

# Manual de Prácticas de Laboratorio

## La Ley de Snell en Comunicaciones Ópticas

Dr. José Luis Alvarez Flores

Julio 2025

### Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Objetivos Generales de la Práctica</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivos Específicos . . . . .	2
<b>3. Consideraciones de Seguridad</b>	<b>2</b>
<b>4. Práctica 3: Construcción y Caracterización de un Modelo de Fibra Óptica</b>	<b>3</b>
4.1. Resumen . . . . .	3
4.2. Introducción Teórica . . . . .	3
4.3. Materiales y Equipos . . . . .	3
4.4. Procedimiento Experimental . . . . .	4
4.4.1. Construcción del Modelo de Fibra . . . . .	4
4.4.2. Caracterización Básica . . . . .	4
4.4.3. Medición de la Apertura Numérica . . . . .	4
4.4.4. Efecto de las Curvaturas . . . . .	4
4.4.5. Comparación con Diferentes Revestimientos . . . . .	5
4.5. Análisis de Resultados . . . . .	5
4.5.1. Cálculo de la Apertura Numérica . . . . .	5
4.5.2. Análisis de Pérdidas por Curvatura . . . . .	5
4.5.3. Eficiencia de Acoplamiento . . . . .	5
4.6. Conexión con Fibras Ópticas Reales . . . . .	5
4.6.1. Comparación de Parámetros . . . . .	5
4.7. Preguntas de Análisis . . . . .	6
<b>5. Conclusiones Generales de la Práctica</b>	<b>7</b>
5.1. Referencias . . . . .	8

## 1. Introducción

La presente práctica de laboratorio tiene como finalidad la validación experimental de los principios de la óptica que rigen la propagación de la luz en guías de onda. A través de la construcción de un modelo a escala de una fibra óptica, se transitará del análisis teórico a la aplicación práctica para comprender los fundamentos operativos de la tecnología esencial para las comunicaciones globales.

Durante el desarrollo de esta sesión, se aplicarán los conceptos de la Ley de Snell y la reflexión interna total, estudiados previamente en el curso. Se procederá a construir un modelo funcional de fibra óptica empleando materiales accesibles para demostrar experimentalmente el mecanismo de confinamiento de la luz.

## 2. Objetivos Generales de la Práctica

El objetivo principal es que el estudiante compruebe de manera tangible cómo se guía la luz a través de una estructura dieléctrica. Se llevarán a cabo mediciones de parámetros fundamentales como la apertura numérica y se analizarán los efectos de las macrocurvaturas en la transmisión. Este ejercicio permitirá establecer una correlación directa entre los fundamentos teóricos y las características operativas de las fibras ópticas comerciales.

### 2.1. Objetivos Específicos

- Construir un modelo funcional de fibra óptica utilizando materiales transparentes.
- Demostrar la propagación de luz por reflexión interna total en la fibra modelo.
- Medir la eficiencia de acoplamiento de luz en la fibra.
- Observar el efecto de curvaturas en la propagación de la luz.
- Calcular la apertura numérica del modelo de fibra construido.

## 3. Consideraciones de Seguridad

Antes de realizar cualquier práctica, es fundamental observar las siguientes medidas de seguridad:

- Utilizar siempre lentes de protección cuando se trabaje con generadores de luz láser (dependiendo de la potencia, el tipo, la longitud de onda y el tamaño del láser ).
- Recuerda que el uso de los lentes son de uso únicamente personal.
- No mirar directamente a las fuentes de luz láser, incluso de baja potencia.
- Manejar con cuidado los componentes ópticos para evitar rayones o roturas.
- Mantener el área de trabajo limpia y organizada.
- Reportar inmediatamente cualquier daño en el equipo al instructor.
- Seguir las instrucciones específicas de cada práctica y consultar al instructor ante cualquier duda.

## 4. Práctica 3: Construcción y Caracterización de un Modelo de Fibra Óptica

### 4.1. Resumen

En esta práctica, los estudiantes construirán un modelo simple de fibra óptica utilizando materiales accesibles y caracterizarán sus propiedades ópticas básicas. El objetivo es demostrar prácticamente cómo la reflexión interna total permite el confinamiento y la propagación de la luz a lo largo de una guía de onda óptica, estableciendo la conexión directa entre los principios teóricos estudiados y las aplicaciones tecnológicas reales.

### 4.2. Introducción Teórica

Una fibra óptica consiste básicamente en un núcleo transparente rodeado por un revestimiento con menor índice de refracción. La diferencia de índices de refracción entre el núcleo ( $n_1$ ) y el revestimiento ( $n_2$ ) permite que la luz se propague a lo largo del núcleo mediante reflexiones internas totales sucesivas.

La apertura numérica (NA) de una fibra óptica es un parámetro fundamental que determina la capacidad de la fibra para captar luz. Se define como:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del núcleo y revestimiento, respectivamente. El ángulo de aceptación máximo ( $\theta_{max}$ ) está relacionado con la apertura numérica por:

$$\sin \theta_{max} = \frac{NA}{n_0} \quad (2)$$

donde  $n_0$  es el índice de refracción del medio desde el cual se acopla la luz (generalmente aire,  $n_0 = 1$ ).

La eficiencia de acoplamiento depende de varios factores, incluyendo el área del núcleo, la apertura numérica, y la calidad del acoplamiento entre la fuente de luz y la fibra.

### 4.3. Materiales y Equipos

Material/Equipo	Cantidad	Especificaciones
Varilla de acrílico	1	Diámetro 6 mm, longitud 50 cm
Tubo de silicona	1	Diámetro interno 6 mm, longitud 50 cm
Agua destilada	200 ml	Pureza óptica
Glicerina	100 ml	Pureza 99 %
Fuente de luz LED	1	LED blanco de alta intensidad
Fotodetector	1	Fotodiodo con amplificador
Multímetro digital	1	Resolución 0.1 mV
Soporte óptico	2	Ajustables en altura
Jeringa	1	Capacidad 10 ml
Papel negro	1 hoja	Para bloquear luz parásita
Regla milimetrada	1	Longitud 50 cm

Cuadro 1: Lista de materiales para la Práctica 3

## 4.4. Procedimiento Experimental

### 4.4.1. Construcción del Modelo de Fibra

1. Limpiar cuidadosamente la varilla de acrílico con alcohol isopropílico para eliminar cualquier residuo.
2. Insertar la varilla de acrílico dentro del tubo de silicona, asegurándose de que quede centrada.
3. Utilizando la jeringa, llenar el espacio entre la varilla y el tubo con agua destilada, eliminando cualquier burbuja de aire.
4. Sellar ambos extremos del tubo para evitar fugas del líquido.
5. Verificar que la varilla esté completamente rodeada por el agua y que no haya burbujas de aire visibles.

### 4.4.2. Caracterización Básica

1. Montar la fuente de luz LED en un extremo de la fibra modelo utilizando los soportes ópticos.
2. Posicionar el fotodetector en el extremo opuesto de la fibra.
3. Alinear cuidadosamente la fuente de luz con el eje de la fibra para maximizar el acoplamiento.
4. Medir la intensidad de luz transmitida cuando la fibra está completamente recta.
5. Registrar esta medición como referencia (100 % de transmisión relativa).

### 4.4.3. Medición de la Apertura Numérica

1. Mantener la fibra recta y el fotodetector fijo.
2. Variar el ángulo de incidencia de la fuente de luz desde  $0^\circ$  hasta  $45^\circ$  en incrementos de  $5^\circ$ .
3. Para cada ángulo, medir la intensidad de luz transmitida.
4. Identificar el ángulo máximo para el cual aún se detecta luz transmitida.
5. Calcular la apertura numérica experimental utilizando este ángulo máximo.

### 4.4.4. Efecto de las Curvaturas

1. Con la fuente de luz acoplada óptimamente, doblar gradualmente la fibra modelo.
2. Medir la intensidad transmitida para diferentes radios de curvatura: 20 cm, 15 cm, 10 cm, 5 cm.
3. Observar y registrar el punto en el cual la transmisión de luz se reduce significativamente.
4. Documentar el comportamiento de la luz que escapa de la fibra en las curvaturas.

#### 4.4.5. Comparación con Diferentes Revestimientos

1. Drenar el agua del tubo de silicona y reemplazarla con glicerina.
2. Repetir las mediciones de apertura numérica y eficiencia de transmisión.
3. Comparar los resultados obtenidos con ambos revestimientos líquidos.
4. Analizar cómo la diferencia de índices de refracción afecta las propiedades de la fibra.

### 4.5. Análisis de Resultados

#### 4.5.1. Cálculo de la Apertura Numérica

Utilizando los índices de refracción conocidos:

- Acrílico:  $n_1 \approx 1,49$
- Agua:  $n_2 \approx 1,33$
- Glicerina:  $n_2 \approx 1,47$

Calcular teóricamente la apertura numérica para ambas configuraciones y comparar con los valores experimentales.

#### 4.5.2. Análisis de Pérdidas por Curvatura

1. Graficar la intensidad transmitida en función del radio de curvatura.
2. Determinar el radio de curvatura crítico para cada configuración.
3. Explicar físicamente por qué las curvaturas causan pérdidas de luz.

#### 4.5.3. Eficiencia de Acoplamiento

1. Calcular la eficiencia de acoplamiento como la relación entre la potencia óptica transmitida y la potencia óptica incidente.
2. Analizar los factores que limitan la eficiencia de acoplamiento en el modelo construido.
3. Proponer mejoras para incrementar la eficiencia del sistema.

### 4.6. Conexión con Fibras Ópticas Reales

#### 4.6.1. Comparación de Parámetros

Comparar las características del modelo construido con las de fibras ópticas comerciales:

Parámetro	Modelo	Fibra Real
Diámetro del núcleo	6 mm	8-62.5 $\mu\text{m}$
Apertura numérica	Calculada	0.1-0.5
Material del núcleo	Acrílico	Sílice
Material del revestimiento	Agua/Glicerina	Sílice dopada
Pérdidas típicas	Altas	0.2-3 dB/km

Cuadro 2: Comparación entre el modelo y fibras ópticas reales

#### 4.7. Preguntas de Análisis

1. ¿Por qué el modelo construido tiene pérdidas mucho mayores que una fibra óptica real?
2. ¿Cómo afecta el diámetro del núcleo a la capacidad de transmisión de información?
3. ¿Qué ventajas tendría utilizar un revestimiento sólido en lugar de líquido?
4. ¿Por qué las fibras ópticas reales utilizan sílice en lugar de otros materiales transparentes?
5. ¿Cómo se podría mejorar el modelo para reducir las pérdidas ópticas?
6. Validación del Principio de Guiado: Describa si fue posible comprobar la propagación de la luz por reflexión interna total. Compare el comportamiento de la transmisión lumínica utilizando agua y glicerina como revestimiento. Analice el efecto que produjo la variación del índice de refracción del revestimiento en la eficiencia del guiado de la luz.
7. Apertura Numérica (NA): Compare el valor teórico de la NA, obtenido mediante cálculo, con el valor experimental medido en el laboratorio. Discuta los factores y las posibles fuentes de error que pudieron haber contribuido a las discrepancias observadas. Defina, con base en su análisis experimental, la importancia física de la apertura numérica.
8. Pérdidas por Curvatura: Describa cualitativamente el fenómeno observado al someter el modelo de fibra a diferentes radios de curvatura. Explique el mecanismo físico por el cual se producen pérdidas ópticas en las curvaturas, relacionando este efecto con el principio del ángulo crítico.
9. Comparación con Fibras Reales: El modelo construido posee un núcleo de 6 mm, mientras que el de una fibra óptica comercial es de orden micrométrico. Analice las razones por las cuales las pérdidas de propagación en el modelo son significativamente mayores que las especificadas para fibras comerciales. Discuta las ventajas del uso de sílice de alta pureza sobre el acrílico en aplicaciones de telecomunicaciones.
10. Aplicación en Ingeniería: Establezca una correlación entre los conceptos validados en esta práctica y su aplicación en sistemas de comunicación reales (e.g., redes metropolitanas, enlaces transoceánicos). Argumente la importancia del control de los parámetros geométricos y de los materiales en el diseño de fibras ópticas para garantizar una transmisión de datos de alta fidelidad.

## 5. Conclusiones Generales de la Práctica

Para la consolidación del conocimiento adquirido, se solicita al estudiante que desarrolle un análisis reflexivo sobre los siguientes puntos, utilizando como base los resultados experimentales obtenidos y los fundamentos teóricos correspondientes:

- Verificar experimentalmente los principios teóricos de la refracción y reflexión interna total.
- Construir y caracterizar un modelo funcional de fibra óptica.
- Medir y analizar las pérdidas ópticas en sistemas reales.
- Comprender las limitaciones impuestas por la dispersión en sistemas de alta velocidad.
- Establecer conexiones directas entre los principios físicos fundamentales y las aplicaciones tecnológicas modernas.

Las habilidades experimentales desarrolladas y los conceptos comprendidos a través de estas prácticas proporcionan una base sólida para el estudio avanzado de sistemas de comunicaciones ópticas y preparan a los estudiantes para enfrentar los desafíos tecnológicos del futuro en el campo de las telecomunicaciones.

## 5.1. Referencias

### Referencias

- [1] Agrawal, G. P. (2010). *Fiber-Optic Communication Systems* (4th ed.). John Wiley & Sons. Capítulo 2: Optical Fibers.
- [2] Palais, J. C. (2005). *Fiber Optic Communications* (5th ed.). Prentice Hall. Capítulo 3: Optical Fiber Waveguides.
- [3] Dutton, H. J. R. (1998). *Understanding Optical Communications*. IBM Redbooks. Capítulo 2: Optical Fiber.