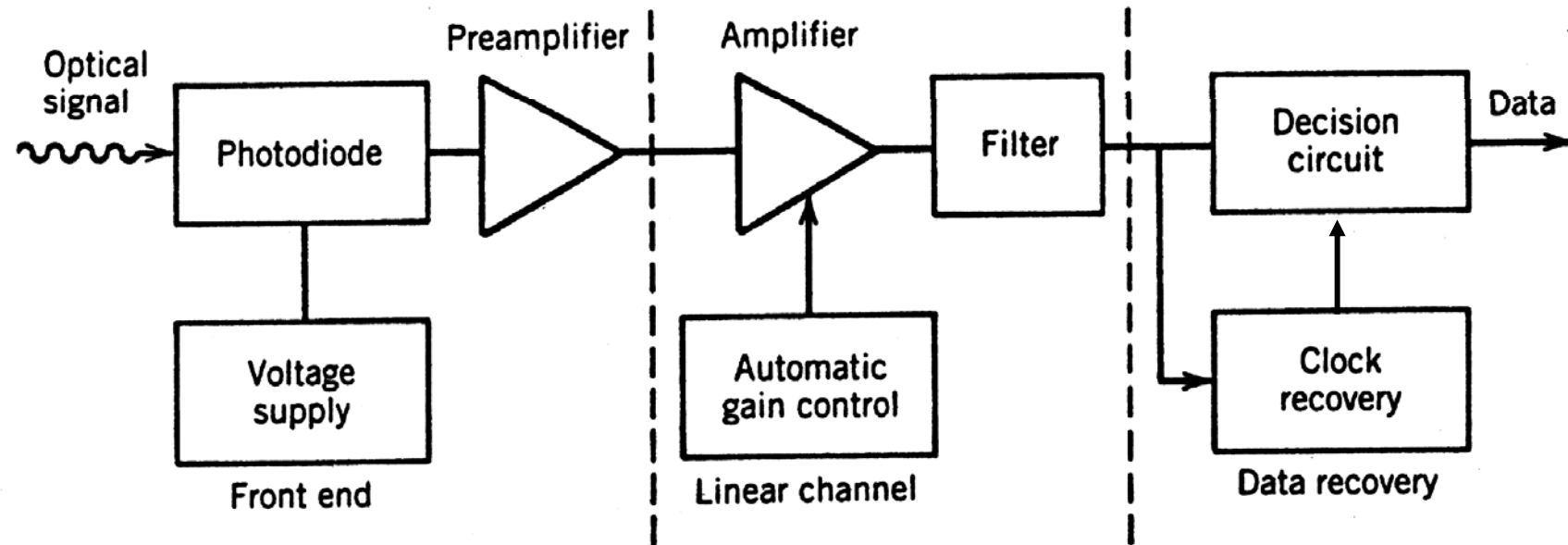
- La detección coherente permite aumentar el nivel de la señal detectada  $\Rightarrow$  receptor con más sensibilidad
- Pero los receptores coherentes son complejos: ajuste de frecuencia/fase/polarización entre señal y oscilador local
- La llegada de la amplificación óptica (EDFA) restó inicialmente interés a los sistemas coherentes, aunque en la actualidad se emplean para sistemas de alta velocidad.

# Ing. Telecom., CC.OO.: el receptor

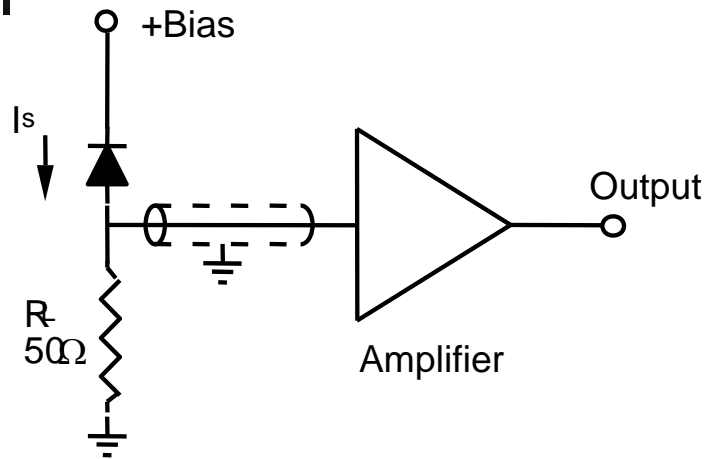
## Diseño del receptor digital



U. P b. Navarra

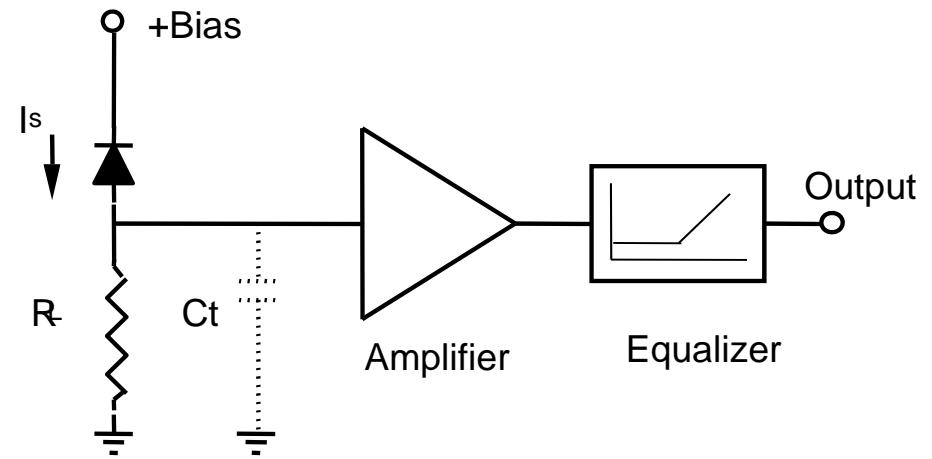






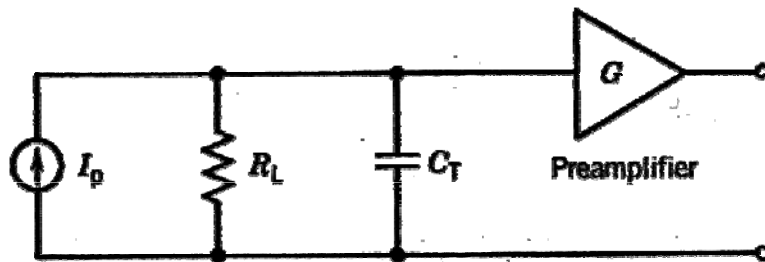
Baja impedancia (BI) ( $R_L \downarrow$ )

Alto BW  
Alto ruido térmico  
Baja sensibilidad



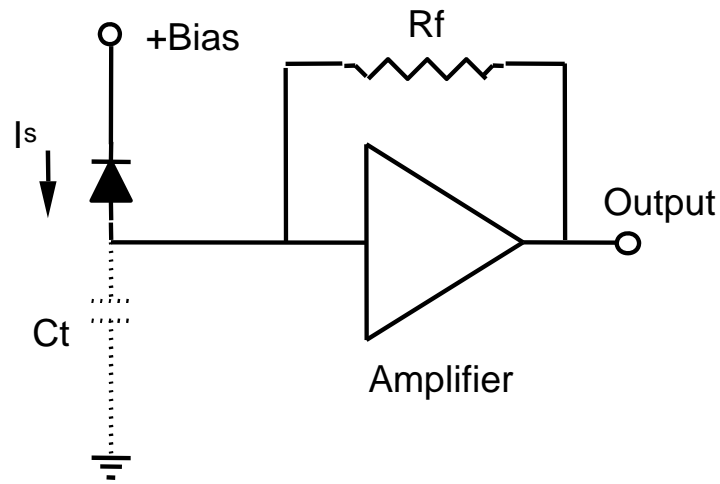
Alta impedancia (AI) ( $R_L \uparrow$ )

Bajo ruido térmico  
Reducido BW (necesidad de  
ecualización)  
Bajo rango dinámico

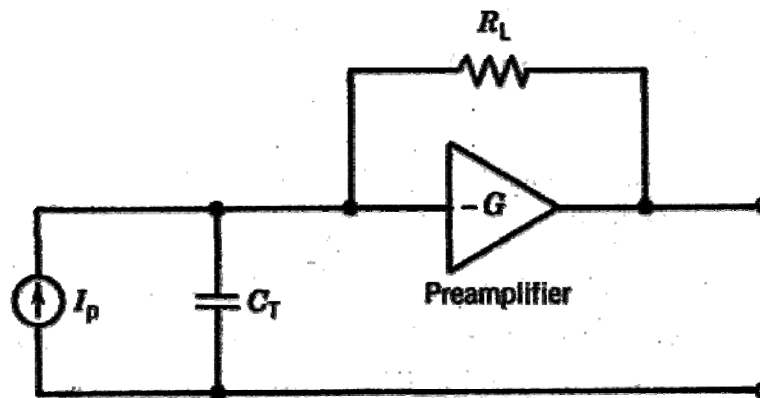


$$v_o \propto i_p \cdot R_L$$

$$BW = \frac{1}{2\pi R_L C_T}$$

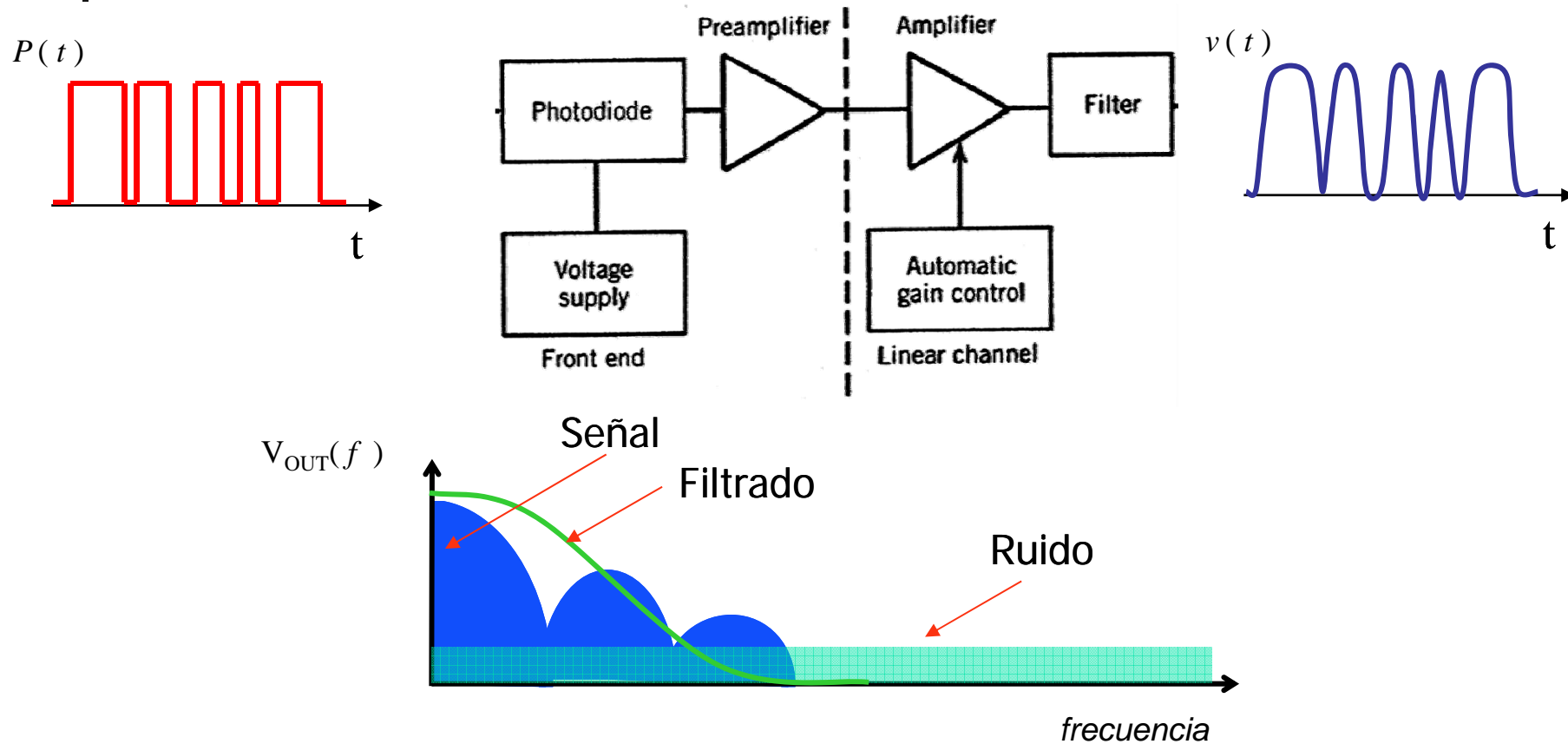


Transimpedancia ( $R_L \sim$ )  
Mayor sensibilidad que BI  
Mayor BW que AI



$$v_o \propto i_p \cdot R_L$$

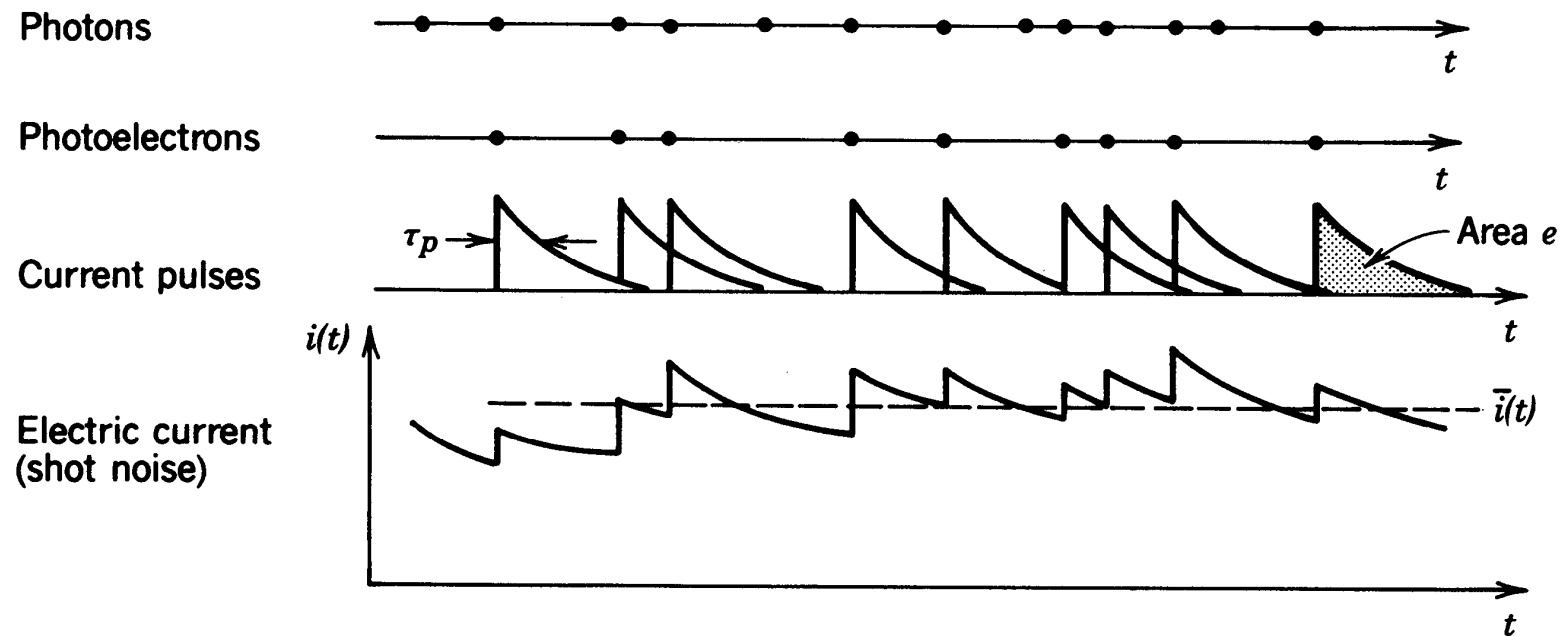
$$BW = \frac{G}{2\pi R_L C_T}$$



Es necesario filtrar la señal recibida para limitar los efectos del ruido  
Existe un compromiso BW filtro: reducción de ruido frente BWmin señal  
(típicamente  $BW_{min} \sim 0.7 BR$ )  
El filtrado debe generar formas de pulso con mínima ISI (coseno alzado)

- 
- Introducción: tipos de detección
  - Detectores  pticos
    - Conceptos básicos
    - Fotodiodos PIN y APD
    - Ruido en detectores
  - Receptores  pticos
    - Otros componentes del receptor
    - Ruido en el receptor
    - Sensibilidad y relación con calidad, penalizaciones en potencia
  - Resumen y conclusiones
- 

- El ruido shot es consecuencia de que la luz que incide en receptor está compuesta de fotones que llegan en instantes aleatorios.
- Emisión de fotones en fuente óptica = proceso aleatorio con estadística de Poisson (se suele aproximar por Gaussiano)
- Por tanto, la generación de corriente en fotodiodo también aleatoria.



Es debido a la fluctuación térmica de la corriente en la resistencia de carga del fotodiodo (= proceso aleatorio con estadística gaussiana). Entonces la corriente total aplicada a esta resistencia es:

$$I(t) = I_p + i_s(t) + i_T(t)$$

$i_T(t)$  = ruido térmico

Densidad espectral ruido térmico es aproximadamente plana hasta  $f \sim 1\text{THz}$ :

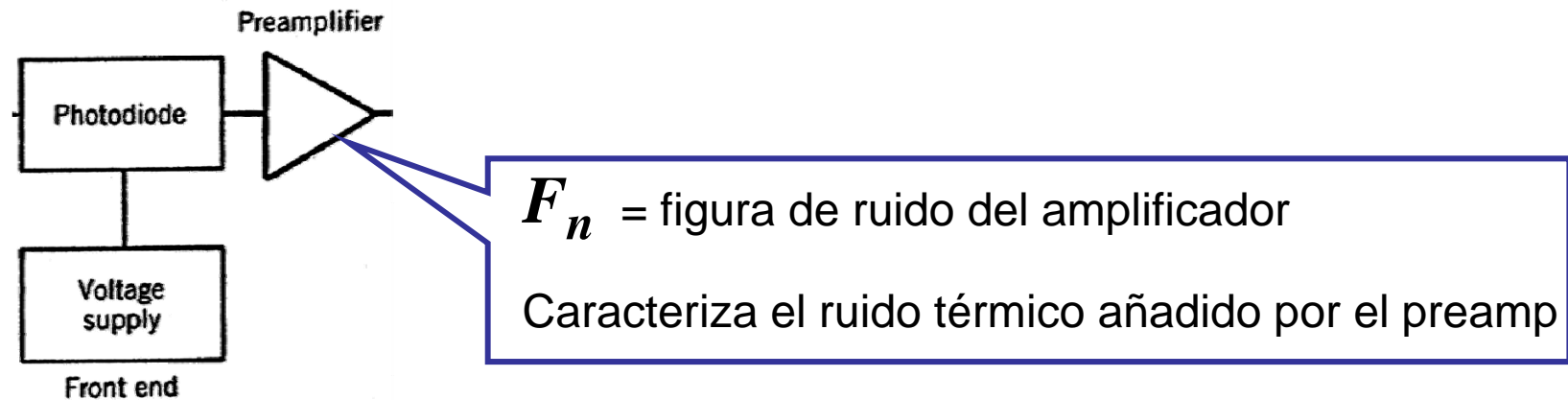
$$S_S(f) = 4k_B T / R_L \quad \text{con } k_B = \text{constante de Boltzmann} = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J / } ^\circ K$$



Varianza de ruido ( $\propto$  potencia) en ancho de banda BW:

$$\sigma_T^2 = \langle i_T^2(t) \rangle = \int_0^\infty S_T(f) df = \frac{4k_B T \cdot BW}{R_L}$$

## Incremento de ruido térmico en preamplificador



Entonces la varianza de ruido térmico total queda:

$$\sigma_T^2 = \frac{4k_B T \cdot BW \cdot F_n}{R_L}$$

Para la señal eléctrica detectada se define:

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{\text{potencia media de señal}}{\text{potencia de ruido}} = \frac{\overline{I_p}^2}{\langle i_{\text{ruido}}^2(t) \rangle} = \frac{\overline{I_p}^2}{\sigma_{\text{ruido}}^2} = \frac{\overline{I_p}^2}{\sigma_S^2 + \sigma_T^2} \\ &= \frac{(R \cdot M \cdot \overline{P_{in}})^2}{2qM^2F_A(R \cdot \overline{P_{in}} + I_d) \cdot BW + \frac{4k_B T \cdot BW \cdot F_n}{R_L}} \end{aligned}$$

- Si limita el ruido térmico:

$$SNR = \frac{R_L (R \cdot M \cdot \overline{P_{in}})^2}{4k_B T \cdot BW \cdot F_n} \propto \overline{P_{in}}^2$$

- Si limita el ruido Shot:

$$SNR = \frac{(R \cdot M \cdot \overline{P_{in}})^2}{2qM^2F_A(R \cdot \overline{P_{in}} + I_d) \cdot BW} \propto \overline{P_{in}}$$



En la práctica:

- Fotodiodo Pin  $\Rightarrow$  suele dominar r. térmico

$$SNR = \frac{R_L (R \cdot \bar{P}_{in})^2}{4k_B T \cdot BW \cdot F_n} \propto \bar{P}_{in}^2$$

- Fotodiodo APD  $\Rightarrow$  se utilizan con baja potencia incidente en condiciones en las que suele dominar r. térmico

$$SNR = \frac{R_L (R \cdot M \cdot \bar{P}_{in})^2}{4k_B T \cdot BW \cdot F_n} \propto M^2 \cdot \bar{P}_{in}^2$$

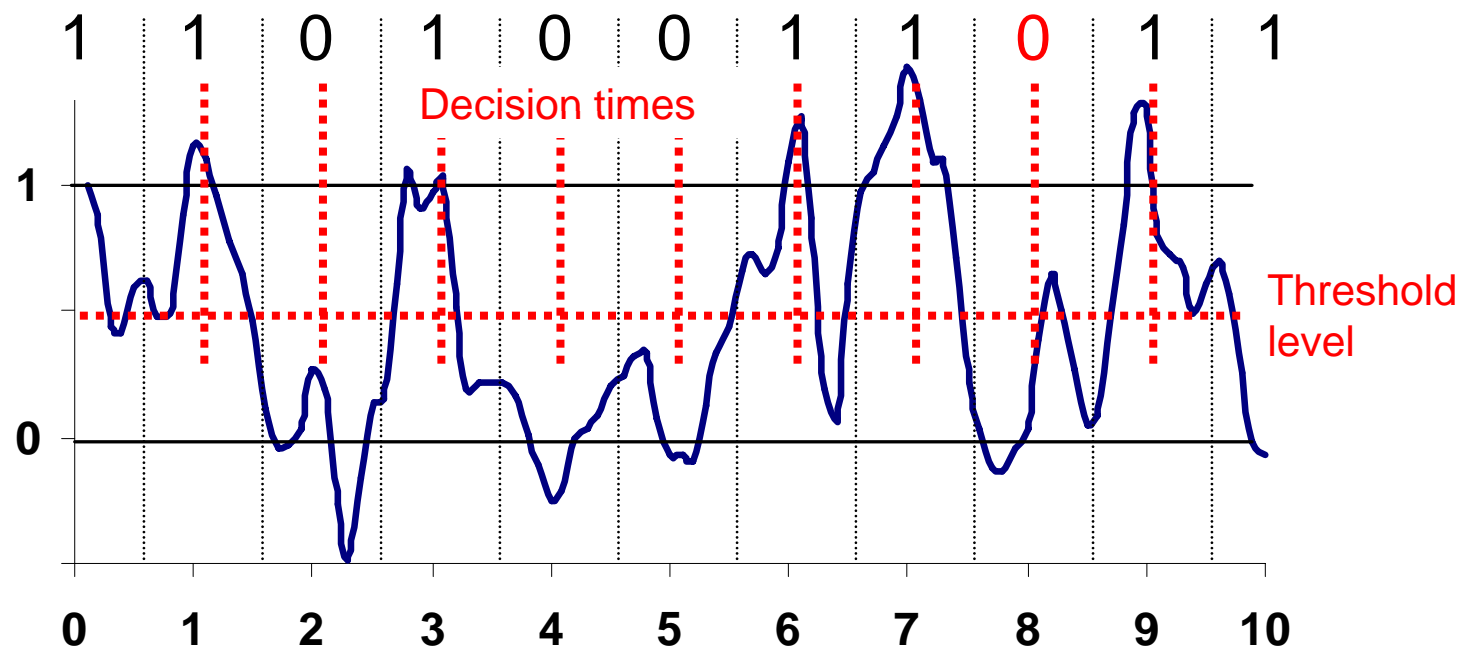
Mejora frente a PIN

Potencia equivalente de ruido térmico (NEP, *Noise Equivalent Power*)

- Es un parámetro utilizado en receptores para dar el dato de ruido térmico
- Se define como la potencia óptica por unidad de ancho de banda requerida para que la relación señal a ruido (SNR)=1 (térmico)
- Es decir, la potencia óptica que tiene que recibirse para que se detecte una señal eléctrica del mismo nivel que el ruido térmico

$$\text{SNR} = \frac{\text{Potencia de señal detectada}}{\text{Potencia de ruido térmico}} = \frac{I_p^2}{\sigma_T^2} = \frac{R_L R^2 P_{in}^2}{4k_B T \cdot BW \cdot F_n} = 1$$

$$NEP = \frac{P_{in}}{\sqrt{BW}} = \left( \frac{4k_B T \cdot F_n}{R_L R^2} \right)^{1/2}$$

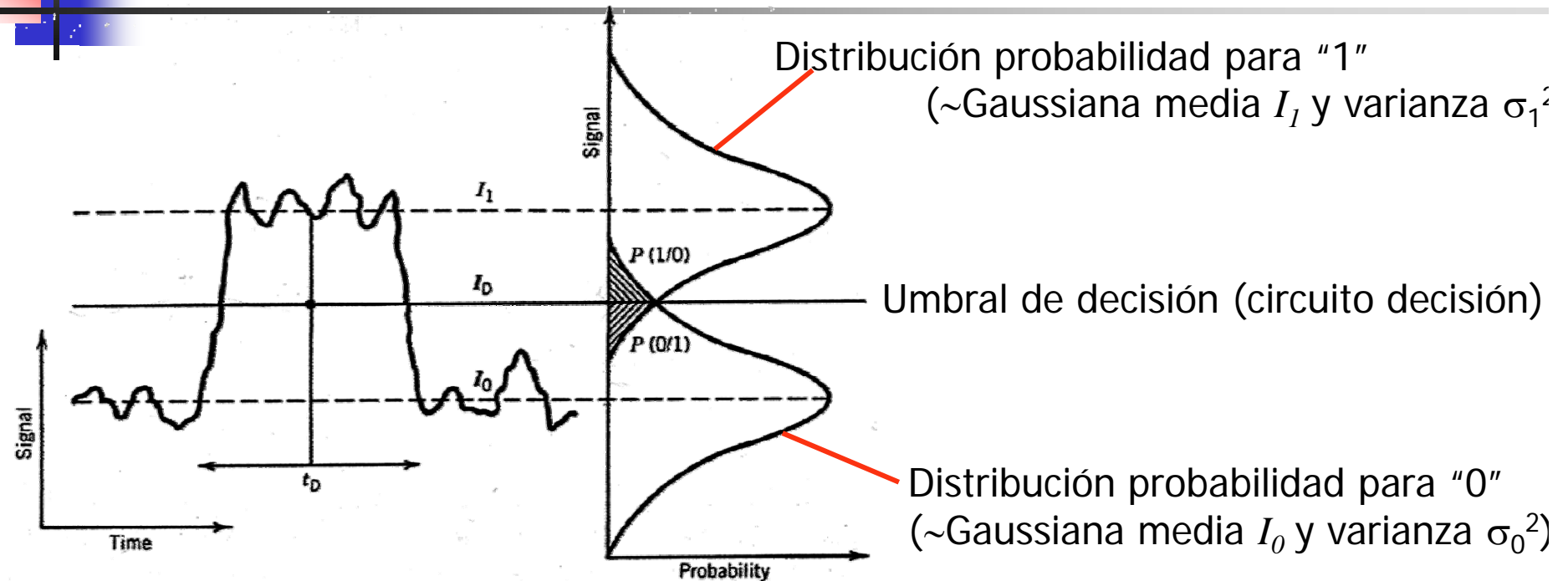


# Ing. Telecom., CC.OO.: el receptor

## Probabilidad de error en receptores digitales



U. P b. Navarra



$$BER = p(1)P(0/1) + p(0)P(1/0) = \frac{1}{2} [P(0/1) + P(1/0)]$$

$p(1)$  Probabilidad recibir "1"  
 $p(0)$  Probabilidad recibir "0" } Normalmente  $p(1) = p(0) = 1/2$

$P(0/1)$  Probabilidad decidir "0" cuando era "1"

$P(1/0)$  Probabilidad decidir "1" cuando era "0"

$$BER = \frac{1}{2} [P(0/1) + P(1/0)]$$

Asumiendo que distribuciones de probabilidad para niveles del "0" y del "1" son gaussianas

$$P(0/1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_D} \exp\left(-\frac{(I - I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_1 - I_D}{\sigma_1 \sqrt{2}}\right)$$

$$P(1/0) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \int_{I_D}^{\infty} \exp\left(-\frac{(I - I_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_D - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}}\right)$$

con:  $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2) dy$ .

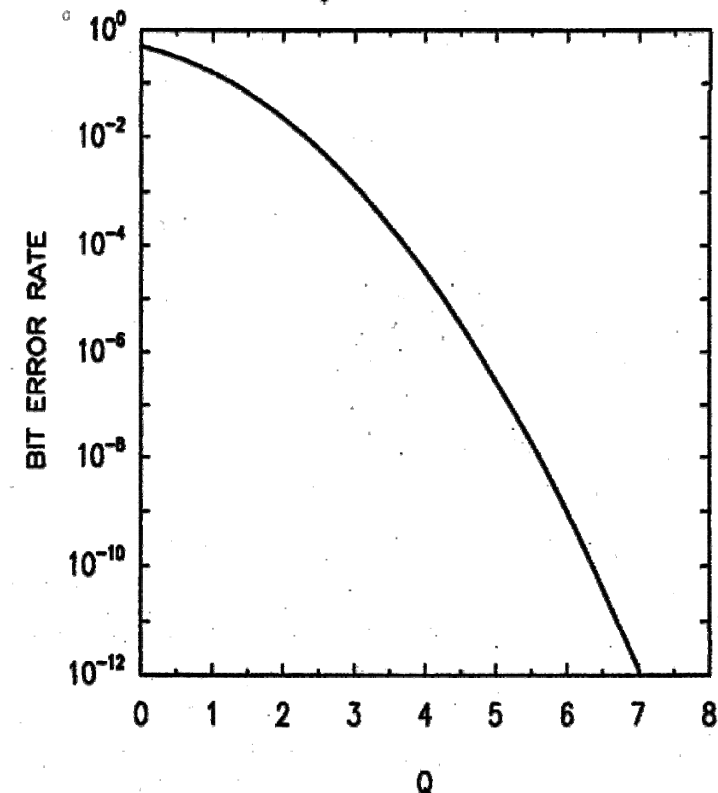
Entonces:

$$BER = \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{I_1 - I_D}{\sigma_1 \sqrt{2}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{I_D - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}}\right) \right]$$

Eligiendo el umbral para minimizar BER:  $I_D = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}$$

con:  $Q \equiv \frac{I_1 - I_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$



Para calcular la probabilidad de error en un cierto receptor cuando llega un cierto nivel de potencia:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$$

- Ejemplo: asumiendo relación extinción en transmisor ( $P_{"1"}/P_{"0"}$ ) =  $\infty$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 = 2MR\bar{P}_{rec} \\ I_0 = 0 \\ \sigma_1^2 = \sigma_T^2 + \sigma_S^2 \\ \sigma_0^2 = \sigma_T^2 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_T^2 = \frac{4k_B T \cdot BW \cdot F_n}{R_L} \\ \sigma_S^2 = 2qM^2 F_A (R \cdot 2 \cdot \bar{P}_{in}) \cdot BW \end{array} \right.$$

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_1}{\sigma_0 + \sigma_1} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2MR\bar{P}_{rec}}{\sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_S^2} + \sigma_T} \right)$$

La sensibilidad de un receptor es la potencia óptica media mínima que es necesario recibir para tener una determinada probabilidad de error (BER) (tip. BER = 10<sup>-9</sup>)

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad BER = 10^{-9} \Rightarrow Q \approx 6$$

$$Q = \frac{2MR\bar{P}_{rec}}{\sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_S^2 + \sigma_T}}$$

Sustituyendo en esta expresión y despejando  $P_{rec}$ :

$$\bar{P}_{rec} = \frac{Q}{R} \left( qF_A Q \cdot BW + \frac{\sigma_T}{M} \right)$$

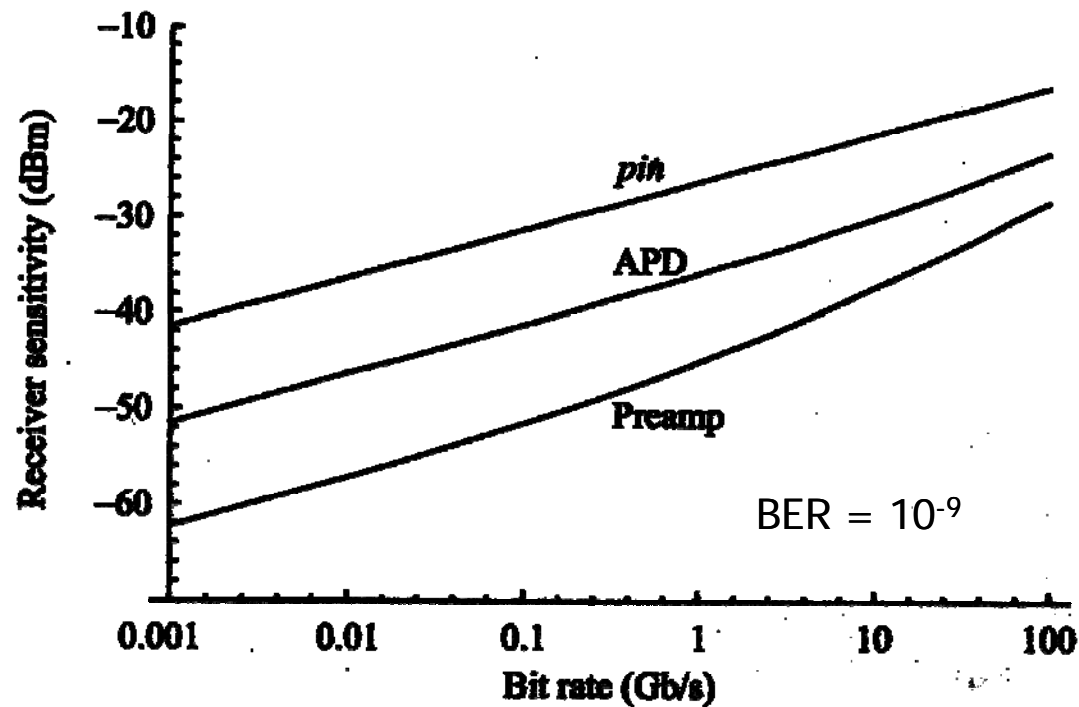
■ En PIN (ruido térmico predominante):  $\bar{P}_{rec} \approx \frac{Q\sigma_T}{R} = \frac{Q}{R} \sqrt{\frac{4k_B T \cdot BW \cdot F_n}{R_L}}$

$$\text{Sensibilidad} \propto \sqrt{BW} \propto \sqrt{BR}$$

■ En APD:  $\bar{P}_{rec} = \frac{Q}{R} \left( qF_A Q \cdot BW + \frac{\sigma_T}{M} \right)$

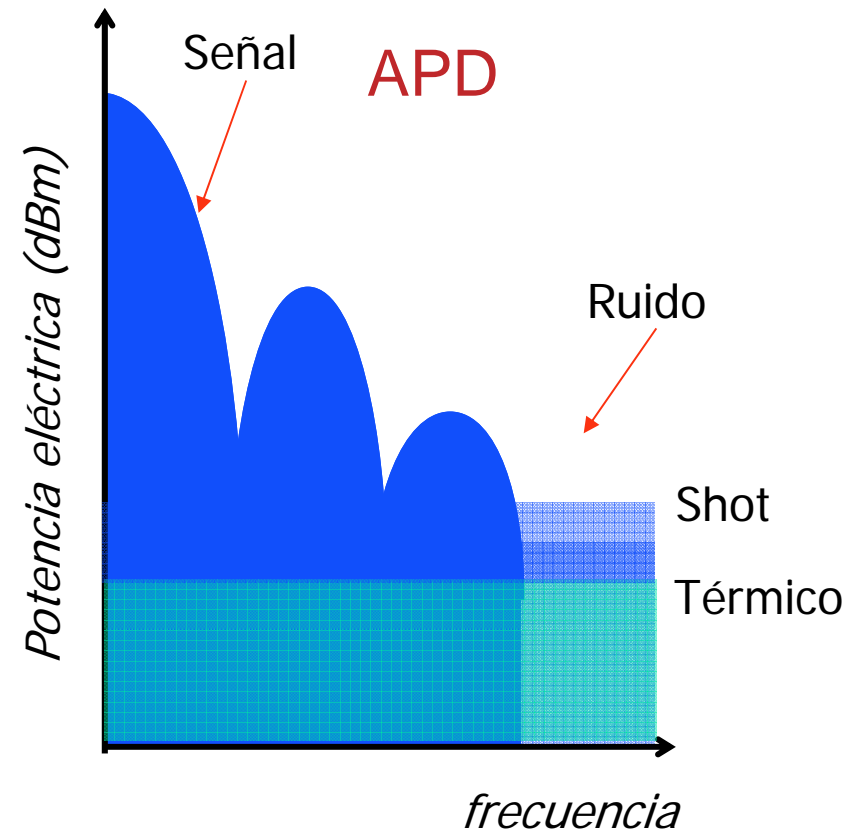
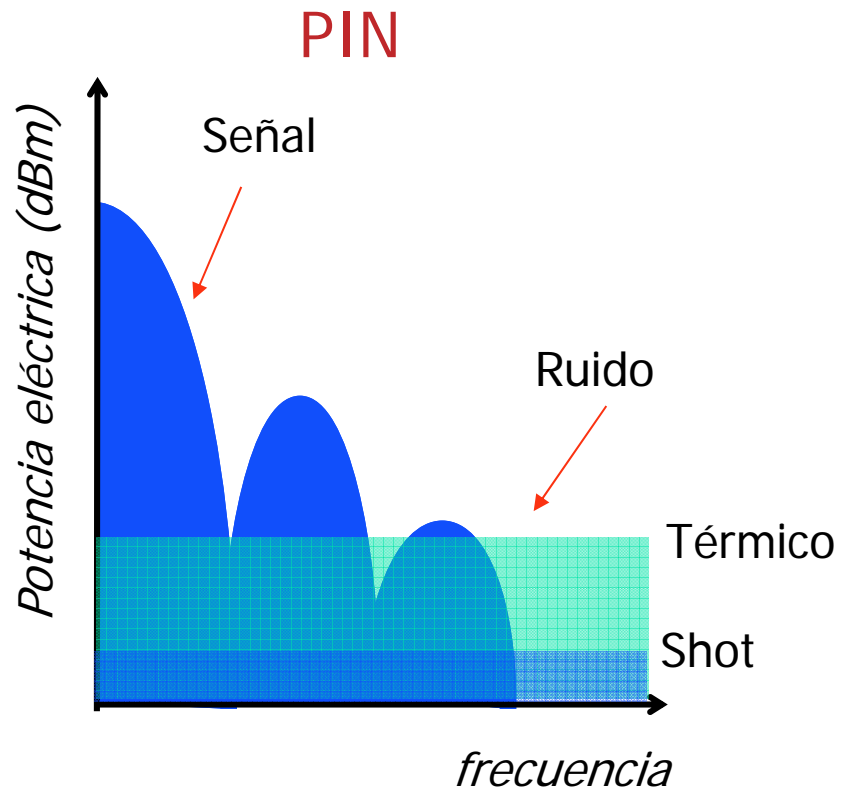


Mejora en sensibilidad si predomina térmico



Bit Rate		Type	Sensitivity
155	Mb/s	pinFET	-36 dBm
622	Mb/s	pinFET	-32 dBm
2.5	Gb/s	pinFET	-23 dBm
2.5	Gb/s	APD	-34 dBm
10	Gb/s	pinFET	-18 dBm
10	Gb/s	APD	-24 dBm
40	Gb/s	pinFET	-7 dBm





Para la misma potencia óptica recibida

- En el caso de limitación por ruido térmico:

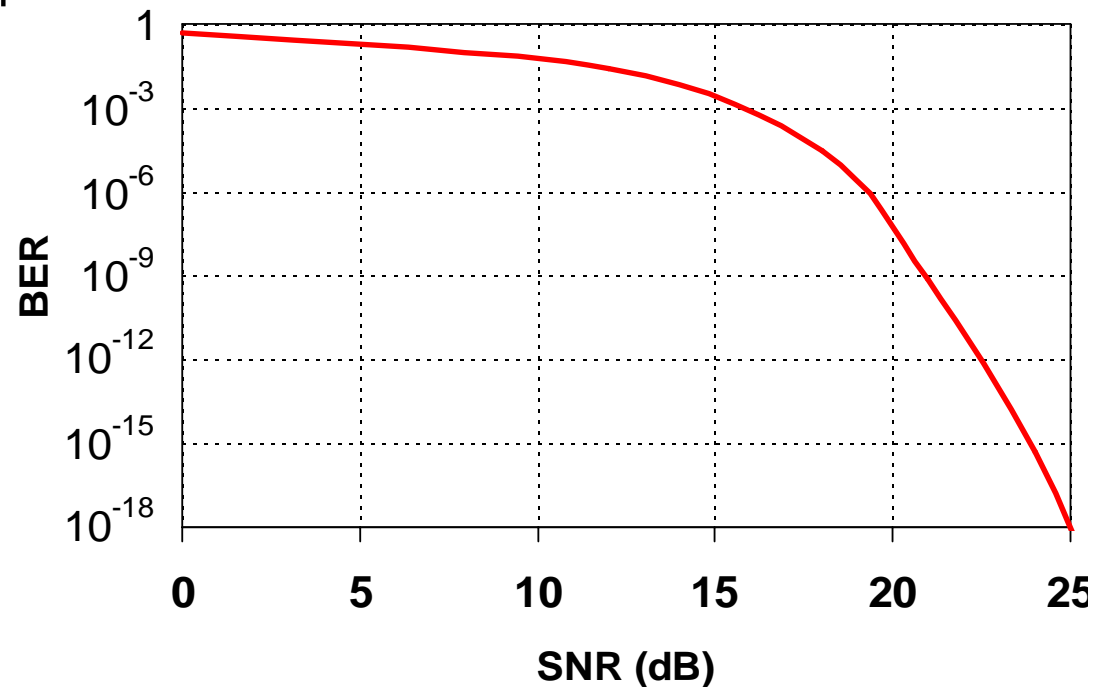
$$I_1 \quad \sigma_1^2 \approx \sigma_T^2$$

$$I_0 = 0 \quad \sigma_0^2 = \sigma_T^2$$

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_0 + \sigma_1} = \frac{I_1}{2\sigma_T} = \frac{1}{2} \sqrt{SNR}$$

$$\Rightarrow SNR = 4Q^2$$

- Ej: BER  $10^{-9} \Rightarrow Q=6$   
 $\Rightarrow SNR=144$  (21.6dB)

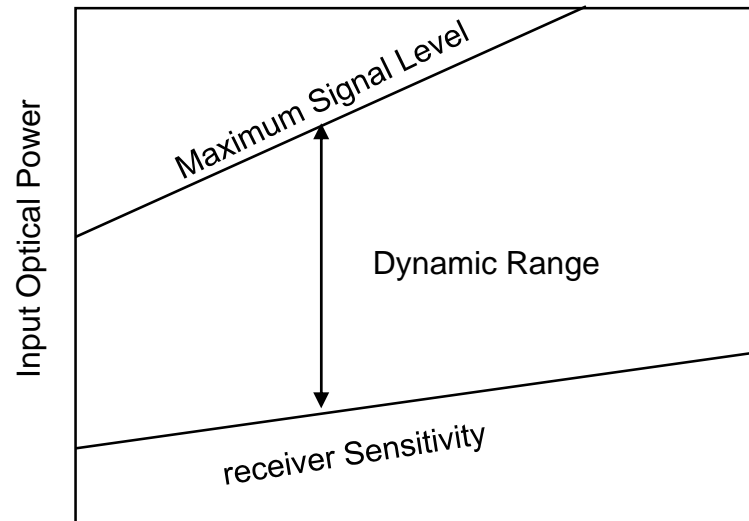


- Si predomina el shot:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_0 + \sigma_1} = \frac{I_1}{\sigma_s} = \sqrt{SNR}$$

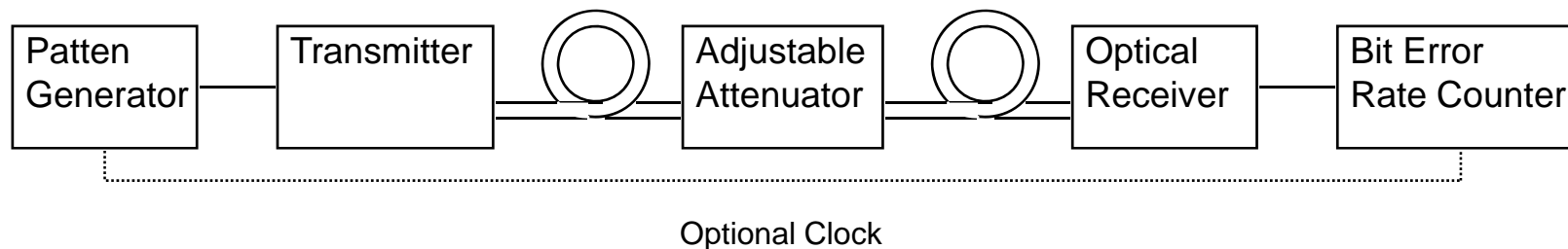
$$\Rightarrow SNR = Q^2$$

- Ej: BER  $10^{-9} \Rightarrow Q=6$   
 $\Rightarrow SNR=36$  (15.6dB)



High Rf (High Impedance Preamplifier)      Feedback Resistance      Low Rf (Transimpedance Preamplifier)

- El rango dinámico se define como la relación entre la máxima y la mínima potencia para la cuál el BER permanece dentro de las especificaciones mínimas (tip.  $10^{-9}$ ). (Se expresa en dB)
- El límite inferior lo marca la sensibilidad
- El límite superior lo determina las no linealidades y la compresión de ganancia



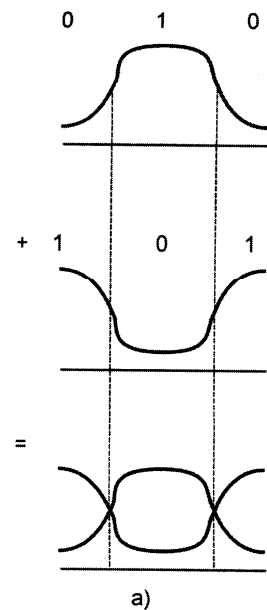
# Ing. Telecom., CC.OO.: el receptor

## Estimación de calidad a partir del diagrama de ojo

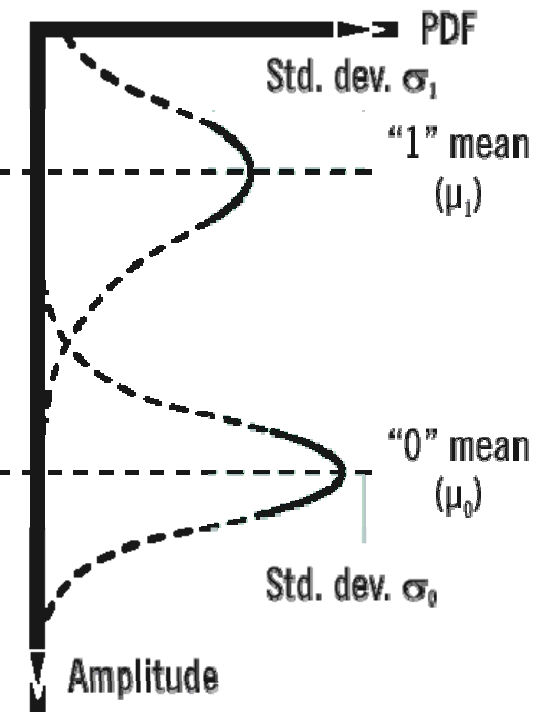
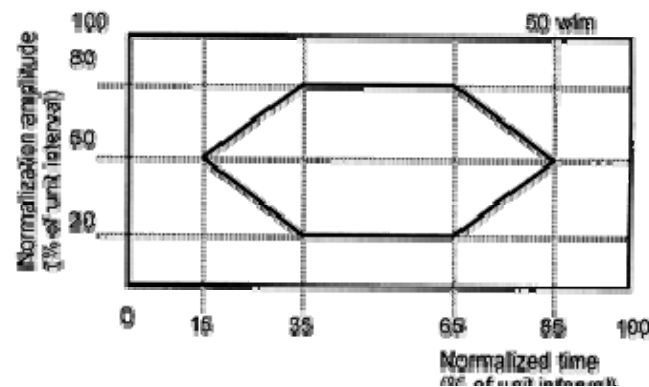
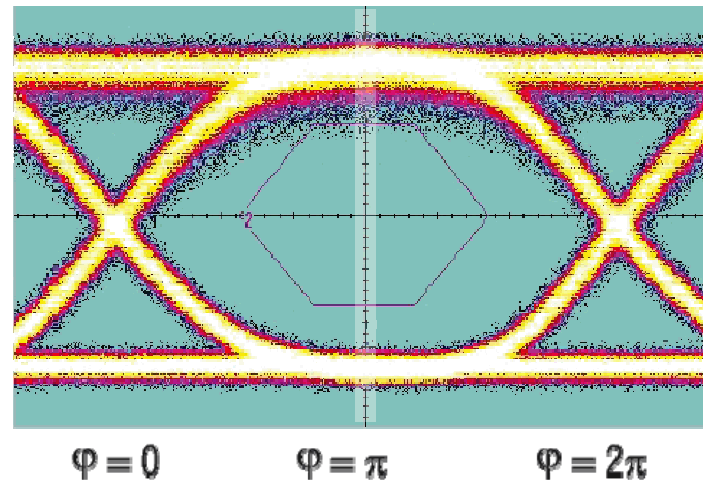
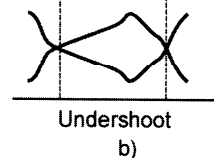
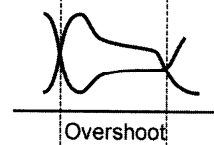
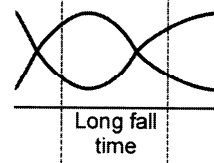
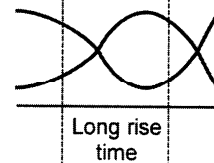
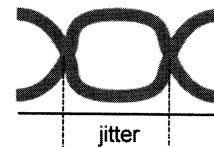


U. Púb. Navarra

### Degradaciones



Formación  
diagrama de  
ojo



General	Min	Typ	Max	Unit
NRZ data rate		10		Gb/s
Operating case temperature	0		70	�C
Physical dimensions		30 x 19 x 13.6		mm
SM fibre pigtail connector options		Standard SC-PC, Custom ST-PC, FC-PC		

Performance	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Module PIN bias voltage	$V_m$	9.5	11.5	13.5	V
Positive supply	$V_{cc}$	7.5	8	8.5	V
Power dissipation	$P_d$		1	1.6	W
PIN responsivity (1)	R		0.88		A/W
PIN responsivity (5)	R		0.83		A/W
Responsivity variation with temperature 0�C to 70�C			5		%
Dark current (25�C)	$I_d$			10	nA
Optical connector loss			0.3		dB
Sensitivity (2)		-18	-19		dBm
Optical saturation power (BER < 10 <sup>-9</sup> )	$P_{sat}$	0			dBm
Average input equivalent noise current density 30KHz - 10GHz	$I_e$			16.5	pA/VHz
High frequency -3dB corner (3)			11		GHz
Transimpedance gain (3,4)	TZG	400	500	650	Ohms
Trans. gain variation with supply voltage and temperature (3)		-15		+15	%
Output return loss (3) 100kHz - 8GHz		10			dB

Notes :

1. Excluding optical connector loss. Optical wavelength is in the 1300nm region and between 1525 - 1575nm.
2. For 10<sup>-30</sup> BER, PRBS 2<sup>31</sup>-1. NRZ @10Gb/s
3. Load impedance is 50  with a return loss > 20dB, up to 20GHz.
4. Excluding PIN responsivity factor and connector loss.
5. Excluding optical connector loss. Optical wavelength is in the range 1576 - 1610nm.

**ERM 577**

2.5 Gb/s High Gain

Avalanche Photodiode  
Optical Receiver Modules



## Specifications

Conditions (unless noted):

Temperature = 25 °C,  $\lambda = 1550$  nm,  $R_L = 50\Omega$ ,  $V_{ss} = -5.2$  V

All specifications without connector.

Parameter	Measurement Conditions	Min	Typ	Max	Units
<b>Sensitivity</b>	2.5 Gb/s 1E-10 BER $R_{APD} = 8.5$ A/W		-34	-32	dBm
<b>Small Signal Gain</b>	Single-ended $f = 1.2$ GHz $R_{APD} = 8.5$ A/W	30	50		kV/W
<b>Bandwidth</b>	$R_{APD} = 2.5$ to 10 A/W	1.5	1.8		GHz
<b>Overload</b>	$R_{APD} = 2.5$ A/W	-7.0	-3.0		dBm
<b>Optical Back Reflection</b>			-40	-30	dB
<b>Output Impedance</b>	Single-ended		50		$\Omega$
<b>Maximum Output Voltage</b>	Single-ended Voltage (p-p)		550		mV (p-p)

