

Trabajo Práctico N°3

Fotodetectores

Objetivos del trabajo

- Familiarización con componentes optoelectrónicos básicos.
- Cálculo de la dispersión y atenuación de un pulso de luz en una fibra óptica.
- Entender los parámetros que caracterizan a un fotodetector.
- Obtención de la respuesta en tiempo y frecuencia de fotodetectores.

Condiciones de entrega

- Fecha: viernes 25 de junio.
- Modo: informe formato digital PDF a través del campus virtual de la materia.
- Cantidad máxima de páginas: 10 (sin incluir el script del algoritmo).

Enunciado

En este trabajo se analiza el comportamiento de un sistema optoelectrónico de transmisión de datos unidireccional. Se deberá determinar la atenuación y dispersión que introduce una fibra óptica e implementar un algoritmo que simule la respuesta en tiempo de tres fotodetectores.

Para realizar y analizar las simulaciones se sugiere el uso de programas de análisis numérico como por ejemplo *GNU Octave* o *MATLAB*®.

Para la confección del informe se recomienda leer *¿Cómo se evalúa un informe de laboratorio?*, disponible en el aula virtual de la materia.

1. Cálculo de la atenuación y dispersión en la fibra óptica

Se tiene un sistema de transmisión de datos unidireccional basado en un láser, una fibra óptica monomodo y un fotodetector.

La fuente de luz es un diodo láser pulsado cuya longitud de onda central de emisión es $\lambda_0 = 1550$ nm, con ancho espectral de $\Delta\lambda = 10$ nm y un tiempo de ~~crecimiento~~ *(rise time)* de $\tau_f = 0,5$ ns. En este trabajo se lo alimenta con una corriente pulsada de ~~2 ns~~ de duración (ciclo de trabajo de 12,5%) y un valor pico de 10 mA. Bajo estas condiciones, la tensión de encendido del diodo (V_{on}) es de 2,5 V. La eficiencia (potencia óptica / potencia eléctrica) de este láser tiene un valor de 0,3.

La fibra óptica monomodo posee las características que se listan a continuación:

- Su largo es de $L = 50$ km.
- Su diámetro es de $2a = 8$ μm .

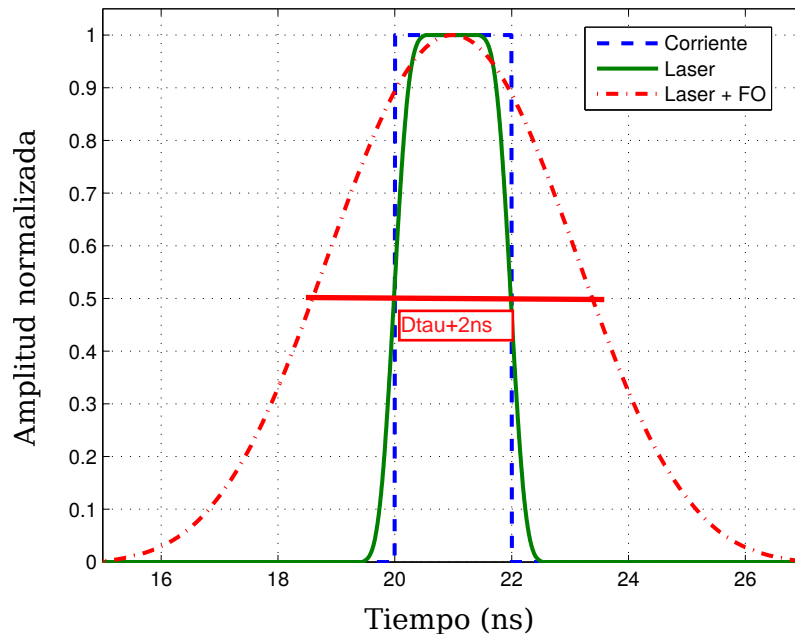


Figura 1: Pulso de luz a la entrada y salida de la fibra óptica. La curva azul es el perfil temporal de la corriente eléctrica que circula por el diodo láser. Con el objetivo de una mejor comparación, las señales se han centrado en tiempo y normalizado en amplitud.

- Los índices de refracción del núcleo y el revestimiento (*cladding*) son $n_1(1550 \text{ nm}) = 1,4600$ y $n_2(1550 \text{ nm}) = 1,4556$, respectivamente.
- Teniendo en cuenta las características del diodo láser, las pérdidas por inserción para longitudes de onda alrededor de 1550 nm son del 18 %.
- Tiene un coeficiente de dispersión del material $D_m(1550 \text{ nm}) = +20 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$.
- Tiene un coeficiente de dispersión de guía de onda $D_w = -\frac{83,76\lambda}{a^2 n_2} \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$, donde λ y a están en μm .
- Tiene un coeficiente de dispersión de perfil $D_p(1550 \text{ nm}) = +1 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$.
- Tiene un coeficiente de dispersión de polarización $D_{PMD}(1550 \text{ nm}) = +0,5 \frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}$.
- La atenuación, para longitudes de onda alrededor de 1550 nm, es $\alpha(\lambda) = 0,5 \left[1 + \left| \frac{\lambda - 1550}{25} \right| \right] \frac{\text{dB}}{\text{km}}$, donde λ está en nm.

Se debe simular el pulso de luz que entra y sale de la fibra óptica. Para el caso del pulso de entrada, se tiene que partir de un pulso rectangular con un ancho temporal de 2 ns. Para simular que el tiempo de crecimiento es distinto de cero, se debe usar un filtro pasabajos con una frecuencia de corte $f_c(-3 \text{ dB}) = \frac{0,35}{\tau_f}$. Asimismo, para simular el pulso a la salida de la fibra, se debe aplicar un filtro pasabajos con una frecuencia de corte $f_c(-3 \text{ dB}) = \frac{0,35}{(2 \text{ ns} + \Delta\tau)/2}$ al pulso láser, donde $\Delta\tau$ es la dispersión total. En la figura 1 se muestra un ejemplo donde está representado el pulso de corriente de excitación del diodo láser y los pulsos de luz a la entrada y salida de la fibra óptica, donde se supuso $\Delta\tau = 5,5 \text{ ns}$.

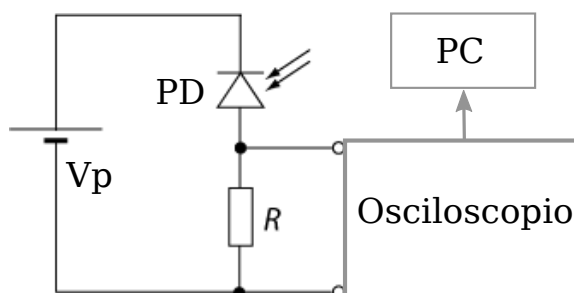


Figura 2: Ejemplo de una configuración experimental para un fotodiodo.

En esta sección, además de determinar la dispersión total ($\Delta\tau$) introducida por la fibra al pulso láser, también se debe calcular la potencia media de la luz (en dBm) que ingresa y sale de la fibra óptica. Para este cálculo, suponer pulsos rectangulares con duración igual al ancho a mitad de altura de los pulsos de luz simulados.

En base a los valores de dispersión total obtenidos en este trabajo, ¿cada cuántos kilómetros se debería poner una repetidora para que $\Delta\tau < 2\tau_f$?

Para la simulación del filtro pasa bajos gaussiano es posible utilizar la función `gaussian` del paquete `signal`. En esta se debe tener especial cuidado en la selección del parámetro gaussiano en función de la frecuencia de corte que se desea y la constante que multiplica la exponencial. Éstos dependerán también de la frecuencia de muestreo elegida para elevar las señales ópticas.

2. Fotodetectores: configuración experimental

Para detectar la luz que sale de la fibra óptica se poseen los siguientes fotodetectores:

- Fotodiodo InGaAs PIN (PIND) modelo G10899-003K.
- Fotodiodo avalancha InGaAs (APD) modelo G14858-0020AA.
- Fotomultiplicador InP/InGaAs (PMD) modelo R5509-73.

Para estos tres fotodetectores se deben proponer esquemas experimentales para medir el pulso de luz simulado en la sección anterior teniendo en cuenta su duración y potencia media. Para su diseño se debe priorizar la sencillez y una alta relación señal a ruido (SNR). En la figura 2 se muestra un ejemplo de un arreglo experimental usando un fotodiodo polarizado en inversa y una resistencia para medir la corriente con un osciloscopio. A continuación se listan los parámetros esenciales de los dispositivos:

- Sensibilidad S para $\lambda = 1550$ nm, cuyas unidades suelen estar en A/W¹.
- Corriente de oscuridad I_D , donde se debe usar el valor máximo.
- Frecuencia de corte f_c que depende del esquema experimental para medir la fotocorriente².
- Ganancia G .³
- Densidad espectral de potencia de ruido equivalente $NEP^* = \frac{NEP}{\Delta f}$, cuyas unidades son $\frac{W}{\sqrt{Hz}}$.

¹Cuidado que no todos los fotodetectores tienen su pico de sensibilidad en 1550 nm. Se recomienda ver el gráfico de S vs. λ , disponible en la hoja de datos.

²A veces, en lugar de f_c , se da como dato el tiempo de crecimiento τ_c

³Sólo para APD y PMD

- Directividad específica $D^* = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{NEP}$, cuyas unidades son $\frac{\text{mHz}}{\text{W}}$.

Asimismo, no debe olvidarse que los esquemas para medir la corriente también agregan ruido. Por ejemplo, si para relevar la corriente se mide la caída de tensión en una resistencia con un osciloscopio, se deberá tener en cuenta el ruido térmico o de Johnson de la misma, $i_n = \sqrt{\frac{4k_B T \Delta f}{R}}$, donde k_B es la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta y R el valor de resistencia.

En resumen en esta sección se debe:

- Detallar los esquemas experimentales para detectar el pulso de luz con el fotodetector.
- Calcular la corriente entregada por el sistema en respuesta al pulso de luz.
- Determinar la corriente de ruido total.

3. Fotodetectores: Obtención de la respuesta en tiempo y frecuencia

En esta sección se debe diseñar una función transferencia para representar la respuesta del sistema de detección. Los datos más relevantes a tener en cuenta son la frecuencia de corte o tiempo de crecimiento ($f_c(-3\text{ dB}) = \frac{0.35}{\tau_c}$) y la corriente total de ruido i_N introducido por el sistema. Se debe graficar las respuestas en tiempo de los 3 sensores. En la misma figura debe estar como referencia el pulso de la fotocorriente entregada por un sensor ideal (ancho de banda ilimitado y libre de ruido).

En la figura 3 se presenta un ejemplo de la respuesta en tiempo de los tres fotodetectores analizados cuando la corriente de entrada posee un perfil temporal igual al pulso de luz saliente de la fibra óptica graficado en la figura 1. Se ha supuesto que la potencia media de la luz incidente al sensor es de -20 dBm y que el ruido generado por el sistema de detección es blanco y con una distribución gaussiana. En este ejemplo, las corrientes de ruido de los sensores PIND, APD y PMT fueron 300 nA , 550 nA y 75 nA , respectivamente. Asimismo, la frecuencia de corte de los filtros pasabajos usados fueron 300 MHz , 900 MHz y 18 MHz , respectivamente. En la figura 3 se puede apreciar el ruido, el desfase y el ensanchamiento producido por los sistemas de detección sobre la señal medida.

Para la adición del ruido blanco se puede utilizar la función `awgn` del paquete `communications`, esta recibe la señal y la SNR del ruido que se quiere agregar. Se debe tener cuidado con las unidades de la señal y la SNR a utilizar. El valor de la SNR deberá ser determinado en base a la señal que entrega cada fotodetector y el ruido que introduce cada circuito.

4. Comparación

Realizar un cuadro comparativo valorando con los adjetivos BUENO, MEDIO y POBRE las siguientes características:

- Sensibilidad
- Nivel de ruido
- Ancho de banda
- Costo / Eficiencia

Debajo del cuadro se debe justificar la valoración realizada. Esto es un trabajo muy común en la elaboración de informes en la ingeniería.

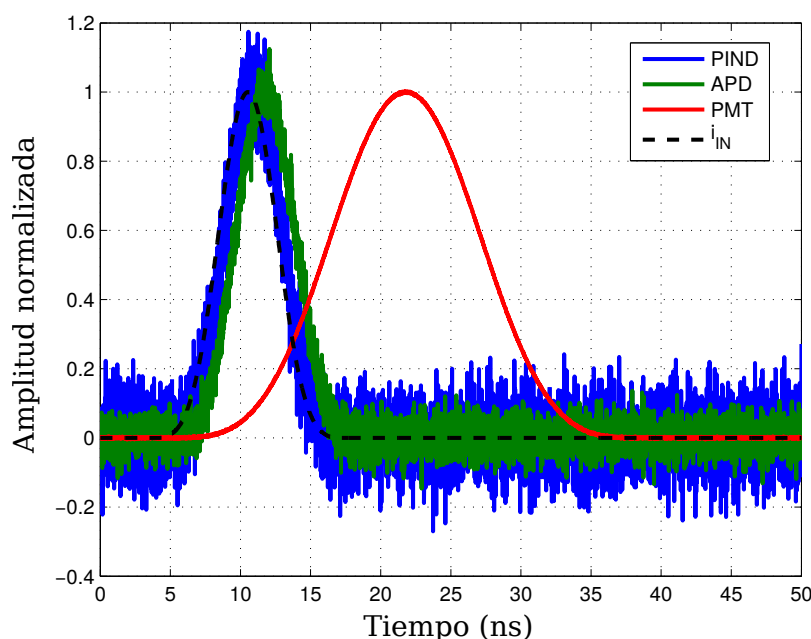


Figura 3: Simulación de la respuesta en tiempo de los 3 sensores estudiados. En línea punteada se muestra la corriente entregada por un sensor ideal.

5. Detalles sobre el Informe

5.1. Resumen del trabajo

El trabajo deberá estar encabezado por un breve resumen que detalle su contenido (objetivos, lo realizado, resultados y conclusiones). El resumen debe ser escrito de forma tal de despertar el interés y la curiosidad del/la lector/a por el trabajo.

5.2. Desarrollo

En el informe debe estar incluido:

- Presentación de las ecuaciones usadas para la realización de los cálculos pedidos y explicitar las simplificaciones realizadas.
- El análisis y la comparación de las curvas simuladas antes y después de pasar por la fibra óptica.
- El análisis y la comparación de las curvas simuladas para los tres fotodetectores estudiados.
- La justificación de la valoración realizada en el cuadro comparativo.

Las figuras que no deben faltar en el informe son:

- Pulso de luz simulados a la entrada y salida de la fibra óptica.
- Configuración experimental de cada uno de los fotodetectores analizados.
- Respuesta en tiempo de los tres fotodetectores estudiados.
- Cuadro comparativo.

5.3. Análisis y comparación de los resultados

Todo resultado presentado en el informe debe estar analizado. Se deben comparar los resultados simulados.

Los gráficos deben ser claros y bien diseñados. Debe analizarse si los resultados son compatibles o no. De existir diferencias, éstas deben ser cuantificadas y deben presentarse posibles explicaciones para estas diferencias.

En todos los gráficos debe figurar una leyenda y un epígrafe indicando a qué corresponde cada curva o nube de puntos y los parámetros usados para la simulación de la misma.

5.4. Conclusiones

El informe debe culminar con las conclusiones, que deben ser breves y conceptuales. Deben estar focalizadas en los objetivos que se cumplieron en el trabajo y eventualmente en resultados interesantes adicionales que se hubieran obtenido.

6. Sugerencias

- Para el desarrollo de este trabajo se recomienda utilizar el tutorial de uso de Octave disponible en la página web del desarrollador.
- No olvidarse del ruido térmico de las resistencias, suele ser el más importante.
- Prestar especial atención a las unidades de las magnitudes, en especial al uso de los dB y sus unidades relacionadas al cambiar de referencia.