

# Master Universitario de Ingeniería en Telecomunicaciones.

---

## 81.533 Redes de Fibra Óptica - PEC2.

---

### José Enrique Rodríguez González.

---

#### Profesores de la asignatura.

Profesor responsable:

- Dr. Pere Tuset [peretuset@uoc.edu](mailto:peretuset@uoc.edu) Profesores colaboradores:
  - Dr. Salvatore Spadaro [sspadaro@uoc.edu](mailto:sspadaro@uoc.edu)
- 

#### Presentación de la actividad.

La PEC3 consta de varios ejercicios acerca de las diferentes características de los receptores ópticos. El objetivo es evaluar la capacidad de determinar parámetros de un sistema óptico (relación señal-ruido, ancho de banda) que dependan de las características de los receptores ópticos utilizados.

---

#### Competencias.

Las competencias que se trabajan total o parcialmente en esta PEC son las siguientes:

1. Capacidad de análisis de componentes y sus especificaciones para sistemas de comunicaciones guiadas y no guiadas.
  2. Capacidad para la selección de antenas, equipos y sistemas de transmisión, propagación de ondas guiadas y no guiadas, por medios electromagnéticos, de radiofrecuencia u ópticos y la correspondiente gestión del espacio radioeléctrico y asignación de frecuencias.
- 

#### Objetivos.

1. Conocer los principios físicos que rigen la detección de potencia óptica.
  2. Entender las limitaciones propias de los receptores ópticos.
  3. Identificar los distintos tipos de receptores ópticos.
- 

#### Recursos.

Para la realización de la PEC el material de estudio es el propio de la asignatura. Adicionalmente, puede consultarse la bibliografía recomendada.

---

## Criterios de valoración.

Puntuación: Ejercicios 100% de la nota.

---

## Formato y fecha de entrega.

Fecha límite de entrega: 05 de diciembre de 2023. Se debe entregar la PEC antes de las 24:00 horas de esta fecha a través del buzón "Entrega de actividades" de vuestra aula.

El nombre del documento deberá ser el siguiente: <nombre\_usuario\_uoc>\_PEC3.<extensión>. Por ejemplo, si vuestro nombre de usuario es "agarcia" y entregáis la PEC en formato .rtf, el nombre del archivo deberá ser: agarcia\_PEC3.rtf

Los formatos permitidos son .rtf, .doc y .pdf.

Todas las figuras que haya en el documento se tienen que insertar en el texto. No hay que entregar ficheros aparte.

Hay que justificar todo lo que se haga.

**No se aceptan entregas que sean copias escaneadas de ejercicios resueltos a mano.**

---

## Índice.

- [Enunciado.](#)
  - [Ejercicio 1.](#)
  - [Respuesta al ejercicio 1.](#)
  - [Ejercicio 2.](#)
  - [Respuesta al ejercicio 2.](#)
  - [Ejercicio 3.](#)
  - [Respuesta al ejercicio 3.](#)
  - [Ejercicio 4.](#)
  - [Respuesta al ejercicio 4.](#)
  - [Ejercicio 5.](#)
  - [Respuesta al ejercicio 5.](#)
- 

## Enunciado.

PEC3: Receptores ópticos.

[Volver al índice.](#)

---

## Ejercicio 1.

Se considere un receptor óptico basado en un fotodiodo de tipo APD que trabaja en tercera ventana (1550 nm) y que presenta una eficiencia cuántica del 75% y factor de ruido en exceso  $F(M) = 6$ . Se utiliza el receptor para un sistema óptico diseñado para poder transmitir hasta 2,5 Gbps utilizando codificación de tipo NRZ.

Asumiendo que se puedan despreciar tanto el ruido de la corriente de oscuridad como el ruido térmico, determinar la potencia óptica incidente ( $P_{RX}$ ) requerida para asegurar una tasa de error de bits (BER) de  $10^{-9}$ .

[Volver al índice.](#)

---

## Respuesta al ejercicio 1.

Para calcular la potencia óptica incidente ( $P_{RX}$ ) requerida para asegurar una tasa de error de bits (BER) de  $10^{-9}$  en un receptor óptico basado en un fotodiodo APD que trabaja en tercera ventana (1550 nm), debemos seguir varios pasos. Primero, es importante entender las especificaciones dadas:

- Longitud de onda de operación: 1550 nm (tercera ventana).
- Eficiencia cuántica del fotodiodo APD: 75%.
- Factor de ruido en exceso  $F(M)=6$ ,
- Tasa de transmisión de datos: 2.5 Gbps.

- Codificación utilizada: NRZ (Non-Return-to-Zero).

La BER de  $10^{-9}$  es típicamente utilizada en sistemas de comunicaciones ópticas para asegurar una alta calidad de transmisión.

Para calcular la PRX, necesitamos considerar la relación señal a ruido (SNR) en el receptor y cómo se relaciona con la BER y la tasa de transmisión. La fórmula para calcular la BER en un receptor óptico basado en APD es:

$$BER = Q^{-1}(SNR)$$

Donde  $Q^{-1}$  es la función inversa de la función Q de Gauss, que nos da el nivel de SNR necesario para una BER dada.

El SNR para un fotodiodo APD se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$SNR = \frac{(RP)^2}{2qB(RPF(M) + I_D^2 + 4kTB/R_L)}$$

Donde:

- $R$  es la responsividad del fotodiodo.
- $P$  es la potencia óptica incidente.
- $q$  es la carga del electrón ( $1.6 \times 10^{-19}$  Coulombs).
- $B$  es el ancho de banda del sistema, que para NRZ es aproximadamente igual a la tasa de datos.
- $F(M)$  es el factor de ruido en exceso del APD.
- $I_D$  es la corriente de oscuridad del APD.
- $k$  es la constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K).
- $T$  es la temperatura en Kelvin.
- $R_L$  es la resistencia de carga.

Dado que se nos pide despreciar tanto el ruido de la corriente de oscuridad como el ruido térmico, la fórmula se simplifica a:

$$SNR = \frac{(RP)^2}{2qB(RPF(M))}$$

Para calcular la responsividad  $R$  del fotodiodo, usamos la fórmula:

$$R = \frac{\eta q}{h f / c}$$

Donde:

- $\eta$  es la eficiencia cuántica (75% en este caso).
- $h$  es la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34}$  J  $\cdot$  s)
- $f$  es la frecuencia de la luz, que se puede calcular a partir de la longitud de onda ( $c = \lambda f$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz).

Una vez que tengamos la responsividad  $R$ , podemos resolver la ecuación de SNR para  $P$ , teniendo en cuenta que el SNR requerido se obtiene de la función  $Q^{-1}$  para una BER de  $10^{-9}$ .

Procedemos a calcular los valores con el siguiente código en Python.

```
# Importamos de las librerías necesarias para las constantes y la inversa de la
función de error complementaria.
```

```
# Importamos numerical Python (numpy) para un cálculo matematico mas eficiente.
from scipy.constants import h, c, e, k
from scipy.special import erfcinv
import numpy as np

# Datos proporcionados
lambda_nm = 1550 # Longitud de onda en nm
eta = 0.75 # Eficiencia cuántica
F_M = 6 # Factor de ruido en exceso
data_rate_Gbps = 2.5 # Tasa de transmisión en Gbps
BER = 1e-9 # Tasa de error de bits

# Conversión de unidades
lambda_m = lambda_nm * 1e-9 # Longitud de onda en metros
data_rate_bps = data_rate_Gbps * 1e9 # Tasa de transmisión en bps

# Calcular la frecuencia de la luz
f = c / lambda_m

# Calcular la responsividad del fotodiodo
R = eta * e / (h * f)

# Calcular el SNR necesario para el BER dado
# Usando la función Q inversa, que es la inversa de la función de error
# complementaria erfc
SNR_required = (erfcinv(2 * BER))**2

# Calcular la potencia óptica incidente P
# Despejando P de la ecuación de SNR y asumiendo que el ruido térmico y de
# corriente de oscuridad es despreciable
P_RX = np.sqrt((2 * e * data_rate_bps * R * F_M) / SNR_required) / R

print("P_RX: ", P_RX, " W.")
```

Obteniendo de la consola la siguiente respuesta:

```
P_RX:  1.6882043802698988e-05  W.
```

## CONCLUSION.

La potencia óptica incidente (PRX) requerida para asegurar una tasa de error de bits (BER) de  $10^{-9}$  en un receptor óptico basado en un fotodiodo APD que trabaja en tercera ventana (1550 nm) es aproximadamente  $1.69 \times 10^{-5}$  watts o 16.9  $\mu$ watts.

[Volver al índice.](#)

## Ejercicio 2.

Se quiere instalar un sistema de transmisión óptico que soporte una tasa de bits  $B = 622$  Mbps usando codificación de tipo NRZ. El sistema se compone de un transmisor óptico de tipo láser que emite una potencia óptica  $P_{TX}$  en  $\lambda_p = 1530$  nm y anchura espectral de emisión  $\Delta \lambda = 0,5$  nm; la fibra óptica es de tipo G.652 con coeficiente de dispersión intramodal  $D = 16$  ps/(Km·nm) y coeficiente de atenuación  $\alpha = 0,21$  dB/Km en tercera ventana.

El receptor está basado en un fotodiodo de tipo PIN con eficiencia cuántica del 80%.

Asumiendo despreciable el ruido térmico del receptor, se mide una relación señal-ruido de 15 dB.

Se determine la mínima potencia óptica a emitir por el transmisor para poder realizar el sistema.

[Volver al índice.](#)

---

Respuesta al ejercicio 2.

[Volver al índice.](#)

---

Ejercicio 3.

Se considere un sistema de transmisión por fibra óptica que presenta un receptor óptico al que le llega una potencia de  $-25$  dBm mediante una señal óptica en tercera ventana (1520 nm). El fotodiodo, de tipo PIN, presenta una eficiencia cuántica del 85%. Asumiendo que la varianza del ruido térmico puede despreciarse respecto al ruido cuántico (o ruido shot), el receptor presenta una determinada relación señal-ruido ( $SNR_{PIN}$ ). Se pretende ahora sustituir el receptor con otro, basado en un fotodiodo de tipo APD. Este fotodiodo, con la misma eficiencia cuántica del fotodiodo PIN, presenta factor de ruido en exceso  $F(M) = M$ . Se determine el valor del coeficiente de multiplicación del fotodiodo APD ( $M$ ) para que la nueva  $SNR$  del receptor ( $SNR_{APD}$ ) sea solo un 10% inferior a la obtenida con el fotodiodo PIN, en el caso de considerar despreciable el ruido térmico. Asimismo, se determine la corriente fotodetectada por el APD.

[Volver al índice.](#)

---

## Respuesta al ejercicio 3.

[Volver al índice.](#)

---

## Ejercicio 4.

Se considere un receptor óptico en un sistema de transmisión por fibra que se pretende opere con una tasa de transmisión de hasta 622 Mbps. El fotodiodo es de tipo APD con eficiencia cuántica ideal, presenta una responsividad de  $20$  A/W y tiene factor de ruido en exceso  $F(M) = M^2$ ; el fotodiodo trabaja en correspondencia del valor óptimo de su coeficiente de multiplicación ( $M_{opt}$ ). Al fotodiodo le incide una potencia de  $-27$  dBm en tercera ventana (1530 nm). Determinar la relación señal-ruido del receptor óptico.

[Volver al índice.](#)

---

## Respuesta al ejercicio 4.

[Volver al índice.](#)

---

## Ejercicio 5.

Se considere un receptor óptico de un sistema de transmisión por fibra óptica. Asumiendo que el receptor es ideal y que su ruido cuántico (shot) puede despreciarse (respecto al ruido térmico) y está basado en un fotodiodo de tipo APD; al fotodiodo le incide una potencia PRX. El fotodiodo APD presenta una figura de ruido  $F_n$  de 3 dB y experimenta una SNR de 10 dB. Debido al proceso de envejecimiento, la figura de ruido del receptor empeora, alcanzando un valor de 6 dB. El resto de parámetros del fotodiodo se mantienen inalterados. Para compensar el efecto del aumento de la figura de ruido, el único parámetro que puede modificarse es la potencia óptica a recibir (por ejemplo, incrementando la potencia emitida por el transmisor). Se determine por lo tanto el incremento necesario en la potencia óptica a recibir (PRX) para mantener la misma SNR.

[Volver al índice.](#)

---



## Respuesta al ejercicio 5.

[Volver al índice.](#)

---