



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Práctica Transmisores y Receptores Ópticos

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniero en Telecomunicaciones

P R E S E N T A

Ulises Medina Zendejas

ASESORA DE MATERIAL DIDÁCTICO

Dra. María del Carmen López Bautista



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

AGRADECIMIENTOS

A mis padres: Lilia y Jaime

Por todo el empeño que han puesto para que todos mis hermanos y yo logremos nuestros sueños. Gracias por todo su apoyo y amor, por ayudarme a levantarme de mis fracasos y por celebrar mis éxitos.

A Eric Medina Zendejas y a Maria Fernanda Pérez Ibarra

Por ser grandes compañeros y por su gran apoyo en la consecución de este trabajo.

A la Dra. María del Carmen López Bautista

Por ser la guía que me ayudó a alcanzar una de las metas más grandes de mi vida. Gracias por enseñarme tanto y por convertirse en un ejemplo para mí.

Al Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera

Por todo el tiempo y apoyo que invirtió en ayudarme en la realización de este trabajo. Gracias por compartir su experiencia y conocimiento conmigo.

ÍNDICE

Página

1. Objetivo general	1
2. Objetivos particulares	1
3. Introducción	1
4. Antecedentes	2
5. Práctica	6
I. Objetivos	8
II. Materiales y equipo	8
III. Cuestionario previo	9
IV. Normas Generales	10
V. Marco teórico	11
V.1. Transmisor Láser	11
V.2. Fotodetectores	12
V.2.1. Responsividad de un detector	13
V.2.2. Tiempo de subida y ancho de banda	15
VI. Desarrollo	16
VI.1. Experimento 1: Transmisores láser	16
VI.1.1. Diodo láser Butterfly	16
VI.1.2. Diodo láser de 3 o 4 pines.	18
VI.2. Experimento 2: Fotodetectores ópticos	19
VI.2.1. Caracterización de los fotodetectores PDA10CS y PDA100A empleando el diodo láser Butterfly	20
VI.2.2. Caracterización de los fotodetectores PDA10CS y PDA100A empleando el diodo láser de 3 o 4 pines	21
VI.2.3. Comparación entre los fotodetectores PDA10CS y PDA100A	22
VII. Resultados	24
Referencias	25
Anexos	26
A. Fotografías del material y equipo	26
B. Enlaces de información sobre el material y equipo	31
6. Evaluación de las actividades realizadas por las y los alumnos	32
7. Evaluación del protocolo por parte de las y los alumnos	40
8. Análisis de la evaluación del protocolo	42
9. Recomendaciones	49
10. Conclusiones	50

1. OBJETIVO GENERAL

Actualizar el manual de prácticas del Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas mediante la adición de un nuevo protocolo para caracterizar transmisores y receptores ópticos de manera que el alumnado complemente sus conocimientos teóricos con actividades prácticas.

2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Diseñar e implementar experimentos para la caracterización de transmisores y receptores ópticos empleados en sistemas de comunicaciones ópticas vía fibra óptica, que contribuyan al proceso enseñanza-aprendizaje de la comunidad estudiantil de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones.
- Realizar pruebas al protocolo mediante su aplicación a un grupo de control, para verificar que éste es funcional y que se cumplen los objetivos buscados.
- Formular una encuesta de evaluación para medir los indicadores de actitud que tiene la comunidad estudiantil hacia la práctica.
- Analizar los resultados de la encuesta para identificar los puntos débiles del manual.
- Realizar las mejoras que se requieran basándose en los resultados obtenidos del análisis de los resultados de la encuesta.
- Crear material audiovisual de apoyo para un mejor manejo del material y equipo empleado en la práctica.

3. INTRODUCCIÓN

El protocolo de la práctica Transmisores y Receptores Ópticos se desarrolló con el fin de lograr dos objetivos primordiales. El primero de ellos es la actualización del Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, el segundo por otra parte, es dar a conocer a la comunidad estudiantil de la carrera los equipos transmisores y receptores ópticos, puesto que son componentes fundamentales de las comunicaciones ópticas y porque de esta forma se busca complementar el tema “Equipos transmisor y receptor óptico”, correspondiente al tema 3 de la clase de teoría de la asignatura obligatoria de Sistemas de Comunicaciones Ópticas, además, hasta el momento ninguna de las prácticas existentes cubre este tema.

Para lograr el cometido antes mencionado se realizó una investigación previa sobre los equipos y componentes necesarios para el diseño de los nuevos experimentos con el fin de aprender a utilizarlos correctamente, no solo de forma individual, sino como un conjunto para lograr caracterizar los equipos transmisores y receptores ópticos.

Ya que se aprendió a utilizar todo el material en conjunto se continuó con el diseño e implementación de los experimentos que conformarían la práctica. Para conseguir esto antes que nada se precisaron

los objetivos de los experimentos, lo cual ayudó a delimitar el marco teórico y el cuestionario previo necesarios para introducir a las y los alumnos a las actividades que se harán antes, durante y después de la práctica, asimismo los experimentos se diseñaron para que la comunidad estudiantil de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones se familiarice con el material y equipo especializado.

Después de finalizar el diseño e implementación de la práctica se realizó el material audiovisual como material de apoyo para el estudiantado con el fin de agilizar la consecución de la práctica y para evitar errores y/o accidentes que pudieran dañar el equipo.

Una vez que se concluyó el protocolo de la práctica se realizaron pruebas piloto con un grupo de control inscrito al Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas, al cual se le aplicó una encuesta de evaluación del mismo. Se utilizaron ciertos indicadores para poder analizar si la práctica cumple con los objetivos contemplados, y si las indicaciones de la práctica se comprenden de forma clara y precisa.

Para finalizar se debe mencionar que los indicadores obtenidos mediante la encuesta basada en la escala de Likert fueron evaluados para medir el nivel de actitud de los alumnos frente a la nueva práctica. La encuesta se diseñó para evaluar el aprendizaje que tuvo el alumno y el apoyo que brindó el instructor, la calidad del manual, los objetivos de la práctica, el conocimiento previo brindado por medio del marco teórico, y el estado del equipo del laboratorio. Una vez realizado esto se prosiguió a realizar un promedio por pregunta y por alumno con el fin de detectar deficiencias y realizar las mejoras correspondientes al protocolo.

4. ANTECEDENTES

Los sistemas de comunicaciones ópticas utilizan la luz como portadora de la información a transmitir. La luz es un tipo de radiación electromagnética, tal como las ondas de radio, que puede propagarse por el espacio libre o un cable portador de luz llamado cable de fibra óptica. Ambos medios son utilizados, aunque el cable de fibra óptica es mucho más práctico y más ampliamente utilizado por su baja atenuación [1].

Las comunicaciones ópticas modernas comenzaron en la década de 1960, cuando los láseres fueron inventados como una fuente de luz coherente [2]. Desde entonces, el rápido desarrollo de las tecnologías fotónicas ha hecho posibles enlaces de comunicación óptica con capacidades de hasta terabits por segundo y con distancias de transmisión de muchos miles de kilómetros. El crecimiento explosivo de las tecnologías de comunicación óptica en décadas pasadas ha revolucionado la industria de las telecomunicaciones y ha creado una infraestructura de comunicaciones global con redes ópticas.

De manera general, los principales componentes que constituyen el núcleo central de las comunicaciones ópticas vía fibra óptica son los siguientes:

- **Transmisor.** Un transmisor es una fuente de luz, entre las más comunes son los LEDs (Light Emitting Diodes) y los láseres. Estas fuentes pueden seguir los cambios de la señal eléctrica tan rápido como 100 GHz o más. Una de las ventajas de los láseres es que generan luz monocromática o de frecuencia única, lo que la hace totalmente coherente, ayudando a evitar ciertos fenómenos y

efectos que pueden afectar la transmisión correcta de la información [1].

- **Receptor.** La onda de luz modulada es recogida por un fotodetector. Por lo general es un fotodiodo o transistor cuya conducción es variada por la luz. La pequeña señal es amplificada y demodulada para recuperar la señal transmitida originalmente [1].
- **Medio de transmisión.** Medio por el que se transmite la radiación óptica, que es la fibra óptica. Un cable de fibra óptica es un cable delgado de vidrio o plástico que actúa como un tubo a través del cual viaja la luz.

Cabe destacar que la evolución de las comunicaciones ópticas ha sido determinada precisamente por los nuevos desarrollos de los componentes que las sustentan, y el parámetro que más determina la calidad de un enlace de comunicaciones es el producto, *capacidad-distancia* [3].

Hay 5 generaciones de sistemas de comunicaciones ópticas, que se diferencian entre sí por la longitud de onda, tasa de transmisión (Mbps), y distancia entre las terminales ópticas. De manera resumida se presenta cada una de dichas generaciones [4].

Primera generación:

- comenzó en 1980;
- longitud de onda de 800 nm;
- tasa de transmisión de 45 Mbps;
- pérdidas de 2-3 dB/km;
- distancia entre terminales ópticas de 10 km.

Segunda generación:

- comenzó durante la década de 1980;
- longitud de onda de 1300 nm;
- estructura de fibra óptica monomodo;
- tasa de transmisión de 1.7 Gbps;
- pérdidas de 0.4 dB/km;
- distancia entre terminales ópticas de 50 km.

Tercera generación:

- comenzó en 1990;

- longitud de onda de 1550 nm;
- láser de fibra monomodo;
- tasa de transmisión de 2.5 Gbps;
- pérdidas de 0.2 dB/km
- distancia entre terminales ópticas de 60-70 km.

Cuarta generación:

- comenzó en 1996-1997;
- amplificadores ópticos;
- wavelength-division multiplexing (WDM);
- tasa de transmisión de 5-10 Gbps;
- compensación de pérdidas mediante fibras dopadas con tierras raras (amplificador óptico);
- distancia entre terminales ópticas de 60-100 km.

Quinta generación:

- comenzó a finales de los 90's;
- solitones;
- dense-wavelength-division-multiplexing (DWDM);
- compensación de dispersión;
- tasa de transmisión en el orden de Tb/s;
- distancia entre terminales ópticas de más de 100 km.

Una banda de frecuencia suficientemente amplia ha permitido un aumento en el producto bit rate-distance durante un período de aproximadamente 150 años pasando de $\sim 10^2$ a $\sim 10^{15}$ bps/km [4].

Considerando los avances de las tecnologías en los sistemas de comunicaciones ópticas, en la Tabla 1 se muestra el temario del Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas y se observa que en gran medida abarca el tema del medio de transmisión utilizado en las redes ópticas (fibra óptica), pero no se cuenta con ninguna práctica que se centre en las terminales ópticas de dichas redes (transmisor y receptor). Es por ello que esta práctica recobra importancia, pues resulta imprescindible incluir una práctica que analice de forma particular el funcionamiento y aplicación de equipos transmisores y receptores ópticos empleados en sistemas de comunicaciones ópticas vía fibra óptica.

Tabla 1. *Prácticas con las que cuenta actualmente el Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas.*

No. de Práctica	Nombre de la Práctica
1	Preparación de fibras ópticas para una conexión.
2	Empalme de fibras ópticas por fusión de arco eléctrico.
3	Medición del diámetro de una fibra óptica.
4	Medición de la apertura numérica de una fibra óptica.
5	Medición de pérdidas de inserción.
6	Medición de la atenuación por el método de retroesparcimiento (OTDR).
7	Medición de enlaces de fibra óptica de larga distancia con OTDR.
8	Verificación con OTDR de instalación de enlaces de fibra óptica de redes FTTH/PON.

Otro de los aspectos fundamentales a subrayar es que la mayoría de estas prácticas tienen más de 12 años de antigüedad, es por ello que hace un par de años comenzó la iniciativa para actualizar las existentes y añadir otras nuevas. En la Tabla 2 se muestran las nuevas prácticas que se planea añadir al manual ya existente.

Tabla 2. *Prácticas nuevas y/o en desarrollo.*

Nombre de la Práctica
Activación de servicios de Gigabit Ethernet.
Transmisores y Receptores Ópticos.
Modulación de la luz de un láser.
Medición del espectro de un láser usando un OSA.

A continuación se presenta el protocolo desarrollado para la práctica: Transmisores y Receptores Ópticos.

5. PRÁCTICA

En este apartado se presenta el protocolo final de la práctica Transmisores y Receptores Ópticos.

PRÁCTICAS DEL LABORATORIO DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

PRÁCTICA TRANSMISORES Y RECEPTORES ÓPTICOS

RESPONSABLES:

**Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera
Dra. María del Carmen López Bautista**

AUTORES:

**Ing. Ulises Medina Zendejas
Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera
Dra. María del Carmen López Bautista**



Práctica: Transmisores y Receptores ópticos

ÍNDICE

CONTENIDO

I. Objetivos

II. Materiales y equipo

III. Cuestionario previo

IV. Normas generales

V. Marco teórico

V.1. Transmisor láser

V.2. Fotodetectores

V.2.1. Responsividad de un detector

V.2.2. Tiempo de subida y ancho de banda

VI. Desarrollo

VI.1. Experimento 1: Transmisores láser

VI.1.1. Diodo láser Butterfly

VI.1.2. Diodo láser de 3 o 4 pines

VI.2. Experimento 2: Fotodetectores ópticos

VI.2.1. Caracterización de los fotodetectores PDA10CS y PDA100A empleando el diodo láser Butterfly

VI.2.2. Caracterización de los fotodetectores PDA10CS y PDA100A empleando el diodo láser de 3 o 4 pines

VI.2.3. Comparación de los fotodetectores

VII. Resultados

Referencias

Anexos

A. Fotografías del material y equipo

B. Enlaces de información sobre el material y equipo

I. Objetivos

Con la realización de esta práctica, se espera que las y los alumnos:

- Obtengan los conocimientos teóricos y prácticos elementales para el trabajo con transmisores y receptores ópticos.
- Aprendan a manejar el nuevo equipo especializado con el que cuenta el Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas.
- Conozcan y manipulen distintos tipos de láseres utilizados en comunicaciones ópticas para la transmisión de información y obtengan las propiedades de emisión de los mismos.
- Conozcan y manipulen distintos tipos de fotodetectores ópticos.
- Conozcan la importancia de elegir el fotodetector correcto según la aplicación requerida.

II. Materiales y equipo

- Diodo láser con empaquetado tipo TO Can con emisión en $\lambda = 1550$ nm.
- Diodo láser con empaquetado tipo Butterfly con emisión en $\lambda = 980$ nm.
- Fotodetector Thorlabs-PDA10CS con rango espectral $\lambda = 700-1800$ nm.
- Fotodetector Thorlabs-PDA100A con rango espectral $\lambda = 400-1100$ nm.
- Controlador de corriente.
- Controlador de temperatura.
- Medidor de potencia óptica.
- Monturas para diodos láser.
- Multímetro con sus respectivos cables.
- Adaptador conector FC-APC a FC-UPC.
- Jumper SMF FC-UPC.
- Apuntadores láser de distintas longitudes de onda de emisión con sujetador en V y base de montaje.
- Cables BNC-caimán.
- Casetera o toallas-servilletas de baja porosidad libres de residuos.
- Desarmador plano.

III. Cuestionario previo

- a) ¿Qué significa el acrónimo LASER y menciona qué características debe cumplir una fuente de luz para considerarse emisión láser?
- b) ¿En qué campos de aplicación son utilizados los láseres?
- c) ¿De qué depende la propiedad de emisión de un material semiconductor?
- d) Explica brevemente cómo funciona un emisor láser y enfatiza la función de cada uno de los componentes de un láser.
- e) Menciona las clasificaciones de un láser según el tipo de medio de ganancia.
- f) ¿Cuál es la función de un receptor óptico?
- g) ¿Qué es un fotodetector y cómo funciona?
- h) ¿De qué depende la propiedad de absorción de un material semiconductor?
- i) Define con tus propias palabras los siguientes conceptos:
 - Responsividad de un detector.
 - Eficiencia cuántica de un detector.
 - Ancho de banda de un detector.
 - Corriente de oscuridad.
 - Sensibilidad en potencia.
- j) Investiga la curva de responsividad del fotodetector PDA10CS y determina a qué longitud de onda se obtiene el valor máximo de responsividad.
- k) Investiga la curva de responsividad del fotodetector PDA100A y determina a qué longitud de onda se obtiene el valor máximo de responsividad.

IV. Normas Generales

Antes de mencionar algunos conceptos teóricos, es importante recalcar algunos puntos sobre seguridad a tener en cuenta al realizar esta práctica:

1. No ver de frente la fibra óptica cuando el dispositivo láser se encuentre encendido, ya que puede causar daños permanentes en los ojos.
2. No dirigir a los ojos el haz del apuntador láser, ya que puede causar daños.
3. Asegurarse de que el equipo controlador de corriente se encuentre configurado en su valor más bajo antes de activar la emisión, pues si éste se encuentra configurado a una corriente muy alta puede dañar el diodo láser.
4. Manejar con sumo cuidado la fibra óptica, cuidando no doblarla o aplastarla.
5. No tocar los conectores de fibra óptica. La contaminación de los conectores causa una disminución en la potencia de la señal enviada o recibida.
6. Leer detenidamente y con atención la práctica.

V. Marco teórico

V.1. Transmisor Láser

La palabra láser es un acrónimo de amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. Un láser es un dispositivo que amplifica la luz y produce un haz altamente direccional y de alta intensidad que por lo general tiene un ancho espectral angosto. Vienen en tamaños que van desde aproximadamente una décima parte del diámetro de un cabello humano hasta el tamaño de grandes edificios, en cuanto a la potencia se encuentran en rangos que van de 10^{-9} hasta 10^{20} W, y en longitudes de onda que van desde las microondas hasta la región de los rayos X, cuyas frecuencias correspondientes se encuentran entre 10^{11} a 10^{17} Hz. En la actualidad los láseres son ampliamente usados en la industria para cortar y soldar metales y otros materiales, en medicina para cirugía, en comunicaciones ópticas, en metrología óptica y en investigación científica [1].

El láser utiliza procesos que aumentan o amplifican las señales de luz después de que éstas hayan sido generadas por otros medios (lámparas de flash, arcos eléctricos u otros láseres). Estos procesos incluyen (1) emisión espontánea que provoca (2) la emisión estimulada, un efecto natural que fue deducido por consideraciones relacionadas con el equilibrio termodinámico y (3) realimentación óptica (presente en la mayoría de láseres) que generalmente lo proporcionan los espejos de una cavidad resonante. Entonces, de forma sencilla se puede decir que un láser se constituye de los siguientes tres componentes [2]:

- Un medio de ganancia que puede amplificar la luz por medio del proceso básico de emisión estimulada.
- Una fuente de bombeo que crea una inversión de población en el medio de ganancia.
- Dos espejos que forman un resonador o cavidad óptica en la que la luz está atrapada, viajando de ida y vuelta entre los espejos.

El rayo láser usualmente es la parte fraccional de la luz atrapada en la cavidad que escapa de uno de los dos espejos (el acoplamiento de salida). El medio de ganancia puede ser sólido (incluidos los semiconductores), líquido o gaseoso, y la fuente de bombeo puede ser eléctrico u óptico. En la Fig. 1 se puede ver el esquema básico de un láser [2].

Los láseres se pueden dividir en los siguientes dos grupos:

- Onda continua (CW) o quasi-CW.
- Pulsado.

Un láser CW exhibe un flujo constante de energía coherente y su potencia de salida sufre poco o ningún cambio con el tiempo. En los láseres pulsados, la potencia del haz de salida cambia con el tiempo para producir un pulso óptico corto, normalmente de forma repetitiva y con una duración que oscila entre nanosegundos y femtosegundos. Otra de las clasificaciones es por el tipo de encapsulado del diodo láser, en el caso de la presente práctica se utilizarán un diodo láser con encapsulado TO Can y otro con encapsulado Butterfly aunque existen otros tipos como el C-mount, D-mount y HHL (alta carga de calor) [2].

Los láseres igualmente se dividen en clases, la clase es un indicador directo del grado de peligrosidad de los mismos. A continuación se presenta cada una de ellas.

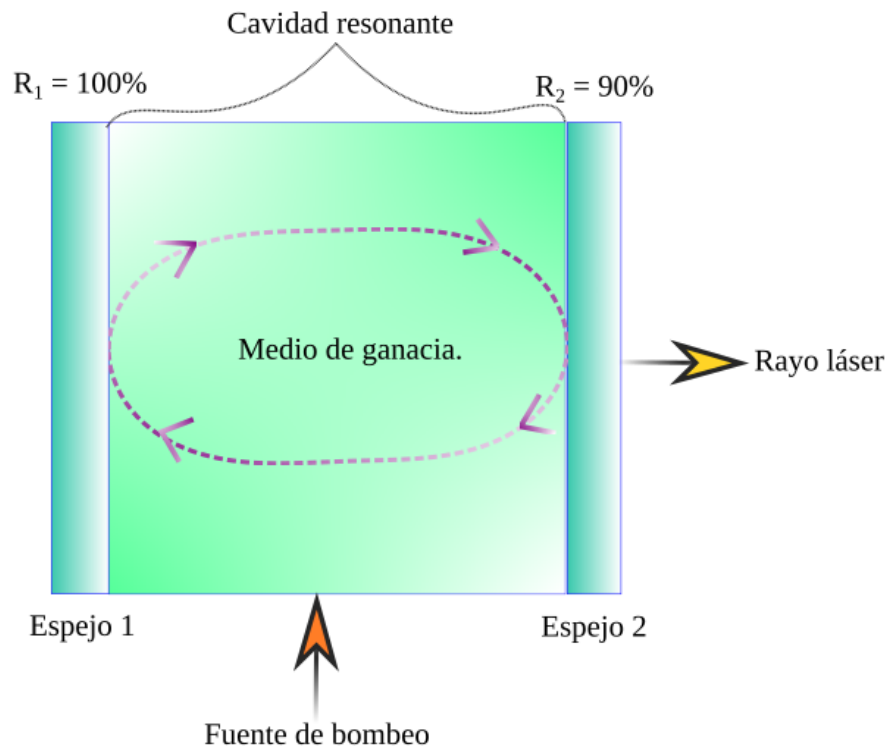


Fig. 1. Esquema simplificado de la composición de un láser típico.

- Clase 1: estos láseres no producen niveles de radiación dañinos por lo que están exentos de la mayoría de las medidas de control y de seguridad ($P < 1 \mu\text{W}$).
- Clase 1M: son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles ($P < 1 \mu\text{W}$).
- Clase 2: estos láseres emiten radiación en el rango del visible (400-700 nm) y son capaces de causar daño ocular a través de la exposición crónica ($P < 1 \text{ mW}$).
- Clase 2M: láseres de propósito especial que emiten en el rango del visible (400-700 nm). La potencia de esta clase de láseres es menor a 1 mW.
- Clase 3R: no producen lesiones si se observan momentáneamente. Son peligrosos si se observan con otros instrumentos como telescopios, microscopios, etc. ($P : 1 - 5\text{mW}$).
- Clase 3B: causan daño al ver directamente el haz y los reflejos especulares ($P : 5 - 500\text{mW}$).
- Clase 4: incluye a todos los láseres con una potencia mayor a 500 mW . Causan daño en los ojos y en la piel, incluso los reflejos especulares o la exposición a reflejos difusos. Al trabajar con este tipo de láseres se deben de tomar todas las medidas de control.

V.2. Fotodetectores

Un receptor óptico tiene como principal función la conversión de la señal óptica en una señal eléctrica para poder recuperar la información transmitida. El elemento de entrada en un receptor óptico es llamado fotodetector. En el caso de los fotodetectores basados en semiconductor, como los fotodiodos PIN y de Avalancha, el mecanismo de generación de corriente eléctrica es la foto-absorción de fotones de energía

por parte de los pares electrón-hueco del semiconductor, lo que ocasiona el rompimiento del enlace del par electrón-hueco, y permite al electrón quedar libre para circular libremente por el semiconductor. De manera general, un receptor óptico debe tener alta sensibilidad en la región de trabajo para la cual fue diseñado, respuesta rápida, bajos niveles de ruido y una alta confiabilidad (produce los mismos resultados si se aplica al mismo sujeto en repetidas ocasiones). Además, en los sistemas de fibra óptica se recomienda que el área fotosensible del fotodetector sea comparable con el núcleo de una fibra.

A continuación, se da una breve explicación sobre responsividad de un detector, su eficiencia cuántica y ancho de banda, pues son conceptos necesarios para poder comprender dicho término, además los parámetros mencionados son comunes en todos los fotodetectores basados en semiconductor, ampliamente usados en telecomunicaciones vía fibra óptica [3].

V.2.1 Responsividad de un detector

Si se considera la estructura de un material semiconductor como la mostrada en la Fig. 2 y si la energía $E = hf$ (donde h es la constante de Planck y f es la frecuencia de radiación) de los fotones incidentes excede la energía de la banda prohibida del material, se romperá un par electrón-hueco cada vez que un fotón sea absorbido por el semiconductor. Bajo la influencia de un campo eléctrico establecido en el material a causa de la aplicación de una diferencia de potencial en él, los electrones y huecos pueden ser barridos a través del semiconductor, resultando una corriente eléctrica denominada fotocorriente I_p , la cual es directamente proporcional a la potencia óptica incidente P_{in} de la siguiente forma

$$I_p = RP_{in}, \quad (1)$$

donde R es la responsividad del fotodetector en unidades [A/W]. La responsividad puede ser expresada en términos de la eficiencia cuántica η , quedando de la siguiente forma

$$R = \frac{\eta q}{hf}, \quad (2)$$

donde η corresponde a la tasa de electrones generados con relación a la tasa de fotones incidentes y oscila en valores entre 0 y 1, q es la carga del electrón ($-1,602 \times 10^{-19}$ C), h es la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J·s = $4,136 \times 10^{-15}$ eV·s), y f es la frecuencia de radiación.

Las Ecs. (1) y (2) se emplean para fotodiodos PIN, para el caso de los fotodiodos avalancha (APD), está presente la ionización de impacto. Los APD son sometidos a una fuerte corriente en inversa de tal forma que los fotoelectrones generados puedan a su vez generar nuevos pares electrón-hueco bajo la influencia del fuerte campo eléctrico existente y aumentar la cantidad de pares electrón que permitirán absorber una mayor cantidad de fotones, ayudando a la fotodetección. Es por ello que los APD tienen una mayor responsividad, la cual está dada por la siguiente expresión:

$$R_{APD} = MR, \quad (3)$$

donde R es la responsividad del fotodiodo PIN y M es un factor de multiplicación [4]. En la Fig. 3 se muestra la estructura de un fotodiodo APD.

Algo que se debe recalcar es que las propiedades de absorción del material semiconductor están dadas por las bandas de conducción y valencia en la estructura del material. Para longitudes de onda que van

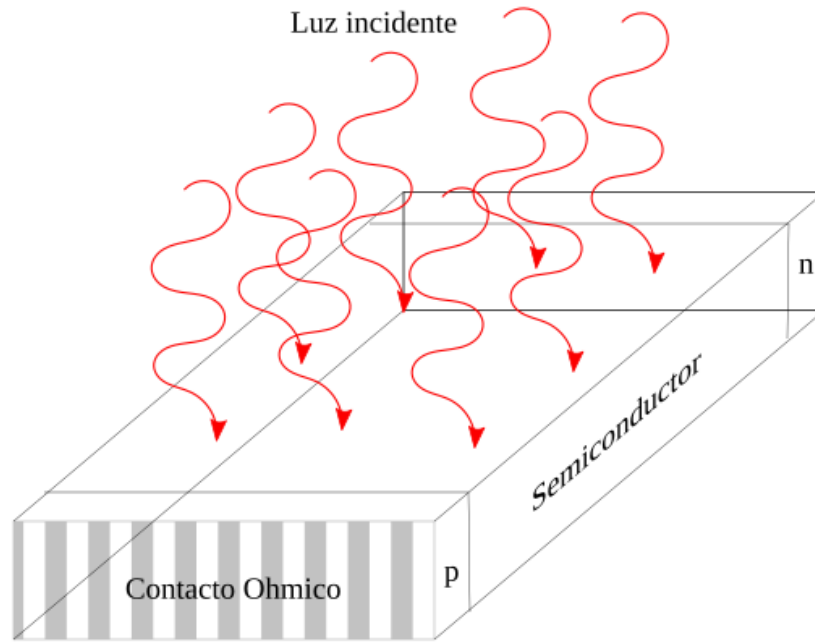


Fig. 2. Estructura semiconductor utilizada como fotodetector.

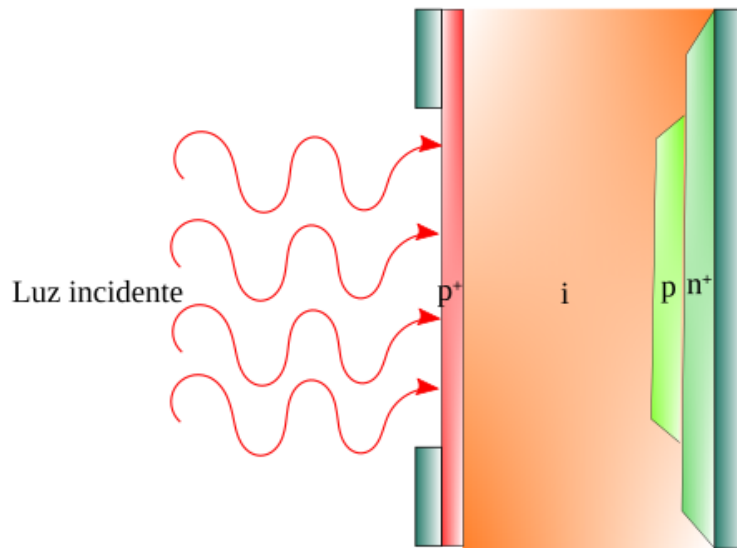


Fig. 3. Esquema de la estructura interna de un fotodiodo de avalancha.

de 200 a 2000 nm los semiconductores de germanio, galio, arsénico y silicio son los ideales para la detección de la radiación óptica. Los semiconductores como el galio y el arsénico absorben longitudes de aproximadamente 900 nm, el silicio arriba de 110 nm y el germanio longitudes cercanas o superiores a $1.8\mu\text{m}$. En aplicaciones de fibra óptica son mejores el galio, el indio y el arsénico [4].

En particular los fotodiodos basados en un solo semiconductor como el Si , detectan luz en el rango del visible (400-700 nm). Existen otros fotodiodos semiconductores que están contruidos a base de una mezcla de 3 o 4 semiconductores, y no de uno solo. En particular los semiconductores ternarios como GaAsP detectan alrededor de 800 nm y los semiconductores cuaternarios como InGaAsP detectan alrededor de 1550 nm. Derivado de lo anterior se puede decir que la elección del material semiconductor depende principalmente del rango espectral de interés. En la Fig. 4 se muestra un gráfico del coeficiente de absorción en función de la longitud de onda de la luz para los semiconductores más comunes.

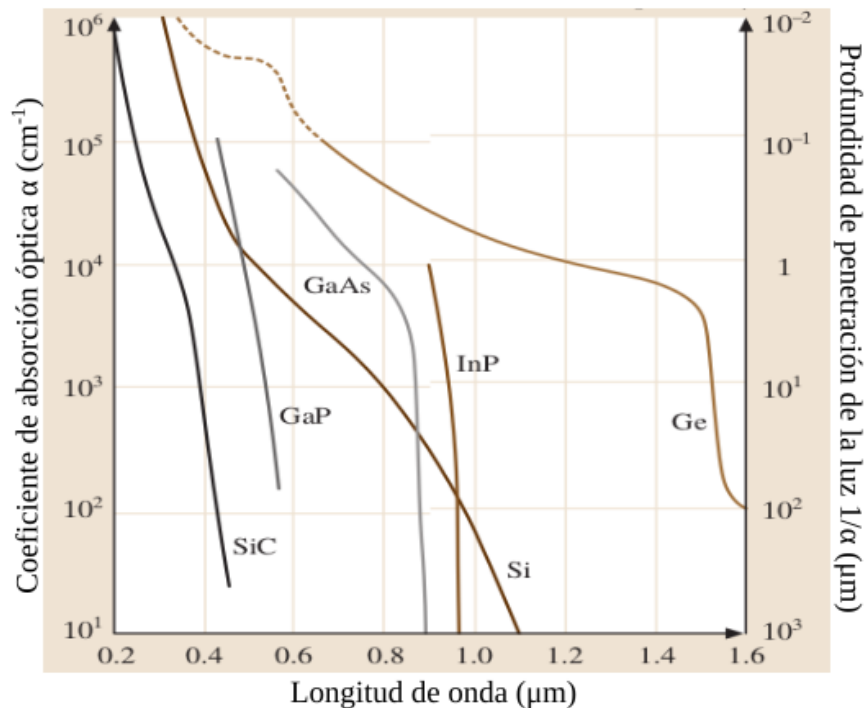


Fig. 4. Coeficiente de absorción en función de la longitud de onda de la luz para varios elementos y semiconductores binarios [2].

V.2.2 Tiempo de subida y ancho de banda

El ancho de banda de un fotodetector está determinado por la velocidad con la cual éste responde a las variaciones de la potencia óptica incidente. El tiempo de subida se define como el lapso en el que la corriente tarda en pasar del 10 al 90 % de su valor final cuando la potencia óptica incidente cambia abruptamente en forma de escalón. Es evidente que el tiempo de subida (T_r) dependerá del tiempo que le tome a los electrones y los huecos viajar a los contactos electrónicos. También depende del tiempo de respuesta del circuito eléctrico utilizado para procesar la fotocorriente.

VI. Desarrollo

VI.1. Experimento 1: Transmisores láser

En este experimento se determinará la corriente umbral (I_{th}) y la respuesta de la potencia óptica en función de la corriente suministrada a un diodo láser Butterfly y a un diodo láser de 3 o 4 pines.

VI.1.1 Diodo láser Butterfly

PARTE I. Cálculo de la corriente umbral

- 1) Encender el controlador de temperatura y de corriente. En el caso del controlador de corriente es importante revisar que se encuentre configurado en el valor de corriente mínimo, una vez verificado esto, conectar a la montura del diodo láser cuidando no activar la salida del controlador de corriente aún. NOTA: El valor configurado como I_{lim} (corriente límite) debe tener un valor aproximado de 200 mA.
- 2) El diodo láser butterfly tiene integrado una terminación de fibra óptica, ésta estará conectada a un adaptador de conector FC-APC a FC-UPC que une la fibra del diodo a un jumper FC-UPC para poder hacer mediciones en el medidor de potencia. El extremo libre del jumper se debe conectar al medidor de potencia, es importante señalar que se tiene que verificar la longitud de onda a la que emite el diodo láser, pues el medidor de potencia se deberá configurar a esa misma longitud de onda.
- 3) Verificar las conexiones tal como se muestra en la Fig. 5, y habilitar la salida del controlador de corriente y temperatura e ir subiendo gradualmente el valor de corriente hasta que se pueda ver alguna lectura de potencia en el medidor (medir en Watts). Anotar el valor en la Tabla 3.

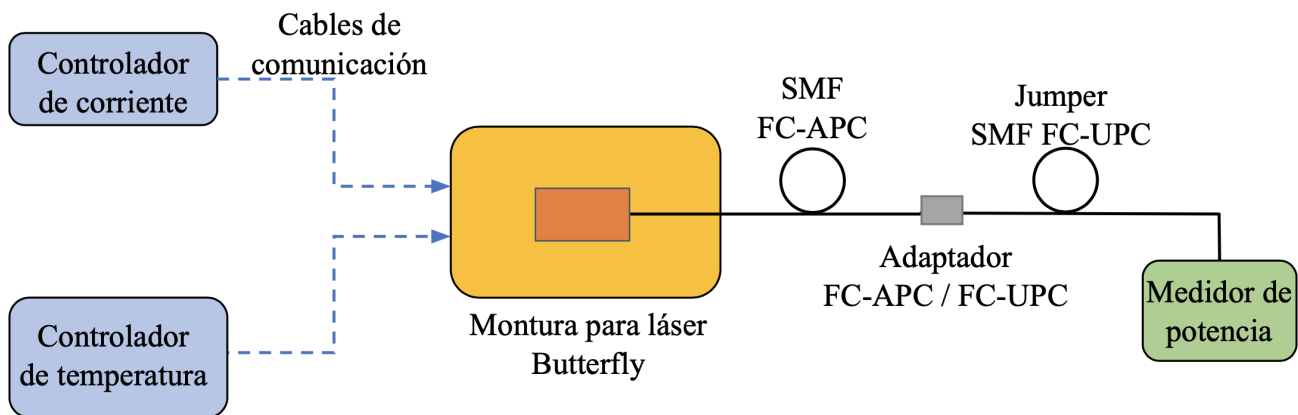


Fig. 5. Diagrama de conexiones para determinar la I_{th} del láser Butterfly.

Tabla 3. Valor de la corriente umbral (I_{th}) del diodo láser Butterfly.

Corriente [mA]	Potencia [mW]

- 4) Hacer mediciones con pasos más finos alrededor de la corriente umbral (pasos de alrededor de 0.25 mA). Registrar los datos en la Tabla 4.

Tabla 4. Mediciones alrededor de la corriente umbral (I_{th}) del diodo láser Butterfly.

No. de Medición	Corriente [mA]	Potencia [mW]
1		
2		
3		
4		

PARTE II. Potencia óptica vs Corriente

- 1) Configurar la corriente de salida del controlador en el valor de I_{th} determinado con las Tablas 3 y 4.
- 2) Incrementar el valor de la corriente suministrada al diodo láser en pasos de 10 mA a partir de I_{th} . Anotar el valor de corriente y el valor de potencia en la Tabla 5. NOTA: El valor de la corriente debe ser igual o menor a 200 mA, si se sobrepasa este valor puede quemarse el láser.

Tabla 5. Potencia óptica vs Corriente del diodo láser Butterfly.

No. de Medición	Corriente [mA]	Potencia [mW]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

- 3) Configurar el controlador de corriente al valor mínimo de corriente posible, deshabilitar la salida de los controladores de corriente y temperatura. Es recomendable hacer el experimento de la subsección VI.2.1 para evitar estar conectando y desconectando los controladores a las monturas.

VI.1.2 Diodo láser de 3 o 4 pines.

PARTE I. Cálculo de la corriente umbral

- 1) Encender el controlador de temperatura y de corriente, en el caso del controlador de corriente es importante revisar que se encuentre configurado en el valor de corriente mínimo, una vez verificado esto, conectar a la montura del diodo láser cuidando no activar la salida del controlador de corriente aún. NOTA: El valor configurado como I_{lim} (corriente límite) debe tener un valor aproximado de 35 mA.
- 2) El diodo láser de cuatro pines tiene integrado una terminación de fibra óptica, esta estará conectada a un adaptador de conector FC-APC a FC-UPC que une la fibra del diodo a un jumper FC-UPC para poder hacer mediciones en el medidor de potencia. El extremo libre del jumper se debe conectar al medidor de potencia, es importante señalar que se tiene que verificar la longitud de onda a la que emite el diodo láser, pues el medidor de potencia se deberá configurar a esa misma longitud de onda.
- 3) Verificar las conexiones tal como se muestra en la Fig. 6, y habilitar la salida del controlador de corriente y temperatura e ir subiendo gradualmente el valor de corriente hasta que se pueda ver alguna lectura de potencia en el medidor (medir en Watts). Anotar el valor en la Tabla 6.

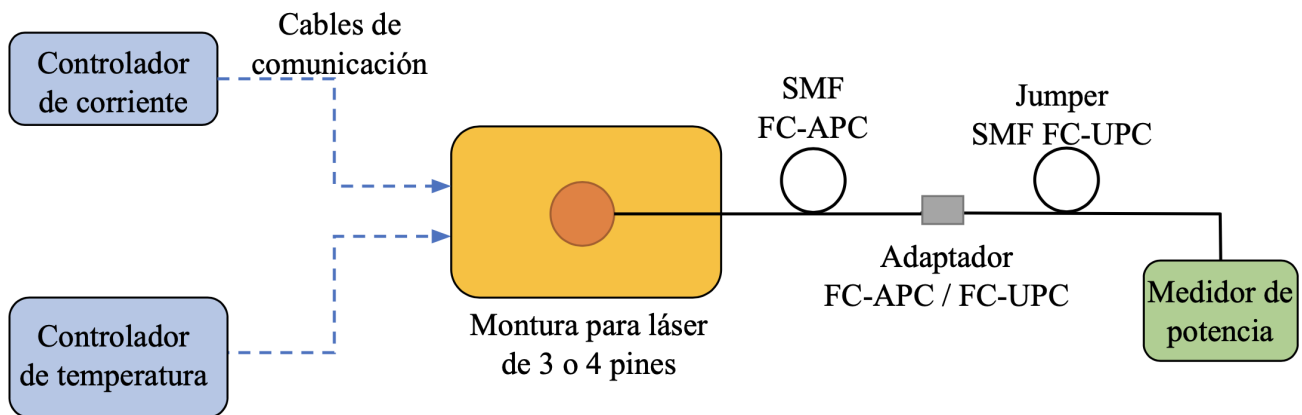


Fig. 6. Diagrama de conexiones para determinar la I_{th} del láser de 3 o 4 pines.

Tabla 6. Valor de la corriente umbral (I_{th}) del diodo láser de 3 o 4 pines.

Corriente [mA]	Potencia [mW]

- 4) Hacer mediciones con pasos más finos alrededor de la corriente umbral (pasos de alrededor de 0.25 mA). Registrar los datos en la Tabla 7.

Tabla 7. Mediciones alrededor de la corriente umbral (I_{th}) del diodo láser de 3 o 4 pines.

No. de Medición	Corriente [mA]	Potencia [mW]
1		
2		
3		
4		

PARTE II. Potencia óptica vs Corriente

- 1) Configurar la corriente de salida del controlador en el valor de I_{th} (corriente umbral) determinado con la tabla anterior.
- 2) Incrementar el valor de la corriente suministrada al diodo láser en pasos de 3 mA a partir del valor de I_{th} . Llenar la Tabla 8. NOTA: El valor máximo de corriente suministrada debe ser menor o igual a 35 mA, si se rebasa este valor el diodo puede quemarse.

Tabla 8. Potencia óptica vs Corriente del diodo láser de 3 o 4 pines.

No. de Medición	Corriente [mA]	Potencia [mW]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

- 3) Configurar el controlador de corriente al valor mínimo de corriente posible, deshabilitar la salida de los controladores de corriente y temperatura. Es recomendable hacer el experimento de la subsección VI.2.2 para evitar estar conectando y desconectando los controladores de las monturas.

VI.2. Experimento 2: Fotodetectores ópticos

En este experimento se determinará la curva de potencia en función del voltaje (P vs V) de los fotodetectores PDA10CS y PDA100A empleando los diodos láser Butterfly y de 4 pines.

VI.2.1 Caracterización de los fotodetectores PDA10CS y PDA100A empleando el diodo láser Butterfly

- 1) Revisar que el controlador de corriente se encuentre configurado en el valor de corriente mínimo posible, una vez hecho esto, conectar a la montura del diodo láser Butterfly.
- 2) El diodo láser butterfly tiene integrado una terminación de fibra óptica, ésta estará conectada a un adaptador de conector FC-APC a FC-UPC que une la fibra del diodo a un jumper FC-UPC para poder trabajar con los fotodetectores. El extremo libre del jumper se debe conectar al fotodetector, es importante señalar que se debe verificar la longitud de onda a la que emite el diodo láser, pues cada fotodetector trabaja en cierto rango de longitud de onda.
- 3) Conectar la salida del fotodetector a un multímetro, para este fin es necesario utilizar un cable BNC-caimán. Se medirá voltaje por lo que es importante revisar que las puntas del multímetro se encuentren colocadas correctamente. Una vez que esté todo conectado tal como se muestra en la Fig. 7, habilitar la salida del controlador de corriente y temperatura para que el diodo comience a funcionar.
- 4) Llenar la Tabla 9 para cada fotodetector usando el diodo láser Butterfly. Auxiliarse de las curvas “Potencia óptica vs Corriente” obtenidas en el Experimento 1.

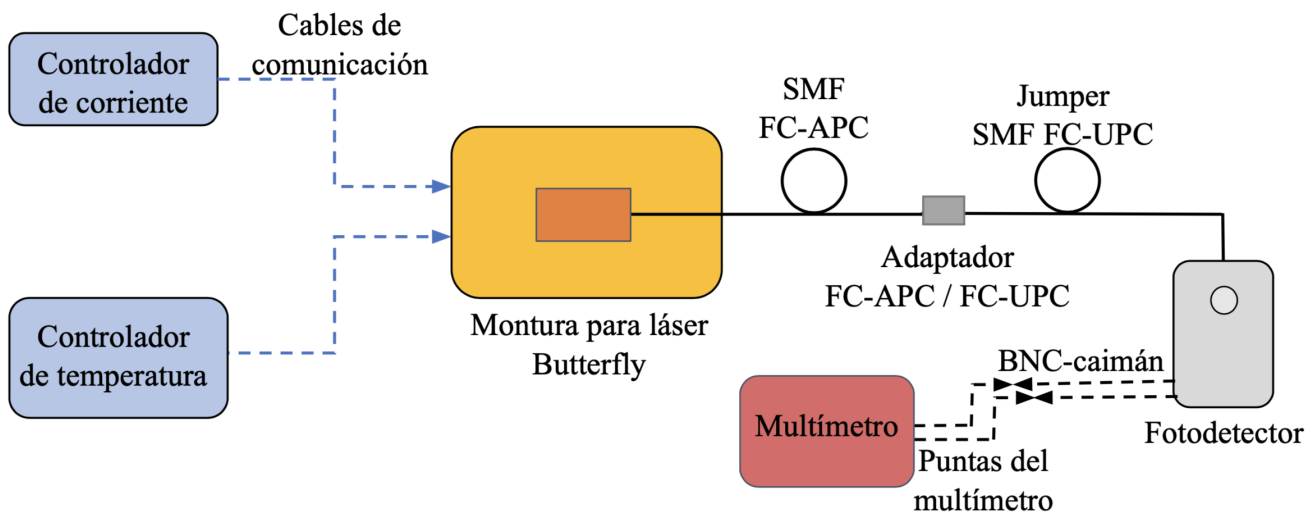


Fig. 7. Diagrama de conexiones para la caracterización de los fotodetectores.

Tabla 9. Medición del voltaje recibido por el fotodetector PDA10CS/PDA100A empleando el diodo láser Butterfly.

No. de Medición	Potencia [mW]	Voltaje [V]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

5) Antes de apagar el controlador de corriente, configurarlo al valor mínimo de corriente posible.

VI.2.2 Caracterización de los fotodetectores PDA10CS y PDA100A empleando el diodo láser de 3 o 4 pines

- 1) Revisar que el controlador de corriente se encuentre configurado en el valor de corriente mínimo posible, una vez hecho esto, conectar a la montura para diodos láser de 3 o 4 pines.
- 2) El diodo láser de 4 pines tiene integrado una terminación de fibra óptica, ésta estará conectada a un adaptador de conector FC-APC a FC-UPC que une la fibra del diodo a un jumper FC-UPC para poder trabajar con los fotodetectores. El extremo libre del jumper se debe conectar al fotodetector, es importante señalar que se tiene que verificar la longitud de onda a la que emite el diodo láser, pues cada fotodetector trabaja en un determinado rango de longitud de onda.
- 3) Conectar la salida del fotodetector a un multímetro, para este fin es necesario utilizar un cable BNC-caimán. Se medirá voltaje por lo que es importante revisar que las puntas del multímetro se encuentren colocadas correctamente. Una vez que esté todo conectado tal como se muestra en la Fig. 8, habilitar la salida del controlador de corriente y temperatura para que el diodo comience a funcionar.
- 4) Llenar la Tabla 10 para cada fotodetector usando el diodo láser de 3 o 4 pines. Auxiliarse de las curvas “Potencia óptica vs Corriente” obtenidas en el Experimento 1.

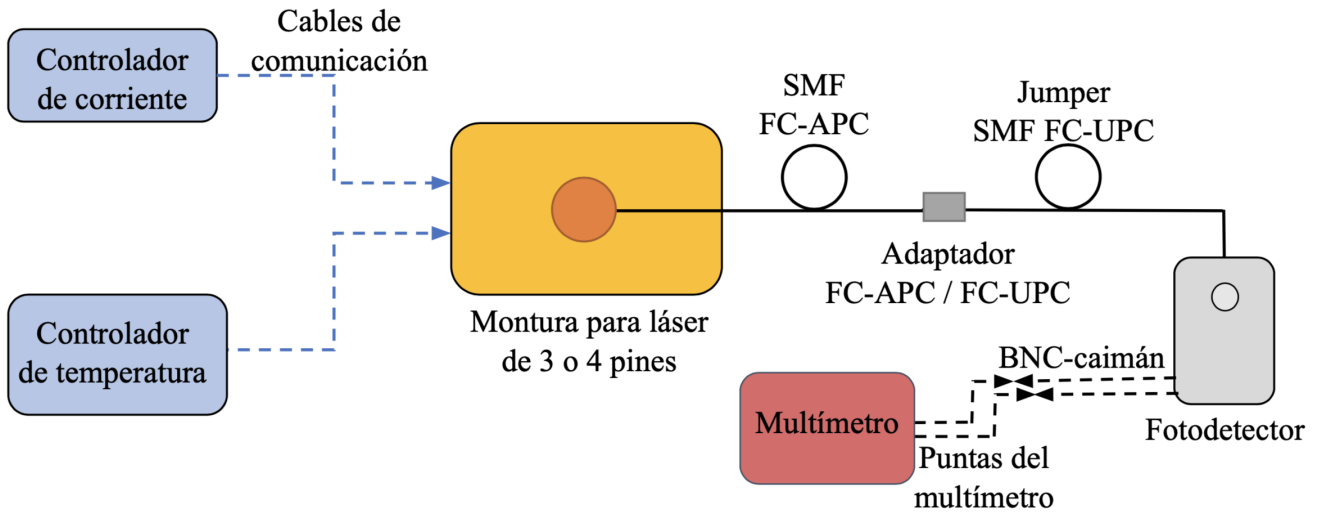


Fig. 8. Diagrama de conexiones para la caracterización de los fotodetectores.

Tabla 10. Medición del voltaje recibido por el fotodetector PDA10CS/PDA100A empleando el diodo láser de 3 o 4 pines.

No. de Medición	Potencia [mW]	Voltaje [V]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

5) Antes de apagar el controlador de corriente, configurarlo al valor mínimo de corriente posible.

VI.2.3 Comparación entre los fotodetectores PDA10CS y PDA100A

- 1) Preparar cada uno de los apuntadores láser (azul, verde, rojo, etc.) para ser utilizados. Es importante verificar la longitud de onda a la que emiten (ver etiqueta) y anotarla en las tablas 11 y 12.
- 2) Dirigir el haz de cada uno de los apuntadores a cada uno de los fotodetectores. Para facilitar este

proceso se puede apoyar de un soporte con sujetador en V. Es importante que la distancia entre el fotodetector y el apuntador láser siempre sea la misma.

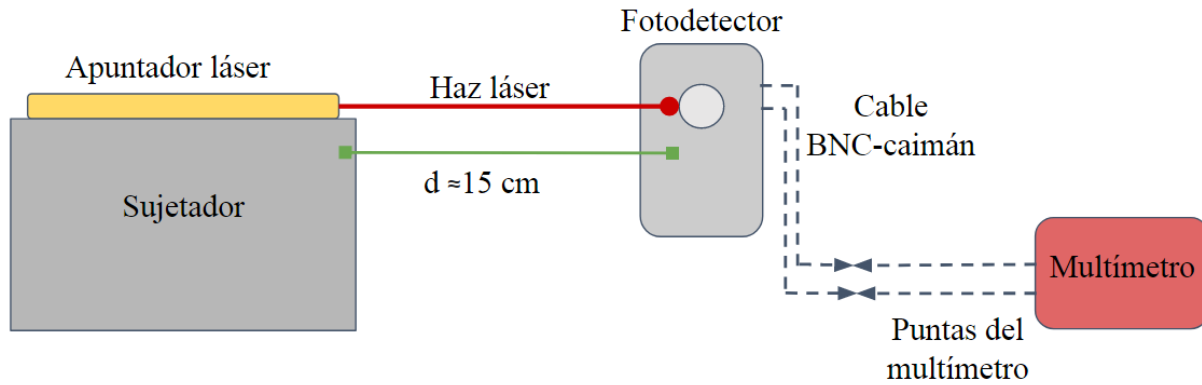


Fig. 9. Diagrama de conexiones para comparar los fotodetectores.

3) Llenar las Tablas 11 y 12.

Tabla 11. Voltaje detectado por el PDA100A a diferentes longitudes de onda (λ).

λ [nm]	Voltaje [V]

Tabla 12. Voltaje detectado por el PDA10CS a diferentes longitudes de onda (λ).

λ [nm]	Voltaje [V]

VII. Resultados

El reporte de la práctica deberá contener los rubros que a continuación se solicitan, asimismo una redacción del análisis de resultados:

1) Potencia óptica vs Corriente.

Graficar la curva de potencia óptica vs corriente para cada uno de los diodos láser utilizados. Obtener la eficiencia de cada láser sacando la pendiente de cada curva.

La gráfica se compone únicamente de los valores a partir de los cuales se comienzan a ver cambios muy significativos en el valor de la potencia (valores en los que se observa un incremento casi lineal).

2) Cálculo de la corriente umbral.

Determinar el valor de la corriente a partir del cual comienza a detectarse una lectura en el medidor de potencia.

3) Potencia óptica vs Voltaje.

Graficar la curva de potencia óptica vs voltaje para cada uno de los diodos láser utilizados.

4) Comparación de los fotodetectores.

Explicar a qué se debe la diferencia entre las mediciones obtenidas con cada fotodetector.

5) Incluir una discusión de resultados.

REFERENCIAS

- [1] Silfvast W. (2004). *Laser fundamentals*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [2] Trager F. (2007). *Springer Handbook of Lasers and Optics*. Kassel: Springer.
- [3] Agrawal G. P. (2010). *Fiber-Optic Communication Systems*, 4th ed., Wiley - Interscience, EUA.
- [4] H. Venghaus and N. Grote (2017). *Fibre optic communication: key devices*. Cham: Springer, New York, USA.

Anexos

A. Fotografías del material y equipo

Fotografías de los dispositivos y equipos empleados en esta práctica.

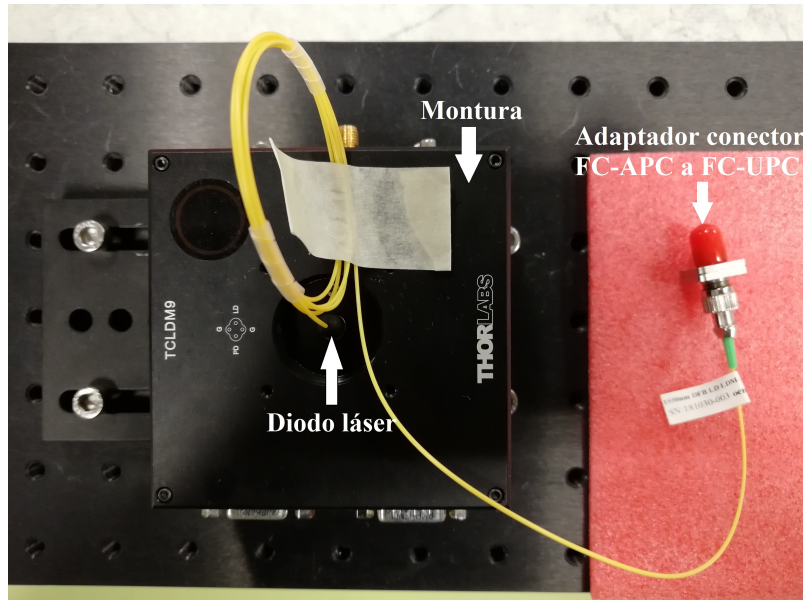


Fig. 10. Diodo láser TO Can con su respectiva montura.

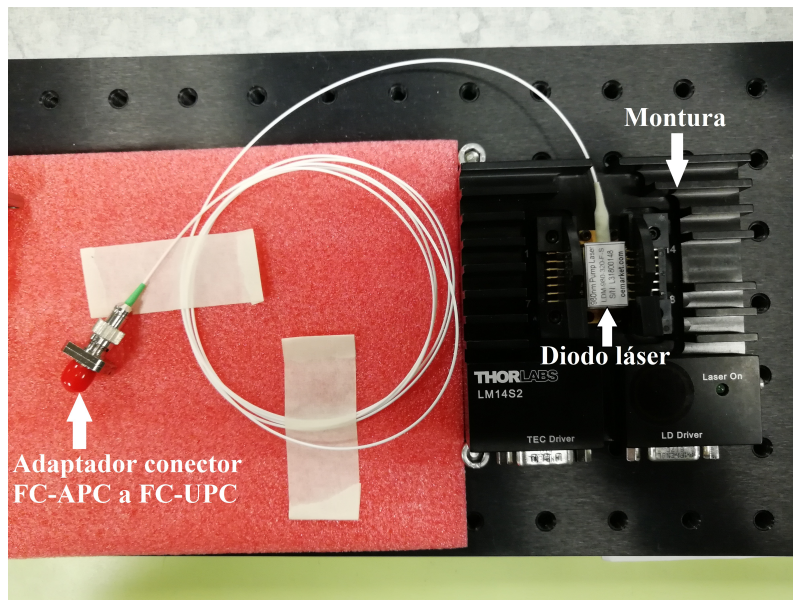


Fig. 11. Diodo láser Butterfly con su respectiva montura.

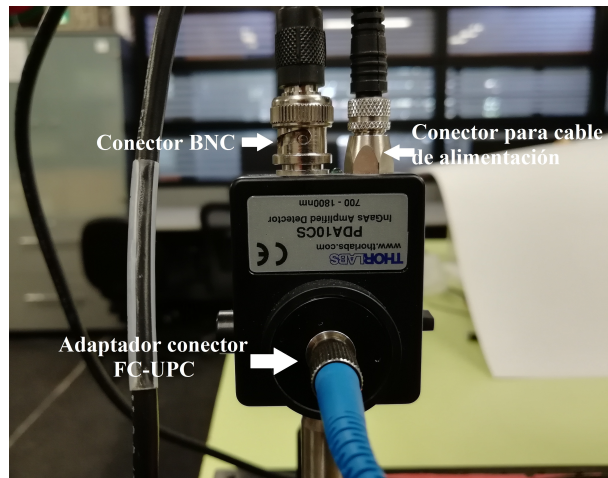


Fig. 12. *Fotodetector.*



Fig. 13. *Controladores de corriente y temperatura.*



Fig. 14. *Medidor de potencia óptica.*



Fig. 15. *Multímetro Digital.*

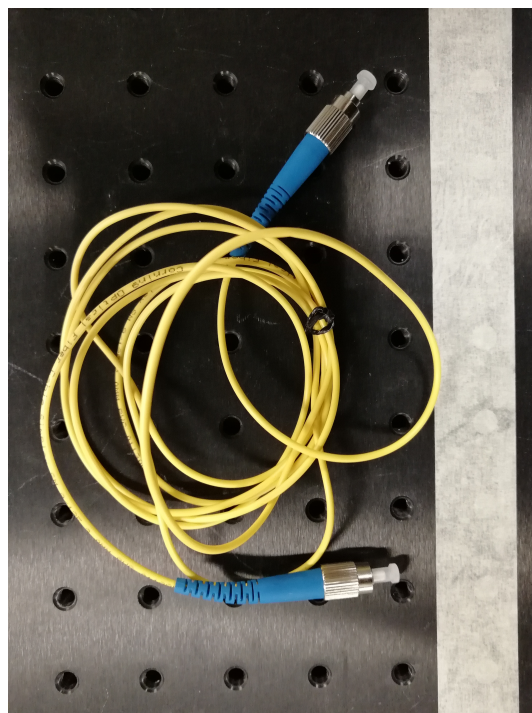


Fig. 16. *Jumper SMF FC-UPC.*



Fig. 17. Apuntadores láser con distinta longitud de onda de emisión.

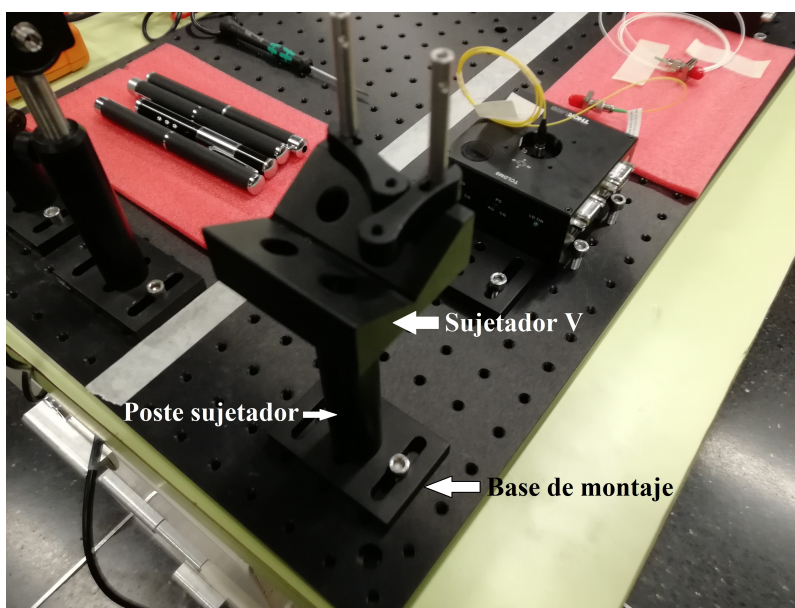


Fig. 18. Poste de soporte con sujetador en V.



Fig. 19. Cable BNC-caimán.



Fig. 20. *Casetera para limpiar conectores de fibra óptica.*



Fig. 21. *Desarmador plano.*

B. Enlaces de información sobre el material y equipo

Enlaces para consultar las hojas de especificaciones y manuales de operación de los dispositivos y equipos empleados en esta práctica.

Para buscar información acerca de los diodos láser ir a la página: <http://www.oemmarket.com>
Modelos: 980nm Pump Laser Diode – Butterfly Package y 10GHz DFB Laser Diode – 1550nm

PDA10CS - InGaAs Switchable Gain Amplified Detector, 900 - 1700 nm.
https://www.thorlabs.com/_sd.cfm?fileName=13058-D02.pdf&partNumber=PDA10CS

PDA100A - Si Switchable Gain Detector, 340 - 1100 nm.
https://www.thorlabs.com/_sd.cfm?fileName=13055-D03.pdf&partNumber=PDA100A

TED200C - Benchtop Temperature Controller.
https://www.thorlabs.com/_sd.cfm?fileName=15986-D02.pdf&partNumber=TED200C

LDC205C - Benchtop LD Current Controller.
https://www.thorlabs.com/_sd.cfm?fileName=15988-D02.pdf&partNumber=LDC205C

TCLDM9 - TE-Cooled Mount for Ø5.6 mm and Ø9 mm Lasers.
https://www.thorlabs.com/_sd.cfm?fileName=1981-d03.pdf&partNumber=TCLDM9

LM14S2 - Universal 14-Pin Butterfly Laser Diode Mount.
https://www.thorlabs.com/_sd.cfm?fileName=10614-D02.pdf&partNumber=LM14S2

6. EVALUACIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS POR LAS Y LOS ALUMNOS

Debido a la contingencia sanitaria, el protocolo presentado en la sección anterior se implementó con ayuda de un grupo de control de 6 estudiantes inscritos en el Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas, perteneciente al octavo semestre de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería, dichos estudiantes trabajaron en brigadas de 2 personas cada una, por lo que solo se revisaron 6 cuestionarios previos y 3 reportes de la práctica.

Gracias al apoyo del Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera y de la Dra. María del Carmen López Bautista, quién imparte el laboratorio de dicha materia, la práctica fue aplicada en el Laboratorio de Telecomunicaciones ubicado en el edificio 18 del Instituto de Ingeniería, cuyos encargados son el Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón y el Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera; cabe destacar que éste último proporcionó el material complementario para desarrollar y concluir de forma satisfactoria el material didáctico presentado en este trabajo.

A continuación se reportan las actividades realizadas por las y los alumnos las cuales están divididas en las siguientes 2 partes:

1. Cuestionario previo.
2. Reporte de la práctica.

CUESTIONARIO PREVIO

Primero se comenzará con la parte del cuestionario previo en la cual se incluyen solamente las preguntas que causaron confusión junto con las respectivas respuestas que se consideran erróneas, es decir, las preguntas en las que no se detectó ninguna dificultad no se presentan en esta sección. La evaluación del cuestionario previo de los estudiantes ayudó a hacer algunas mejoras en las preguntas del cuestionario previo las cuales también son mencionadas.

¿Qué es un láser?

Brigada 1:

“LASER (light amplification by stimulated emission of radiation) es un acrónimo de amplificación de luz por emisión estimulada de radiación”.

Brigada 2:

“LASER es un acrónimo inglés y las letras en la palabra láser representan Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación). Un láser es un dispositivo que emite un haz de luz coherente mediante un proceso de amplificación óptica, el cual está constituido por 3 partes: fuente de bombeo externa, el medio láser activo y la cavidad resonante.”

Brigada 3:

“Es un acrónimo que significa Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.”

Comentarios:

Se puede observar que solamente ponen lo que significa el acrónimo por lo que dicha pregunta se cambió por la siguiente:

¿Qué significa el acrónimo LASER y menciona qué características debe cumplir una fuente de luz para considerarse emisión láser?

¿De qué depende la propiedad de emisión de un material semiconductor?

Brigada 1:

“Depende de la temperatura y de la recombinación de los pares electrón-hueco para emitir fotones cuando estos son excitados.”

Brigada 2:

“Un átomo en estado excitado es inestable regresa al estado fundamental liberando energía espontáneamente. La energía liberada aparece como un fotón de luz, que es un quantum de energía que tiene características de longitud de onda y energía. Se produce cuando un electrón que se encuentra en un estado alto de energía E_2 , cae en un estado inferior E_1 , liberando un fotón con una frecuencia: $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$. La emisión estimulada no solo produce luz coherente y monocromática, sino también amplifica la emisión de luz, ya que por cada fotón que incide sobre un átomo excitado se genera otro fotón, duplicando el número. La emisión estimulada se produce cuando un electrón en un estado excitado es impactado por un fotón, provocando la caída de éste a un estado inferior de energía, liberando un fotón de igual frecuencia y fase que el fotón que impactó al electrón”.

Comentarios:

En la respuesta de la brigada 1 me parece que a grandes rasgos explican el proceso pero, no responden la pregunta. En el caso de la respuesta de la brigada 2 me parece que explican el fenómeno de emisión estimulada. En uno de los reportes se pone la siguiente respuesta: Depende de su espectro de emisión, es decir, de las frecuencias a las cuales emite fotones dependiendo de un nivel energético cuantizado. Respuesta que considero sencilla y correcta.

Explica brevemente cómo funciona un emisor láser y enfatiza la función de cada uno de los componentes de un láser.

Brigada 2:

“Todos los láseres constan de tres componentes:

- *Una fuente externa de bombeo realiza el proceso de llevar los electrones a un nivel de energía excitado mediante la inyección de alguna forma de energía, para llevar a cabo la inversión de población.*
- *El medio láser activo crea un medio de ganancia al realizarse el proceso de emisión estimulada.*
- *El resonador: dos espejos que forman una cavidad óptica en la que la luz está atrapada, viajando de ida y vuelta entre los espejos.”*

Brigada 3:

“Un emisor láser se rige por el fenómeno de emisión estimulada el cual, consiste en forzar por decirlo así, a muchos electrones a liberar su energía acumulada por medio de fotones. Es decir, su estructura es muy similar a la del led; el láser está compuesto de un material tipo p (átomos con exceso de huecos) y un material tipo n (átomos con exceso de electrones) que se recombinan en una zona de unión, en esta zona de unión a los lados hay un interferómetro Fabry Perot, que consiste principalmente en dos

espejos paralelos que se miran fijamente y provocan que a partir del primer fotón liberado por emisión espontánea, al chocar el fotón con los espejos provoca que rebote la energía hacia otros electrones y así sucesivamente.”

Comentarios:

En la respuesta de la brigada 3 explican como funciona el láser aunque no se enfatiza la función de los componentes del mismo, mientras que en la respuesta de la brigada 2 ocurre lo contrario, pues enfatizan la función de los componentes pero no dan una explicación más extensa sobre cómo funciona un láser. En el reporte de la brigada 1 se da la siguiente respuesta:

“Un láser lleva a cabo procesos que amplifican señales de luz (la señal es generada por otro medio). De manera general el proceso que realiza el láser se da por:

- *Emisión estimulada:*
Este proceso se da a partir de una onda incidente dentro de una cavidad resonante Fabry Perot, ésta incide, y parte de ella se transmite, pero debido a los espejos que la componen una parte de la onda se refleja, ésta estimula los demás electrones presentes en los materiales del semiconductor. Además, es un efecto natural relacionado con el equilibrio termodinámico.
- *Realimentación óptica:*
Es el proceso que realizan los espejos debido a la reflexión. Un láser básicamente se compone de tres elementos:
 - *Medio de ganancia: Amplifica la luz por el proceso de emisión estimulada.*
 - *Fuente de bombeo: esta suele ser una fuente óptica (diodo láser) la cual crea una inversión de población en el medio de ganancia.*
 - *Dos espejos: estos conforman la cavidad resonante u óptica en la que se incide la luz y se estará reflejando.”*

Respuesta que considero completa.

Menciona las clasificaciones de un láser según el tipo de medio de ganancia.

Brigada 1:

- *“Láser CW (onda continua), presentan un flujo de energía constante y potencia de salida prácticamente es constante con el tiempo.*
- *Láser pulsado, en este caso la potencia de salida cambia con el tiempo para producir un pulso óptico además se presentan patrones de repetición. Las duraciones de los pulsos son del dominio de entre nanosegundos y femtosegundos.*
- *Láseres bloqueadores en modo (mode-locked), emiten pulsos con duraciones de picosegundos o femtosegundos. Suelen utilizar láseres de cavidad.*
- *Los láseres semiconductores con conmutación de ganancia (gain-switched semiconductor lasers), emiten pulsos con duración de nanosegundos o picosegundos con energía relativamente pequeña.”*

Comentarios:

En el marco teórico se mencionan los medios de ganancia que pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, esta respuesta es una respuesta general, pues en dos reportes se mencionan otros tipos de medios de ganancia aunque entran en alguna de las clasificaciones referidas anteriormente.

¿Qué es un fotodetector y cómo funciona?

Brigada 1:

“Es el elemento de entrada de un receptor óptico, se encarga de convertir luz en corriente eléctrica por medio del efecto fotoeléctrico.”

Brigada 2:

“El detector óptico se encarga de convertir la señal óptica en eléctrica y por tanto actúa como un transductor óptico-eléctrico. Estos dispositivos absorben los fotones (luz) procedentes de la fibra óptica y generan una corriente eléctrica sobre un circuito exterior.”

Brigada 3:

“Dispositivo que reacciona a cualquier tipo de radiación (luz visible, infrarrojo, ultravioleta) y la convierte a señales eléctricas. Su funcionamiento se puede basar en algo tan simple como el diagrama de bloques mostrado a continuación, en este caso el fototransistor cumple el rol principal de tener en su estructura un material que reacciona a la radiación que emite el led.”

Comentarios:

En la respuesta de la brigada 3 sólo se menciona el diagrama pero no se explica. En el caso de las respuestas de las brigadas 1 y 2 aunque son cortas desde mi punto de vista son correctas, sin embargo, en la práctica se explica de manera breve y clara el funcionamiento del fotodetector, información que pudieron emplear las y los alumnos para responder la pregunta.

¿De qué depende la propiedad de absorción de un material semiconductor?

Brigada 2:

“El sistema atómico contiene cantidades de energía discretas. Si contiene la más baja energía disponible, nivel E_1 , se dice que está en estado fundamental y no libera energía. Si el átomo absorbe energía adicional (p.ej. un fotón), pasa a un estado excitado, nivel E_2 , o superexcitado, nivel E_3 , saltando un electrón a un estado metaestable o inestable respectivamente. Los átomos permanecen corto tiempo en niveles inestables, y cuando caen a niveles de más baja energía, liberan el exceso de energía que contienen. Por lo que la propiedad de absorción dependerá del medio material del foto detector.”

Brigada 3:

“De su espectro de absorción o el rango de frecuencias que el semiconductor absorbe.”

Comentarios:

En la práctica se dice claramente que las propiedades de absorción del material semiconductor están dadas por las bandas de conducción y valencia en la estructura del material, eso es lo que define el espectro de absorción del material semiconductor.

De manera general en el marco teórico se les da una idea sobre qué contestar en la mayoría de las preguntas del trabajo previo, además, considero que la mayoría de las preguntas están redactadas de manera clara. El problema de la mayoría de los alumnos es que no leyeron con atención el marco teórico.

REPORTE DE LA PRÁCTICA

En esta sección se realiza el análisis del reporte entregado por las y los estudiantes. Solo se revisaron 3 reportes ya que se trabajó en brigadas de 2 integrantes y debido a la contingencia no se pudo continuar con la aplicación de la práctica a otros grupos del Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas.

En el protocolo de la práctica se indicaron los rubros que el reporte debía de contener, mismo que se discuten a continuación.

1) Potencia óptica vs Corriente.

Graficar la curva de potencia óptica vs corriente para cada uno de los diodos láser utilizados. Obtener la eficiencia de cada láser sacando la pendiente de cada curva.

Reporte 1:

“Se pudo observar que los datos fueron graficados de manera correcta, en este caso los alumnos utilizaron una línea de tendencia a partir de la cual obtuvieron la eficiencia de cada láser mediante la obtención de la pendiente. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Eficiencia del diodo Butterfly: 0.146

Eficiencia del diodo de 4 pines: 0.0758”

Reporte 2:

“En este caso igualmente se constató que los datos fueron graficados de manera correcta. Los alumnos obtuvieron la pendiente de una parte de la gráfica, pues no hay ninguna línea de tendencia. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Eficiencia del diodo Butterfly: 0.1456

Eficiencia del diodo de 4 pines: 0.08489”

Reporte 3:

“Los datos se graficaron de manera correcta e igual se hizo uso de una línea de tendencia para sacarle la pendiente y de esta manera sacar la eficiencia de cada diodo láser. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Eficiencia del diodo Butterfly: 0.1454

Eficiencia del diodo de 4 pines: 0.0756”

Comentarios:

Como se puede observar, los resultados obtenidos por los 3 equipos son muy similares y realizaron sus gráficas correctamente por lo que entendieron lo que tenían que hacer.

2) Cálculo de la corriente umbral.

Determinar el valor de la corriente a partir del cual comienza a haber lectura en el medidor de potencia.

Reporte 1.

“El valor de corriente umbral fue similar para ambos diodos, teniendo que para el diodo Butterfly fue de 3.03 mA, mientras que para el diodo de 3 o 4 pines fue de 3.09 mA.”

Reporte 2.

“Basado en los resultados obtenidos en la variación de corriente, para ambos diodos láser, tenemos:

Butterfly : $I_{th} = 3,03[mA]$

3 o 4 pines : $I_{th} = 3,09[mA]$ ”

Reporte 3.

No pusieron nada.

Comentarios:

Debido a que en el protocolo se puso una tabla con varias filas los estudiantes se confundieron por lo que anotaron varios valores e hicieron un promedio de todos ellos lo que llevó a resultados incorrectos.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

I_{th} Butterfly = 3.49 [mA]

I_{th} Diodo de 4 pines = 2.438 [mA]

Para solucionar esto se arreglo la tabla y se redactaron las instrucciones de forma más clara.

3) Potencia óptica vs Voltaje.

Graficar la curva de potencia óptica vs voltaje para cada uno de los diodos láser utilizados.

Reporte 1.

Los datos fueron graficados de manera correcta, las unidades utilizadas fueron [mW] y [V].

Reporte 2.

Los datos fueron graficados de manera correcta pero, los ejes fueron colocados al revés. Las unidades utilizadas fueron [mW] y [V].

Reporte 3.

Los datos se graficaron correctamente aunque los ejes fueron colocados al revés. Las unidades utilizadas fueron [mW] y [V].

Comentarios:

Aunque se equivocaron en los ejes de las gráficas no veo mucho problema en eso ya que igualmente se puede observar el comportamiento de los datos obtenidos. Para evitar que se inviertan los ejes se especificó cuál es la variables dependiente y cuál es la independiente.

4) Comparación de los fotodetectores.

Explicar a qué se debe la diferencia entre las mediciones obtenidas con cada fotodetector.

Reporte 1.

En este caso los alumnos explican que se debe al rango de operación de cada fotodetector lo cual se puede verificar en la curva de responsividad. Mencionan que algo que influye en las mediciones obtenidas es la potencia del transmisor, pues los láseres pueden ser de distintas clases aunque esto no

es del todo cierto ya que aunque un láser tenga mucha potencia si el fotodetector no detecta la longitud de onda a la que emite no se obtendrá ningún dato.

Reporte 2.

Los integrantes de la brigada indicaron que la diferencia se debe a la curva de responsividad de cada fotodetector, pues dependiendo del rango de operación se obtendrán valores mayores o menores de voltaje, esto dependiendo de la longitud de onda del láser.

Reporte 3.

Los integrantes de la brigada argumentaron que se debe a que los fotodetectores trabajan a diferente longitud de onda, por lo que al detectar la luz no absorben la misma cantidad como para realizar la misma interpretación.

Comentarios:

En general los estudiantes comprendieron que es de suma importancia conocer la curva de responsividad de los fotodetectores para conocer las regiones del espectro en las que son susceptibles a absorber los fotones provenientes de cierta fuente de luz.

Discusión de resultados

Reporte 1:

“Cada uno de los diodos transmisores utilizados para la práctica presenta sus propias características. Aún cuando sus valores de corriente umbral fueron casi idénticos (alrededor de 3 mA), su rango de operación es distinto, siendo más limitado el del diodo de 3 o 4 pines, que puede utilizar hasta 35 mA. En los 32 mA (siendo este el último valor tomado), el diodo de 3 o 4 pines generó una potencia de 2 mW, mientras que en los 33.08 mA, el diodo Butterfly solo generó 1.12 μ W; sin embargo, el diodo Butterfly generó hasta 20.5 mW en los 153.2 mA, por lo que este diodo puede generar una potencia mayor al poder recibir una corriente mayor.

El diodo Butterfly opera en su región de conducción en una gran parte de su rango de operación, pues a partir de los 83 mA, el voltaje producido por este diodo se mantuvo muy similar: alrededor de los 5.4 V. Por otra parte, el diodo de 3 o 4 pines no alcanzó su valor umbral de voltaje en su rango de operaciones, pues el voltaje que produjo varió en cada valor de corriente. Finalmente, cada fotoreceptor trabajó según su responsividad, pues solo se produjo un valor de voltaje razonable en el fotodetector que operaba en las longitudes de onda de los haces usados (el fotoreceptor PDA100A).”

Comentarios:

Destacan las diferencias de los dispositivos utilizados. En primera instancia mencionan las diferencias entre los 2 tipos de láseres utilizados, argumentando que la corriente umbral es muy parecida en ambos, pero el rango de operación es muy diferente debido precisamente a la gran diferencia en la corriente que es posible suministrar a cada uno, en el caso del diodo butterfly el límite se fijó en 200 mA mientras que para el diodo de 4 pines se fijó en 35 mA. Otra diferencia importante se nota en la potencia generada por cada uno de los diodos. Por otra parte, se menciona la importancia del rango de operación de cada uno de los fotodetectores, pues solo si se utiliza el correcto se obtienen valores razonables de voltaje.

Reporte 2:

Comentarios:

No cuenta con discusión de resultados. En el protocolo se hizo énfasis en que las y los alumnos deberán incluir su discusión de los resultados obtenidos.

Reporte 3:

“Se puede observar que tanto el láser Butterfly como el de 3 o 4 pines tienen diferentes características. En particular, el láser Butterfly tiene un umbral de potencia mayor que el de 3 o 4 pines, sin embargo, el láser butterfly tiene mayor potencia y por tanto una mejor eficiencia. Para el láser Butterfly se registró una eficiencia de 0.1454, según los datos graficados, mientras que para el láser de 3 o 4 pines se tiene una eficiencia de 0.076. Podemos observar que en ambos casos se tiene una eficiencia pequeña, esto puede ser debido a una mala medición, recordemos que en algunos casos no era fijo el valor mostrado por el medidor de potencia y se daba el valor que el alumno observaba...

...Como resultado de los gráficas de voltaje y potencia óptica se puede obtener la corriente de umbral de cada uno de los láseres, para el caso del láser Butterfly, se obtuvo una corriente de $I_{th} = 0,3405$ [mA] la cual se encuentra dentro del rango de corrientes de operación de este tipo de láseres a 980 [nm], mientras que para el láser de 3 o 4 pines se tiene una corriente de $I_{th} = 1,46$ [mA] de la misma forma similar a la de operación esperada.

En cuanto a los fotodetectores se tiene que cada uno tiene características diferentes por el rango de longitud de onda en el que operan...

...Por último, los apuntadores láser tienen diferentes características y de acuerdo con éstas es la clase que son. Con el fin de comparar el por qué son diferentes los fotodetectores, se utilizaron los apuntadores láser, que dependiendo del color emitido se tiene una cierta longitud de onda emitida, con ésta y el rango de trabajo de cada uno de los fotodetectores, podemos observar en los resultados que los valores entre voltajes es totalmente diferente, ésto se debe primero al color del láser y otro por el rango de trabajo de los fotodetectores...”

Comentarios:

Mencionan que el umbral de potencia es mayor en el diodo láser butterfly, el diodo butterfly tiene mayor potencia y por tanto una mejor eficiencia. El valor de eficiencia obtenido para ambos láseres fue pequeño y los alumnos lo adjudican a errores de medición, malos manejos del equipo, suciedad de los conectores e incluso la inexperiencia del alumno, esto en realidad es poco probable ya que se estuvo verificando que el equipo se manejara de manera correcta y de hecho se esperaba que dicho valor fuera bajo ya que precisamente la eficiencia de los diodos láser en general es baja.

En el caso de las gráficas de potencia óptica vs voltaje pudieron notar que en el caso del diodo de 4 pines se obtiene una relación casi lineal entre la potencia y el voltaje mientras que en el caso del diodo butterfly se observa que inicialmente el voltaje aumenta mucho, pero la potencia poco, sin embargo, en un punto la potencia aumenta mucho con aumentos pequeños del voltaje.

Para el caso de los fotodetectores mencionan que operan a distintos rangos de longitud de onda y que dependiendo de ésto se pueden medir ciertas longitudes de onda de emisores láser, lo cual comprobaron con los apuntadores láser.

Para finalizar mencionan la importancia de la clasificación por clases de los apuntadores láser, destacando que el verde es de tipo III y que se obtuvieron valores de voltaje muy altos comparados con los otros colores utilizados.

7. EVALUACIÓN DEL PROTOCOLO POR PARTE DE LAS Y LOS ALUMNOS

La evaluación del manual de la práctica de transmisores y receptores ópticos, fue realizada por las y los estudiantes del grupo de control. El objetivo de la evaluación es identificar los aspectos positivos y negativos de toda la práctica en conjunto. El análisis de la evaluación se presentan a continuación.

Al término de la práctica se realizó una encuesta sobre el material didáctico y el equipo asignado para la realización de la práctica basada en la escala de Likert [6]. La escala Likert es una escala de calificación con la que se busca cuestionar a una persona sobre su nivel de acuerdo o desacuerdo con una declaración, esta escala tiene un amplio uso a nivel mundial ya que es muy simple, eficaz, sencilla de comprender y rápida de contestar en contraste con otras que requieren de un proceso un tanto más riguroso como la escala de Thurstone o la escala de Guttman por mencionar algunas. La razón por la cual se utilizó esta escala es porque ya se había aplicado en el material didáctico desarrollado por la Ing. Ana Verónica Muñoz Vilchis, quien desarrolló la Práctica de Activación de servicios de Gigabit Ethernet [5] por lo que para darle una continuidad a los materiales didácticos que se desarrollen para el Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones ópticas se consideró necesaria la aplicación de los mismos criterios. Para el presente caso se utilizó una escala de 5 niveles, la cual se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Escala de evaluación utilizada en las encuestas.

1	2	3	4	5
Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo

A partir de los puntajes obtenidos se prosiguió a sacar la puntuación media por pregunta y por alumno y se fijo un umbral en el valor 3 (valor neutro), si la puntuación media es mayor a 3 se identificará una actitud positiva, en caso contrario una actitud negativa.

El cuestionario de evaluación está conformado por 16 preguntas para poder evaluar el grado de satisfacción de cada uno de los alumnos. Con la finalidad de agrupar las preguntas respecto a su objetivo particular, se dividieron en las siguientes categorías:

- **Aprendizaje:** Se medirá el criterio que tienen los alumnos sobre el grado de beneficios que tiene la práctica para la respectiva materia y para su vida profesional.
- **Manual:** Se medirá el criterio de los alumnos con respecto a la calidad del manual de la práctica (instrucciones, diagramas, redacción, etc.).
- **Objetivo:** Se medirá el criterio de los alumnos con respecto a la comprensión de los objetivos de la práctica (se entienden o no).
- **Conocimiento previo:** Se medirá el criterio de los alumnos con respecto al marco teórico, pues en éste se da información precisamente para tener el conocimiento previo necesario para entender la práctica.
- **Equipo:** Se valorará el criterio de los alumnos con respecto al equipo utilizado en la práctica, verificando que todo haya funcionado correctamente y que las recomendaciones y recursos dados antes de la práctica hayan ayudado a que el equipo se manejará con más facilidad.

- Instructor: Se medirá el criterio de los alumnos con respecto a la participación del instructor y si éste influye en la realización de los experimentos de la práctica.

A continuación se muestra la clasificación de las preguntas del cuestionario de evaluación de acuerdo a las categorías antes mencionadas:

Tabla 14. *Clasificación por categoría de las preguntas del cuestionario de evaluación.*

<p>Aprendizaje</p> <p>P5. ¿Los fenómenos físicos estudiados en la práctica complementan la clase de teoría? P7. ¿Las actividades realizadas en la práctica agilizaron tu comprensión de los conceptos teóricos de las mismas? P11. ¿Las actividades solicitadas para el reporte de la práctica contribuyen a la reafirmación de los conocimientos aprendidos? P12. ¿Los conocimientos adquiridos con la realización de esta práctica contribuyen a la vida profesional del alumno?</p>
<p>Manual</p> <p>P4. ¿Las referencias del protocolo sirvieron de apoyo para la realización de la práctica? P8. ¿La redacción del manual de la práctica es adecuada? P9. ¿Las imágenes contenidas en el manual son útiles y explican de forma simple el fenómeno físico a estudiar? P10. ¿Las instrucciones y el procedimiento de la práctica son lo bastante claros para llevarse a cabo?</p>
<p>Objetivo</p> <p>P1. ¿Los objetivos de la práctica son comprensibles y alcanzables? P2. ¿Se cumplieron los objetivos de la práctica?</p>
<p>Conocimiento previo</p> <p>P3. ¿Es necesario un conocimiento previo para poder realizar la práctica? P6. ¿Cómo calificas la teoría contenida en el manual, es suficiente para comprender el funcionamiento de los transmisores y receptores ópticos? P16. ¿El material audiovisual proporcionado antes de la realización de la práctica contribuyó a disminuir las dudas en el laboratorio?</p>
<p>Equipo</p> <p>P13. ¿Los dispositivos y equipos empleados en la práctica son fáciles de manipular? P14. ¿Los dispositivos y equipos empleados funcionaron correctamente?</p>
<p>Instructor</p> <p>P15. ¿El apoyo por parte del instructor para realizar la práctica fue la esperada?</p>

8. ANÁLISIS DE LA EVALUACIÓN DEL PROTOCOLO

La evaluación del protocolo de la Práctica de Transmisores y Receptores Ópticos se llevo a cabo mediante dos análisis, en el primero de ellos se analiza la opinión del grupo de control por cada una de las preguntas de la encuesta aplicada, es decir, se obtuvo la puntuación media de cada una de las preguntas a partir de todas las puntuaciones obtenidas por parte de los alumnos. En el segundo se analiza la opinión general de cada uno de los estudiantes con respecto al material desarrollado, para lo cual se calculó la media de la puntuación total de cada una de las encuestas para así obtener una calificación representativa de todo el material didáctico desarrollado para esta práctica. Enseguida se presentan los datos obtenidos, primeramente nos centramos en el primer análisis que se enfoca al impacto por pregunta, los datos se concentran en la Tabla 15.

Tabla 15. Puntaje promedio de cada una de las preguntas del cuestionario de evaluación del protocolo.

Pregunta	Puntaje promedio obtenido
1	5.00
2	5.00
3	4.33
4	5.00
5	4.83
6	4.83
7	5.00
8	5.00
9	4.83
10	4.66
11	5.00
12	5.00
13	4.83
14	4.83
15	4.83
16	5.00

A continuación se presenta la gráfica de los datos mostrados en la tabla 15:

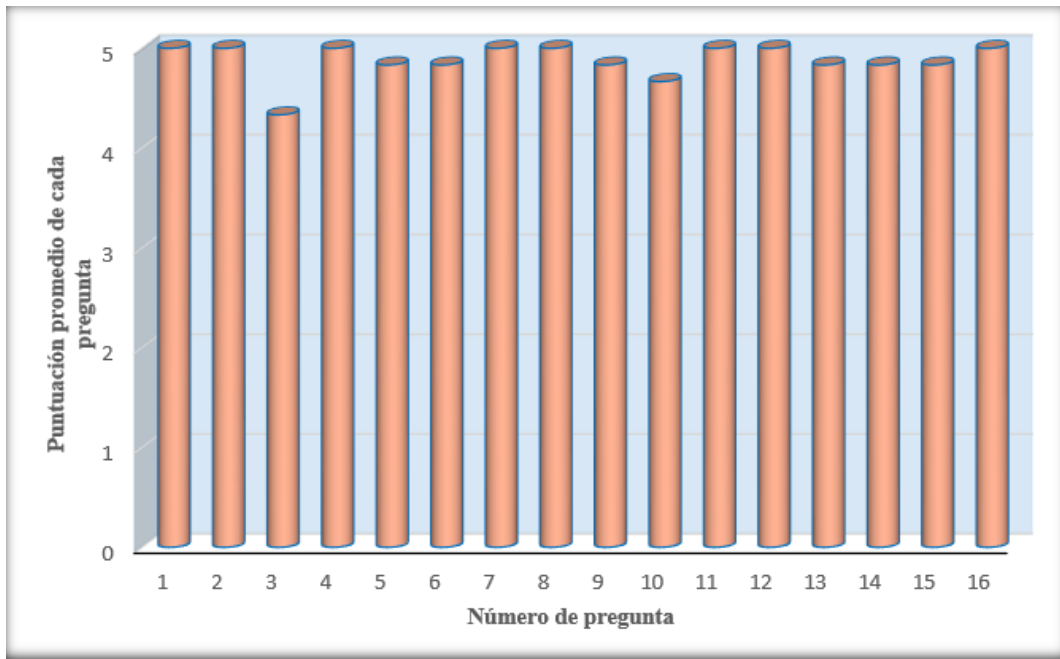


Fig. 22. Puntaje promedio de cada una de las preguntas.

Ahora se pasa a obtener la media de todas las preguntas del protocolo de evaluación para poder ver el puntaje en general que tiene el protocolo para cada uno de los alumnos, los datos se concentran en la Tabla 16.

Tabla 16. Puntaje promedio de todas las preguntas del cuestionario de evaluación del protocolo.

Alumno	Puntaje promedio de todas las preguntas del cuestionario de evaluación
1	4.875
2	4.875
3	4.938
4	4.875
5	4.875
6	4.813

A continuación se muestra la respectiva gráfica de la tabla 16:

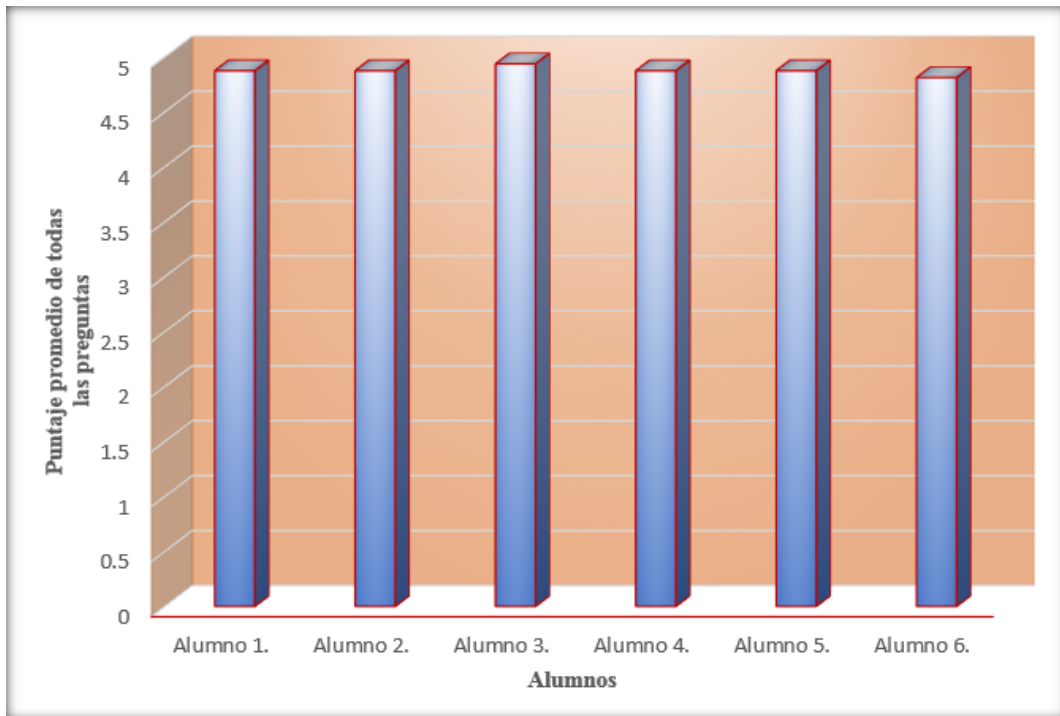


Fig. 23. Puntaje promedio de todas las preguntas según cada alumno.

Se prosigue a hacer un análisis de los datos obtenidos para cada una de las preguntas. Para fines de la evaluación el umbral para determinar si se obtiene una actitud positiva o negativa se fijará en 3 (punto neutro), de tal modo que si la puntuación es mayor a 3 consideraremos que se obtuvo una actitud positiva, en caso contrario, se considera que se obtuvo una actitud negativa por parte de los alumnos.

P1: ¿Los objetivos de la práctica son comprensibles y alcanzables?

Tabla 17. Puntuaciones de la pregunta P1.

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
5	5	5

Resultado: actitud positiva.

P2: ¿Se cumplieron los objetivos de la práctica?

Tabla 18. Puntuaciones de la pregunta P2.

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
5	5	5

Resultado: actitud positiva.

P3: ¿Es necesario un conocimiento previo para poder realizar la práctica?

Tabla 19. *Puntuaciones de la pregunta P3.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
4.33	5	4

Resultado: actitud positiva.

P4: ¿Las referencias del protocolo sirvieron de apoyo para la realización de la práctica?

Tabla 20. *Puntuaciones de la pregunta P4.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
5	5	5

Resultado: actitud positiva.

P5: ¿Los fenómenos físicos estudiados en la práctica complementan la clase de teoría?

Tabla 21. *Puntuaciones de la pregunta P5.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
4.83	5	4

Resultado: actitud positiva.

P6: ¿Cómo calificas la teoría contenida en el manual, es suficiente para comprender el funcionamiento de los transmisores y receptores ópticos?

Tabla 22. *Puntuaciones de la pregunta P6.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
4.83	5	4

Resultado: actitud positiva.

P7: ¿Las actividades realizadas en la práctica agilizaron tu comprensión de los conceptos teóricos de las mismas?

Tabla 23. *Puntuaciones de la pregunta P7.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
5	5	5

Resultado: actitud positiva.

P8: ¿La redacción del manual de la práctica es adecuado

Tabla 24. *Puntuaciones de la pregunta P8.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
5	5	5

Resultado: actitud positiva.

P9: ¿Las imágenes contenidas en el manual son útiles y explican de forma simple el fenómeno físico a estudiar?

Tabla 25. *Puntuaciones de la pregunta P9.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
4.83	5	4

Resultado: actitud positiva.

P10: ¿Las instrucciones y el procedimiento de la práctica son lo bastante claros para llevarse a cabo?

Tabla 26. *Puntuaciones de la pregunta P10.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
4.66	5	4

Resultado: actitud positiva.

P11: ¿Las actividades solicitadas para el reporte de la práctica contribuyen a la reafirmación de los conocimientos aprendidos?

Tabla 27. *Puntuaciones de la pregunta P11.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
5	5	5

Resultado: actitud positiva.

P12: ¿Los conocimientos adquiridos con la realización de esta práctica contribuyen a la vida profesional del alumno?

Tabla 28. *Puntuaciones de la pregunta P12.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
5	5	5

Resultado: actitud positiva.

P13: ¿Los dispositivos y equipos empleados en la práctica son fáciles de manipular?

Tabla 29. *Puntuaciones de la pregunta P13.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
4.83	5	4

Resultado: actitud positiva.

P14: ¿Los dispositivos y equipos empleados funcionaron correctamente?

Tabla 30. *Puntuaciones de la pregunta P14.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
4.83	5	4

Resultado: actitud positiva.

P15: ¿El apoyo por parte del instructor para realizar la práctica fue la esperada?

Tabla 31. *Puntuaciones de la pregunta P15.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
4.83	5	4

Resultado: actitud positiva.

P16: ¿El material audiovisual proporcionado antes de la realización de la práctica contribuyó a disminuir las dudas en el laboratorio?

Tabla 32. *Puntuaciones de la pregunta P16.*

Puntuación media	Puntuación máxima	Puntuación mínima
5	5	5

Resultado: actitud positiva.

En la Tabla 33 se concentran todos los datos obtenidos en las encuestas junto con su media de Likert, necesaria para el análisis de los mismos.

Tabla 33. Resultados con la escala Likert.

Preguntas/Alumnos	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Total	Media de Likert
1	5	5	5	5	5	5	30	5.00
2	5	5	5	5	5	5	30	5.00
3	5	4	5	4	4	4	26	4.33
4	5	5	5	5	5	5	30	5.00
5	5	5	5	5	4	5	29	4.83
6	5	5	5	5	5	4	29	4.83
7	5	5	5	5	5	5	30	5.00
8	5	5	5	5	5	5	30	5.00
9	5	4	5	5	5	5	29	4.83
10	5	5	4	4	5	5	28	4.67
11	5	5	5	5	5	5	30	5.00
12	5	5	5	5	5	5	30	5.00
13	4	5	5	5	5	5	29	4.83
14	4	5	5	5	5	5	29	4.83
15	5	5	5	5	5	4	29	4.83
16	5	5	5	5	5	5	30	5.00
Total	78	78	79	78	78	77		
Media de Likert	4.875	4.875	4.938	4.875	4.875	4.813		

Para finalizar se anexan los comentarios y/o sugerencias escritas por la comunidad estudiantil que realizó la práctica ya que éstas igualmente son una herramienta para evaluarla.

- En la práctica se encuentran actividades de desarrollo que contribuyeron a entender conceptos previamente vistos en teoría, además el manejo del instrumental es de ayuda para familiarizarse con el manejo de equipo óptico.
- Las preguntas del cuestionario previo, en específico h) y c) necesitan ser más claras.
- La práctica fue de mi agrado porque complementa los conocimientos que he adquirido en la materia de dispositivos ópticos y sistemas de comunicaciones ópticas, y ésta me proporciona las aplicaciones de la fibra óptica y las formas para realizar mediciones.
- Incluir láseres de más colores y otros tipos de detectores puede darle más diversidad y diversión a la práctica.
- El apoyo audiovisual de esta práctica ayuda mucho pues en ocasiones se llega a la práctica solo leyendo el manual y el tener el apoyo visual de qué se debe de realizar aporta mucho más.

La práctica es interesante pues se utilizan diversos dispositivos que se mencionan que en campo son importantes saber usar.

- Tener siempre en cuenta la corriente máxima de cada diodo antes de cada experimento. La práctica es muy útil para conocer transmisores ópticos reales, también para ver las medidas que se pueden obtener. El video ayudó a visualizar antes el material que se iba a usar y los procedimientos a seguir.

9. RECOMENDACIONES

Debido a que el Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas no cuenta con todo el material necesario para la realización de la Práctica de Transmisores y Receptores Ópticos, en el presente apartado se incluye una lista del material faltante con un costo total de \$5500.00 dls aproximadamente. Resulta altamente recomendable que dicho material sea adquirido por el Departamento de Telecomunicaciones para que la práctica se pueda implementar en el mismo Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas y no en el Laboratorio de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería, evitando así complicaciones.

- 980nm Pump Laser Diode – Butterfly Package
http://www.oemarket.com/catalog/product_info.php/980nm-pump-laser-diode-butterfly-package-p-189
- 10GHz DFB Laser Diode – 1550nm
http://www.oemarket.com/catalog/advanced_search_result.php?keywords=1550nm+laser+diode
- Mounting Base, 2" x 3" x 3/8" (50mm x 75mm x 10mm). Buscar en Thorlabs como BA2.
- Ø1/2" Optical Post, SS, 8-32 Setscrew, 1/4"-20 Tap, L = 3". Buscar en Thorlabs como TR3.
- Aluminum Breadboard, 600 mm x 1200 mm x 12.7 mm M6 Taps. Buscar en Thorlabs como MB60120/M. Roscado: todos los tableros de pruebas cuentan con roscas de 1/4 "- 20 (M6) en centros de 1" (25 mm).
- Tornillos para el tablero de pruebas de 1 pulgada con desarmador.
- Post Holder with Spring-Loaded Hex Locking Thumscrew, L=3" (75 mm). Buscar en Thorlabs como PH3.
- Limpiador de conectores de fibra óptica ReelClean500.
- Jumper de fibra óptica FC/UPC-FC/UPC
- Adaptador FC/APC a FC/UPC
- Cinta adhesiva.
- Large V-Clamp with PM4/M Clamping Arm, 63.5 mm Long, Metric. Buscar en Thorlabs como VC3C/M.
- Apuntadores láser de distintas longitudes de onda.
- Desarmador plano pequeño.

10. CONCLUSIONES

En la actualidad las redes de fibra óptica han tomado gran relevancia debido a las múltiples ventajas que tienen en contraste con otras redes no ópticas, las cuales tienen ciertas limitantes que no permiten satisfacer las necesidades en constante crecimiento de mayores capacidades de transmisión. Las redes de fibra óptica tienen capacidades de transmisión muy elevadas así como distancias de transmisión muy grandes, estos dos factores han hecho que este tipo de redes sean hoy de las más utilizadas en la industria. Es por ello, que el alumnado de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones necesita tener el material y equipo especializado que les permitan evaluar y mejorar las condiciones actuales de una red de comunicación óptica basada en fibra óptica, desde sus transmisores y receptores ópticos hasta la propia fibra óptica.

El objetivo general fue actualizar el manual de prácticas del Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas precisamente incluyendo una práctica que se centre en la caracterización de equipos transmisores y receptores ópticos, pues hasta ahora no hay una práctica en la que se le de la importancia debida a este tipo de dispositivos que al igual que la fibra óptica, son muy importantes en las comunicaciones ópticas. De todo el trabajo realizado se puede concluir lo siguiente:

1. Se diseñó e implementó un protocolo para la práctica “Transmisores y Receptores Ópticos” en la que se caracterizan equipos transmisores y receptores ópticos a la vez que se familiariza a las y los alumnos con el correcto manejo de los mismos. Aunado a lo anterior se creó material audiovisual como forma de apoyo tanto para los estudiantes como para las y los profesores que imparten el laboratorio.
2. Se realizaron pruebas al protocolo con ayuda de un grupo de control inscrito al Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas para que mediante la evaluación de los mismos estudiantes se pudiera identificar si éste es funcional y si se cumplen con los objetivos buscados. A partir de la evaluación por parte de los estudiantes hacia la práctica igualmente se pudieron identificar los puntos débiles del manual para realizar las mejoras necesarias. De manera general se cumplieron todos los objetivos previstos en el protocolo. Los alumnos supieron manejar de forma correcta los equipos siguiendo todas las recomendaciones dadas tanto en el manual como en el material audiovisual por lo que los experimentos también fueron llevados a cabo de manera satisfactoria. El correcto entendimiento de lo que se realizó en la práctica se vio reflejado en los reportes entregados posteriormente, los cuales fueron evaluados precisamente para identificar problemas y realizar modificaciones al protocolo.
3. Se aplicó una encuesta basada en la escala de Likert para poder analizar de forma cuantitativa los indicadores de actitud que tiene la comunidad estudiantil hacia la práctica para lo cual fue necesario fijar el valor umbral en el valor 3 (punto neutro) para tener un punto de referencia. Si la puntuación media obtenida era mayor a 3 se identificaba una actitud positiva, en caso contrario se identificaba una actitud negativa. Todas las cuestiones planteadas en la encuesta de evaluación tuvieron puntuación media elevada, por lo que se identificó que la actitud de los estudiantes hacia la práctica es muy buena lo cual se esperaba, pues a la hora de realizar la práctica se pudo notar que les llamó mucho la atención y que fue sencillo para ellos llevarla a cabo. En la encuesta aplicada también se incluyó un apartado para comentarios y/o sugerencias, lo cual en primera instancia ayudó

a identificar que el material audiovisual fue de muchísima utilidad y en segunda instancia fue de gran ayuda para mejorar el protocolo.

4. Se realizó una lista con material faltante necesario para la realización de la práctica de "Transmisores y Receptores Ópticos" con el fin de que la misma se pueda llevar a cabo en el Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones ópticas, pues debido a que no se cuenta con dichos materiales, por el momento es necesario ir al Laboratorio de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería para ser aplicada.

A mi parecer, el protocolo de la práctica "Transmisores y Receptores Ópticos" es sencillo de entender y de realizar debido a que desde el diseño se pensó en que los experimentos debían ser factibles e interesantes para hacerlo más dinámico para las y los alumnos. A pesar de ser accesible, creo que es un buen material introductorio a estos equipos, que da pie a la creación de otras nuevas prácticas en las que se puede profundizar aún más en el uso y funcionamiento de los mismos.

El diseño e implementación de los experimentos contenidos en la práctica me ayudaron a reforzar conocimientos teóricos y prácticos, pero además me ayudaron a mejorar otras habilidades como la capacidad de investigación, la comunicación, el trabajo en equipo, entre otras, lo cual desde mi punto de vista me complementó para convertirme en un mejor ingeniero.

La importancia de esta práctica radica en el hecho de que muchos equipos utilizados en el campo laboral están constituidos por equipos transmisores y receptores ópticos, por lo que entender cómo funcionan ayudará a comprender qué es lo que está pasando dentro de un medidor de potencia, un OTDR o equipos similares, así mismo se sabrá elegir los equipos más adecuados para una aplicación en particular, dependiendo por ejemplo de la longitud de onda del transmisor láser que se está utilizando en una red de fibra óptica.

REFERENCIAS

- [1] Frenzel L. (2014). *Principles of electronic communication systems*, 4th ed., New York: McGraw-Hill Education.
- [2] Mitschke F. (2009). *Fiber Optics: Physics and Technology*. Berlin: Springer.
- [3] Martín J. A. (2004). *Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones*. Madrid: Pearson Educación.
- [4] Blaunstein, N., Engelberg, S., Krouk, E., Sergeev, M. (2020). *Fiber Optic and Atmospheric Optical Communication*. New Jersey: Wiley.
- [5] Muñoz, A. (2019). *Práctica Activación de servicios de Gigabit Ethernet* (Material Didáctico). Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.
- [6] De la Rosa, S. (2012). *Análisis estadístico comparativo de tres escalas de valoración Likert, fuzzy-Likert y fuzzy de respuesta libre* (Tesis de Fin de Máster). Universidad de Oviedo, España.
- [7] Saleheen, F., Butz, B., Picone, J., Won, C. (2015) Effectiveness of Virtual Teaching Assistant Software for Circuits Open Laboratory. *IEEE Transactions on education*, vol. 10, no. 10, pp. 1-9. Recuperado de https://www.isip.piconepress.com/publications/unpublished/journals/2015/ieee_edu/volta/paper_v00.pdf
- [8] Kumar, T., Kumbhakar, P., Kanti, M. (2020). *Photonics and Fiber Optics: Foundations and Applications*. Florida: CRC Press.