



**I  
N  
A  
O  
E**

# **Esquema experimental de comunicaciones ópticas de espacio libre utilizando modulación temporal de pulsos**

por:

**Rebeca Baltazar Barrón**

M.C., INAOE

Tesis sometida como requisito parcial  
para obtener el grado de

**DOCTOR EN CIENCIAS EN LA  
ESPECIALIDAD DE ÓPTICA**

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica,  
Óptica y Electrónica**

Noviembre, 2024

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

**Dr. Celso Gutiérrez Martínez**

Investigador Titular del INAOE

©INAOE 2024

Derechos reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y  
distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes





---

# Resumen

Esta tesis doctoral tiene como objetivo principal proponer y estudiar un esquema de comunicaciones ópticas de espacio libre. Estos esquemas se han convertido en una alternativa atractiva para transmisión de información en función de las ventajas potenciales de alta capacidad de transmisión, evitando al mismo tiempo la saturación del espectro radioeléctrico por los sistemas de radiofrecuencia y microondas.

En este trabajo se considera el estudio experimental de un enlace de espacio libre entre edificios o instalaciones no exteriores con línea de vista de hasta 1 km, con aplicación de comunicación óptica de alta velocidad en zonas de actividades académicas. Un esquema de comunicación óptica por el espacio libre utiliza luz como portadora de información. La luz viaja por la atmósfera o el vacío hasta un receptor distante donde se recupera la información transmitida.

El enlace óptico propuesto utiliza la técnica de modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés de *pulse width modulation*) de la portadora óptica. Esta es una propuesta alternativa a los esquemas clásicos de transmisión óptica de información mediante modulación de intensidad de la portadora. La modulación PWM se basa en la premodulación eléctrica de un tren de pulsos en los cuales la información se imprime en la duración del estado alto de los pulsos. Esta técnica permite codificar y transmitir señales analógicas, tales como voz, imágenes, señales de instrumentación y control, etc. La premodulación eléctrica se convierte en una señal óptica cuando los pulsos eléctricos modifican la emisión luminosa de un láser semiconductor. La luz emitida consiste de un tren de pulsos ópticos PWM.

La modulación PWM es más eficiente que la modulación clásica de amplitud, ya que la información está contenida en la duración del pulso en lugar de su amplitud. Aunque la amplitud de los pulsos portadores de información se atenúan a medida que se propagan en la atmósfera, la información se recupera de manera eficiente porque no está contenida en la amplitud sino en la duración de los pulsos.

El desarrollo de esta tesis consideró dos subsistemas complementarios:

1. Los circuitos optoelectrónicos transmisor y receptor que generan y recuperan la modulación PWM.
2. Los arreglos ópticos transmisor y receptor del haz luminoso que se propaga por

---

el espacio atmosférico, cubriendo la distancia entre el sitio transmisor y el sitio receptor.

El enlace óptico opera con luz de longitud de onda de 1550 nm. El arreglo transmisor envía un haz colimado hacia el espacio libre, en este caso, la atmósfera. El arreglo óptico receptor colecta una fracción de la luz transmitida y la dirige a un circuito fotoreceptor que recupera la información transmitida.

El desarrollo de la tesis consistió en el diseño y realización de los subsistemas optoelectrónicos y de los arreglos ópticos transmisor y receptor para conformar los subsistemas transmisor y receptor del esquema de comunicación óptica de espacio libre, objeto de este trabajo.

---

# Summary

This doctoral thesis aims primarily to propose and study a free-space optical communication scheme. These schemes have become an attractive alternative for information transmission due to the potential advantages of high transmission capacity, while at the same time avoiding the saturation of the radioelectric spectrum by radiofrequency and microwave systems.

In this work, the experimental study of a free-space link between buildings or non-exterior facilities with a line of sight of up to 1 km is considered, with the application of high-speed optical communication in areas of academic activities. An optical free-space communication scheme uses light as an information carrier. The light travels through the atmosphere or vacuum to a distant receiver where the transmitted information is retrieved.

The proposed optical link uses the pulse width modulation (PWM) technique of the optical carrier. This is an alternative proposal to the classical schemes of optical information transmission through carrier intensity modulation. PWM modulation is based on the electrical premodulation of a pulse train in which the information is encoded in the duration of the high state of the pulses. This technique allows for the encoding and transmission of analog signals, such as voice, images, instrumentation and control signals, etc. Electrical pre-modulation becomes an optical signal when the electrical pulses modify the light emission of a semiconductor laser. The emitted light consists of a train of PWM optical pulses.

PWM modulation is more efficient than classical amplitude modulation, as the information is contained in the duration of the pulse rather than its amplitude. Although the amplitude of the information-carrying pulses attenuates as they propagate through the atmosphere, the information is recovered efficiently because it is not contained in the amplitude but in the duration of the pulses.

The development of this thesis considered two complementary subsystems:

1. The optoelectronic transmitter and receiver circuits that generate and recover PWM modulation.
2. The optical arrangements of the transmitter and receiver of the light beam that propagates through the atmospheric space, covering the distance between the transmitter site and the receiver site.

---

The optical link operates with light at a wavelength of 1550 nm. The transmitter array sends a collimated beam into free space, in this case, the atmosphere. The optical receiver array collects a fraction of the transmitted light and directs it to a photoreceptor circuit that retrieves the transmitted information.

The development of the thesis consisted of the design and implementation of the optoelectronic subsystems and the transmitter and receiver optical arrays to form the transmitter and receiver subsystems of the free-space optical communication scheme, the objective of this work.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>3</b>
<b>Prefacio</b>	<b>11</b>
Referencias . . . . .	13
<b>1 Tecnologías actuales de telecomunicaciones</b>	<b>15</b>
1.1 Telecomunicaciones de radiofrecuencia (RF) . . . . .	16
1.2 Telecomunicaciones por fibra óptica . . . . .	17
1.3 Telecomunicaciones ópticas por espacio libre . . . . .	18
1.3.1 Antecedentes de comunicación óptica de espacio libre . . . . .	18
1.3.2 Características de la comunicación óptica de espacio libre . . . . .	18
1.3.3 Algunos proyectos en el ámbito internacional . . . . .	20
1.4 Conclusiones . . . . .	21
Referencias . . . . .	22
<b>2 Montajes ópticos para comunicaciones de espacio libre</b>	<b>25</b>
2.1 Luz infrarroja en comunicaciones ópticas . . . . .	25
2.2 Arreglo óptico transmisor . . . . .	28
2.2.1 Primera configuración de arreglo óptico transmisor . . . . .	32
2.2.2 Segunda configuración de arreglo óptico transmisor . . . . .	34
2.2.3 Tercera configuración de arreglo óptico transmisor . . . . .	36
2.2.4 Comparación de alternativas de arreglo óptico transmisor . . . . .	38
2.3 Arreglo óptico receptor . . . . .	40
2.4 Conclusiones . . . . .	42
Referencias . . . . .	43
<b>3 Propagación del haz láser utilizando el modelo de haz gaussiano</b>	<b>45</b>
3.1 Propagación del haz gaussiano . . . . .	46

3.1.1	Distancia de Rayleigh . . . . .	46
3.1.2	Radio del haz . . . . .	47
3.1.3	Haz divergente . . . . .	48
3.1.4	Intensidad óptica . . . . .	49
3.1.5	Potencia óptica . . . . .	50
3.2	Propagación de un haz gaussiano en la atmósfera . . . . .	52
3.2.1	Propagación de un haz gaussiano en turbulencia óptica . . . . .	52
3.3	Conclusiones . . . . .	54
	Referencias . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Esquema optoelectrónico transmisor-receptor</b>	<b>57</b>
4.1	Tipos de modulación . . . . .	58
4.1.1	Modulación de intensidad . . . . .	58
4.1.1.1	Modulación en amplitud (AM) . . . . .	59
4.1.1.2	Modulación de frecuencia (FM) . . . . .	59
4.1.2	Subportadora de pulsos . . . . .	60
4.1.2.1	Modulación por amplitud de pulsos (PAM) . . . . .	60
4.1.3	Subportadora temporal de pulsos . . . . .	61
4.1.3.1	Modulación PWM . . . . .	61
4.2	Esquema de transmisión óptica utilizando modulación PWM . . . . .	62
4.3	Tipos de receptores ópticos . . . . .	65
4.4	Conclusiones . . . . .	66
	Referencias . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Evaluación experimental en laboratorio del enlace óptico por espacio libre</b>	<b>69</b>
5.1	Prueba y caracterización experimental del enlace óptico de espacio libre en laboratorio . . . . .	71
5.2	Recepción óptica con fotodetector PIN . . . . .	72
5.3	Recepción óptica con fotodetector APD . . . . .	74
5.4	Comparación de los esquemas ópticos caracterizados . . . . .	76
5.5	Transmisión óptica de video por espacio libre . . . . .	77
5.6	Conclusiones . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Conclusiones generales y perspectivas</b>	<b>81</b>
6.1	Perspectivas . . . . .	82

---

<b>Índice de figuras</b>	<b>83</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>86</b>

---

---

# Prefacio

Este trabajo doctoral aborda el estudio y desarrollo de enlaces ópticos para comunicaciones de espacio libre de distancia corta, para establecer enlaces ópticos entre edificios, o instalaciones de naturaleza diversa. El objetivo principal es desarrollar un esquema experimental de comunicación óptica de corta distancia con alcance de hasta 1 km.

Los enlaces de comunicaciones ópticas de espacio libre se han convertido en una alternativa a las comunicaciones inalámbricas de radiofrecuencia o por fibra óptica. Los enlaces ópticos inalámbricos no están restringidos en anchos de banda y no requiere del tendido de cables, por otra parte, resultan ventajosos en costo y capacidad en comparación con los aéreos o subterráneos de fibra óptica. La instalación y operación de un enlace óptico de espacio libre solo requiere que el emisor y el receptor estén en línea de vista.

La contribución de este trabajo es la realización de un esquema de comunicación óptica de espacio libre de corta distancia operando en una longitud de onda de 1550 nm. El esquema propuesto consiste en la integración y prueba de un enlace óptico de espacio libre utilizando modulación PWM. Esta técnica de modulación permite transmitir señales de datos, voz, imágenes, señales de instrumentación y control, etc. La modulación temporal de pulsos, en este caso PWM, resulta más eficiente que la modulación de amplitud de pulsos, ya que la información está impresa en la duración de los pulsos y no en sus amplitudes. En la transmisión por espacio libre, los pulsos ópticos PWM se atenuarán; sin embargo, la información se recuperará eficientemente, ya que los pulsos recibidos se regeneran en el receptor.

## Estado actual

El estado actual de enlaces ópticos en el espacio libre ha servido para conocer las ventajas que se tiene con respecto a otros sistemas de comunicaciones [1]. En la actualidad las transmisiones ópticas emplean diferentes longitudes de onda, entre 850 nm y 1550 nm para transmisiones de corta y larga distancia e incluso interplanetarias [1-3].

---

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

El objetivo principal de esta propuesta es diseñar, construir y caracterizar un enlace de comunicación óptica de espacio libre de corta distancia, en la ventana atmosférica de transmisión óptica de 1550 nm. El sistema será utilizado como plataforma de estudio de transmisión óptica de datos para transmisión de espacio libre entre edificios de instalaciones exteriores con línea de vista y distancias hasta 1 km.

### **Objetivos específicos**

En este trabajo se estudió de forma teórico-experimental la transmisión y detección de luz láser infrarroja para transmitir información en un enlace óptico de espacio libre. Se modelaron los elementos ópticos de los arreglos ópticos transmisor y receptor mediante el método matricial. Se desarrolló y se probó en laboratorio la transmisión de señal modulada mediante generación y modulación de pulsos PWM. El esquema optoelectrónico desarrollado consiste de un transmisor que comprende de un modulador electrónico PWM y de una fuente láser que convierte los pulsos eléctricos PWM en pulsos ópticos, los cuales se transmiten por el espacio libre. En el extremo receptor, un arreglo óptico receptor recupera una fracción de la luz transmitida. La luz recibida se fotodetecta, se amplifica y se demodula para recuperar la información transmitida.

## **Organización de la tesis**

Este documento describe el esquema de comunicación óptica de espacio libre desarrollado en este trabajo.

En el Capítulo 1 se describe sucintamente las técnicas de telecomunicaciones de radiofrecuencia, fibra óptica y de espacio libre.

En el Capítulo 2 se describen los arreglos ópticos transmisor y receptor, integrados a base de lentes. Se analiza el haz de luz láser divergente y la importancia de usar

---

un colimador óptico. Mediante el método matricial se modelan los arreglos ópticos transmisor y receptor con finalidad de colimar el haz óptico en transmisión y su colección y focalización en la recepción.

En el Capítulo 3 se describe la propagación del haz de luz láser en el espacio libre usando el modelo de haz Gaussiano. Con este modelo, se pueden calcular diferentes propiedades del haz de luz que cambian con relación a la distancia, como diámetro del haz o la potencia recibida limitada por un determinado radio.

En el Capítulo 4 se describen los esquemas optoelectrónicos transmisor y receptor. Se explica la generación de la señal óptica PWM mediante un diodo láser. Se describe también el proceso de fotodetección mediante diodos PIN y APD con objeto de recuperar la señal transmitida.

En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos de la transmisión óptica, comparando la recepción con tres tipos de fotodetectores. Se reporta la prueba de transmisión y recepción de video para mostrar la capacidad del esquema desarrollado.

Las conclusiones y las perspectivas de este estudio se presentan en el Capítulo 6.

## Referencias

- [1] M. Freebody. “Space Lasers Set to Protect Earth, Project Data”. En: *PHOTONICS spectra* 47.11 (nov. de 2013), págs. 42-46. URL: [https://www.photonics.com/Articles/Space\\_Lasers\\_Set\\_to\\_Protect\\_Earth\\_Project\\_Data/a55201](https://www.photonics.com/Articles/Space_Lasers_Set_to_Protect_Earth_Project_Data/a55201).
- [2] L. C. Andrews. “Free-Space Laser Propagation: Atmospheric Effects”. En: *IEEE LEOS* 19.5 (oct. de 2005), págs. 6-11. DOI: 10.1109/LEOSST.2005.1527964.
- [3] LightPointe. *How to Design a Reliable FSO System*. Light pointe white paper series. 2009.

---

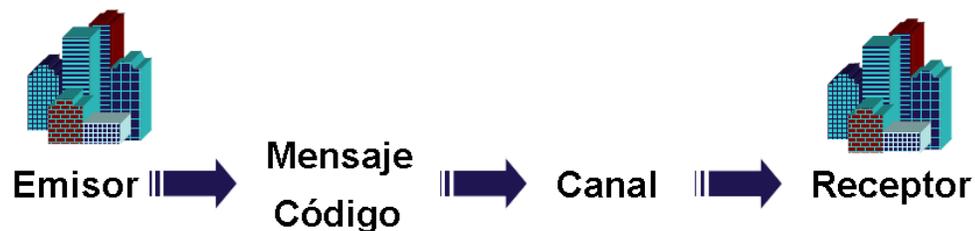
# Capítulo 1

---

## Tecnologías actuales de telecomunicaciones

El objetivo de un sistema de comunicación es transmitir información de un lugar a otro. Las comunicaciones consisten en el envío, recepción y procesamiento de información entre un transmisor y un receptor distantes. La fuente original de información puede ser analógica o digital. Sin embargo, todas las formas de información deben convertirse en energía electromagnética [1], la cual se propaga por un medio de transmisión (cables, guías de onda, espacio atmosférico, espacio libre), entre el transmisor y el receptor.

Los pasos básicos del proceso de comunicación son: generación de un mensaje, codificación del mensaje, transmisión de una portadora a través de un canal, recepción de la portadora, decodificación del mensaje y finalmente la interpretación del mensaje por parte de un receptor. Un esquema general de comunicación se muestra en la Figura 1.1.



**Figura 1.1:** Elementos de la comunicación.

La comunicación a distancia, alámbrica o inalámbrica, es la transmisión y recepción de señales electromagnéticas, las cuales transportan algún tipo de información entre dos puntos distantes.

A lo largo de la historia de la humanidad las personas se comunicaban mediante mensajes orales, cartas, periódicos y libros; pero desde los inicios del siglo XX, se generaron tecnologías para transmitir información por técnicas electrónicas. Esto dio lugar al desarrollo de los sistemas modernos de radiodifusión, televisión, teléfono, telefonía móvil, comunicaciones de datos e Internet.

En la actualidad, los avances tecnológicos han permitido aumentar la capacidad,

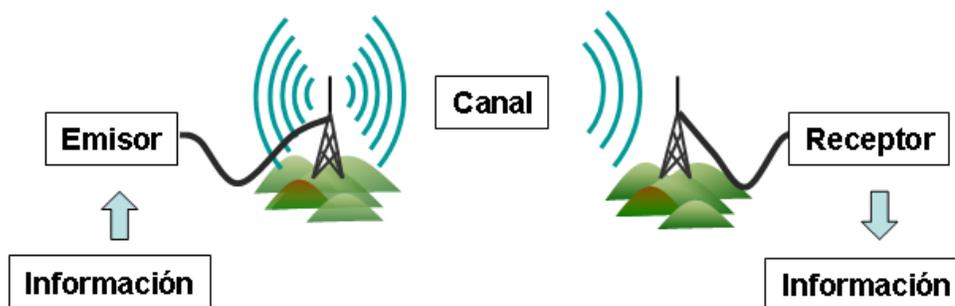
---

velocidad y seguridad de transmisión de información, mediante técnicas y tecnologías avanzadas alámbricas e inalámbricas por diferentes medios de transmisión. A continuación, se describen algunos medios de telecomunicación actuales.

## 1.1. Telecomunicaciones de radiofrecuencia (RF)

Las telecomunicaciones por radiofrecuencias (RF) utilizan ondas de radio las cuales se propagan por el espacio libre o por la atmósfera terrestre. Las telecomunicaciones de RF utilizan segmentos del espectro radioeléctrico y dependiendo de las bandas asignadas se configuran las transmisiones de radio, telefonía móvil, comunicaciones terrestres punto a punto y multipunto, enlaces satelitales, etc.

Las comunicaciones de RF utilizan ondas portadoras, cuyos parámetros son modulados en función de las señales de información, por ejemplo, audio, vídeo o datos. La onda portadora modulada se propaga por la atmósfera o el espacio libre. El receptor capta la onda y la demodula con el objeto de recuperar la información transmitida. Todo este proceso se representa en la Figura 1.2. Las ondas se propagan libremente a través del medio y pueden ser recibidas por uno o varios receptores.



**Figura 1.2:** Sistema de comunicaciones de radiofrecuencia.

En México, la ley federal de telecomunicaciones y radiodifusión tiene por objeto regular el uso, aprovechamiento y explotación del espectro radioeléctrico, de las redes de telecomunicaciones, y de la comunicación vía satélite, por lo que los sistemas de radiofrecuencias se sujetan a las frecuencias y anchos de banda permitidos para cada servicio [2].

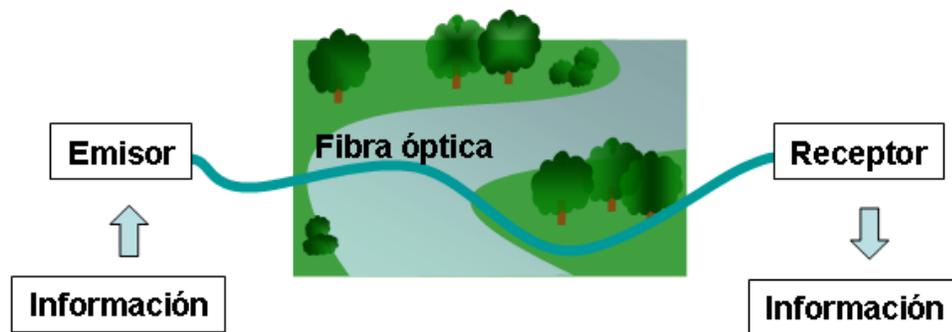
---

## 1.2. Telecomunicaciones por fibra óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión empleado extensamente en redes de datos y telecomunicaciones de banda ancha. Una fibra óptica es una guía de onda de material dieléctrico transparente (vidrio o materiales plásticos), que conduce luz como portadora de información.

El principio básico del funcionamiento de una fibra óptica es el fenómeno de reflexión total interna de haces de luz entre dos medios dieléctricos distintos.

Las fibras ópticas se utilizan ampliamente en telecomunicaciones, ya que permiten enviar gran cantidad de datos a enlaces en redes de corta y larga distancia (Figura 1.3). Las fibras ópticas son el medio de transmisión más avanzado, ya que presenta capacidades de transmisión de decenas o aún centenas de gigabits por segundo, tanto en enlaces punto a punto como en redes complejas, lo que representa su mayor ventaja respecto a las comunicaciones de RF.



**Figura 1.3:** Esquema de transmisión de señal a través de fibra óptica.

Sin embargo, la fibra óptica presenta la desventaja de un costo elevado del tendido de fibra, en comparación con otros medios de transmisión. La dificultad de tender fibra óptica por todas partes se resuelve mediante transmisiones inalámbricas de RF o mediante enlaces ópticos de espacio libre. La alternativa de configurar enlaces de comunicaciones ópticas por espacio libre es la temática de esta tesis. La realización y prueba experimental de un enlace óptico de corta distancia se describirá en los capítulos siguientes de este documento.

---

## **1.3. Telecomunicaciones ópticas por espacio libre**

### **1.3.1. Antecedentes de comunicación óptica de espacio libre**

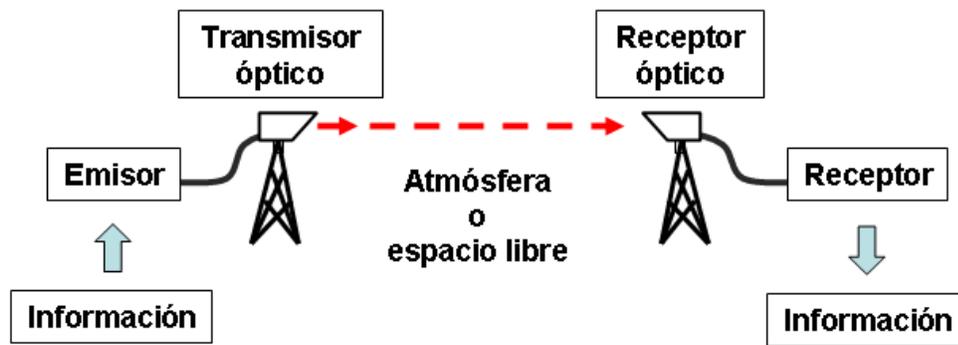
La luz como medio de comunicación a distancia se ha experimentado desde épocas antiguas; se tienen registros de que alrededor del año 800 aC, los griegos y romanos usaban balizas de fuego para la señalización. El telégrafo era óptico utilizado por los navegantes franceses en la década de 1790. Otro esquema de comunicación óptica de espacio libre fue el fotófono, demostrado por Alexander Graham Bell en 1880. En este experimento, Bell moduló la radiación solar con la señal de voz y la transmitió a una distancia de 200 m. El receptor era de un espejo parabólico con una célula de selenio en su punto focal. Sin embargo, el experimento no fue bien aceptado debido a la limitación de detección de los aparatos utilizados y la naturaleza intermitente de la radiación solar [3].

En la década de 1960, con la invención del láser, se realizaron diferentes pruebas de transmisión óptica de espacio libre. En 1962 investigadores del Laboratorio Lincoln del MIT realizaron una transmisión de televisión en una distancia de 48 km utilizando un láser de GaAs. En 1963 se realizó una transmisión entre Panamint Ridge y la Montaña de San Gabriel, EEUU. Se transmitió un haz láser de He-Ne modulado con voz [4].

### **1.3.2. Características de la comunicación óptica de espacio libre**

La comunicación óptica de espacio libre es un esquema de transmisión entre dos ubicaciones separadas espacialmente y que se encuentran en línea de vista. El esquema se basa en un transmisor y receptor ópticos enlazados por un haz luminoso que se propaga a través de la atmósfera o el espacio libre. El haz de luz láser puede transportar mensajes de voz, vídeo o datos. Un esquema de transmisión óptico de espacio libre se muestra en la Figura 1.4.

La comunicación óptica de espacio libre ofrece una alternativa atractiva y de bajo costo para la transferencia de datos de alta velocidad cuando la transmisión por fibra óptica no es viable. Sin embargo, las condiciones atmosféricas pueden conducir al desvanecimiento o pérdida completa de la señal luminosa con la nubosidad, niebla o la lluvia, fenómenos frecuentes en la atmósfera terrestre.



**Figura 1.4:** Esquema de enlace óptico de espacio libre.

Los fenómenos atmosféricos mencionados atenúan significativamente la señal óptica en transmisión. La turbulencia atmosférica puede degradar fuertemente el frente de onda de un haz láser, el cual experimentará fluctuaciones de potencia (centelleo o titilación) debido a la variación del índice de refracción, lo que se traducirá también en pérdidas en la calidad de la transmisión [5].

Las pérdidas ópticas puede ser compensadas mediante el aumento de la potencia óptica. En general, la turbulencia óptica y los fenómenos atmosféricos son los factores limitantes en el rendimiento de un enlace de comunicación óptica de espacio libre [6].

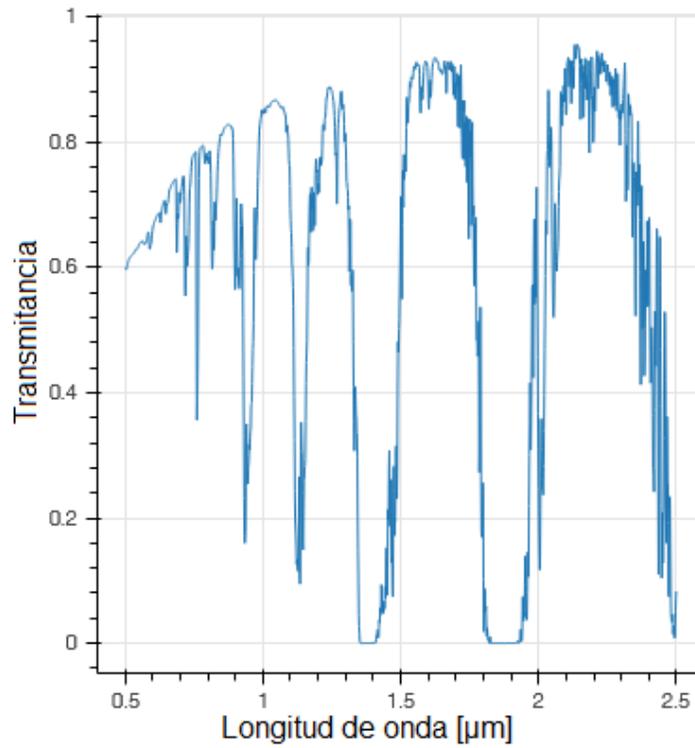
La selección adecuada de los componentes de un esquema óptico de espacio libre requiere conocer el medio y sus características. Cuando una onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía a las moléculas atmosféricas. La absorción de energía causa atenuación y en consecuencia la reducción de la densidad de potencia a una cierta distancia [1].

La absorción molecular se puede minimizar mediante la selección apropiada de la longitud de onda óptica. Por otra parte, las fluctuaciones aleatorias en el índice de refracción de la atmósfera que causan turbulencia óptica afectarán invariablemente la calidad de transmisión en los enlaces ópticos.

En la Figura 1.5 se muestra la transmitancia de la atmósfera en condiciones meteorológicas claras (visibilidad de 15 km) en función de longitud de onda entre 500 nm y 2500 nm [7]. La imagen muestra las ventanas de transmisión atmosférica que son las regiones con máxima transmitancia. El intervalo de luz infrarroja entre 1.5 a 1.7  $\mu\text{m}$  tiene una transmitancia superior a 0.85, otras longitudes de onda son absorbidas principalmente por el dióxido de carbono, el metano y el agua. Otra región en el infrarrojo es entre 2 y

---

2.3  $\mu\text{m}$ . Esta región es utilizada en observaciones astronómicas.



**Figura 1.5:** Transmitancia de la atmósfera en condiciones meteorológicas de alta transparencia.

### 1.3.3. Algunos proyectos en el ámbito internacional

Actualmente, existen múltiples proyectos de comunicaciones ópticas terrestres y espaciales alrededor del mundo. A continuación se mencionan algunos de estos proyectos.

1. Proyecto OPALS (Optical Payload for Lasercomm Science). En 2014 un experimento de transmisión óptica demostró con éxito la transferencia de archivos de video desde una carga útil de la Estación Espacial Internacional (ISS) hasta un receptor en tierra en el Laboratorio de Propulsión a reacción (Jet Propulsion Laboratory o JPL, por sus siglas en inglés) en Wrightwood, California. Como la ISS viaja orbitando la Tierra, un haz de láser se transmite desde el telescopio terrestre hacia la carga útil. Cada comunicación tiene una duración de 150 segundos que es el tiempo en que la carga útil en la ISS y el telescopio terrestre mantienen la línea de vista [8].

- 
2. Proyecto VLC (Visible Light Communication). Consiste en el procesamiento digital de señales de diodo emisor de luz visible para comunicación con luz, esto es usar fuentes de iluminación LED para mantener un enlace de transmisión de datos entre diferentes dispositivos de uso en el hogar [9].
  3. Proyecto ARTEMIS (Advanced Relay and Technology Mission Satellite). En 2006 el satélite ARTEMIS llegó a su posición geoestacionaria a 36,000 km de altitud y transmitió con éxito un enlace óptico láser desde a un avión a lo largo de una distancia de 40,000 km durante dos vuelos de 6 y 10 km [10].
  4. Proyecto ASCENDS (Active Sensing of  $CO_2$  Emissions of Nights, Days, and Seasons). Este proyecto aprovecha la cantidad de absorción para monitorear la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera que los árboles y el follaje están absorbiendo y emitiendo en los procesos de fotosíntesis y respiración. Esto es mediante los láseres montados en un satélite de baja órbita terrestre que reflejan la luz que viaja hacia fuera de la Tierra de vuelta a esta, a través de la atmósfera hacia un telescopio detector para medir una de las bandas de absorción de  $CO_2$  a 2 y 1.6  $\mu m$ , y una tercera banda de oxígeno molecular a 0.78  $\mu m$  [11].
  5. Proyecto Taara. Este es un proyecto de comunicación óptica inalámbrica de la compañía Alphabet. Este proyecto utiliza haces de luz para brindar conectividad de alta velocidad y alta capacidad a largas distancias. De la misma manera que la fibra tradicional, utiliza la luz para transportar datos a través de cables en el suelo, Taara utiliza la luz para transmitir información en forma de haces muy estrechos e invisibles al ojo humano. Este haz se envía entre dos pequeñas terminales para crear un enlace. Actualmente, esta tecnología es capaz de ofrecer hasta 20 Gbps a una distancia de 20 km en caso de transmisión con línea de visión despejada, pero su eficacia puede disminuir fácilmente en presencia de niebla o condiciones meteorológicas adversas. Actualmente, el equipo de Taara ofrece conectividad en países como Estados Unidos, India, África subsahariana y Nueva Zelanda [12].

## 1.4. Conclusiones

La telecomunicación óptica por el espacio libre utiliza el haz de luz en los enlaces ópticos para proporcionar conectividad de alta velocidad entre dos lugares distantes. La

---

telecomunicación por espacio libre no requiere un tendido de cables o fibra óptica para conectar dos lugares por lo que es un tipo de comunicación que no genera un impacto ambiental. En este enlace, el sistema transmisor y el sistema receptor se pueden colocar a distancia manteniendo la línea de vista, y la señal de luz se transmite sobre los obstáculos geográficos como ríos y carreteras ya que la información se transmite por el espacio libre o la atmósfera terrestre con una transmisión de datos de alta velocidad.

## Referencias

- [1] W. Tomasi. *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. 4.<sup>a</sup> ed. Pearson Educación, 2003.
- [2] Instituto Federal de Telecomunicaciones. *Ley federal de telecomunicaciones y radiodifusión*. Congreso general de los Estados Unidos Mexicanos, 2014.
- [3] J. A. Martín Pereda. *Historia de las telecomunicaciones*. España: Guadalmezán, 2022.
- [4] Z. Ghassemlooy, W. Popoola y S. Rajbhandari. *Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB*. CRC press, 2013. DOI: [10.1201/9781315151724](https://doi.org/10.1201/9781315151724).
- [5] L. C. Andrews. “Free-Space Laser Propagation: Atmospheric Effects”. En: *IEEE LEOS* 19.5 (oct. de 2005), págs. 6-11. DOI: [10.1109/LEOSST.2005.1527964](https://doi.org/10.1109/LEOSST.2005.1527964).
- [6] A. K. Majumdar y J. C. Ricklin. *Free-space laser communications: principles and advances*. Springer, 2008. DOI: [10.1007/978-0-387-28677-8](https://doi.org/10.1007/978-0-387-28677-8).
- [7] Spectral Sciences Inc. *MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmision)*. URL: [http://modtran.spectral.com/modtran\\_home#plot](http://modtran.spectral.com/modtran_home#plot).
- [8] M. Freebody. “Space Lasers Set to Protect Earth, Project Data”. En: *PHOTONICS spectra* 47.11 (nov. de 2013), págs. 42-46. URL: [https://www.photonics.com/Articles/Space\\_Lasers\\_Set\\_to\\_Protect\\_Earth\\_Project\\_Data/a55201](https://www.photonics.com/Articles/Space_Lasers_Set_to_Protect_Earth_Project_Data/a55201).
- [9] C. W. Chow et al. “Digital Signal Processing for Light Emitting Diode Based Visible Light Communication”. En: *Proc. IEEE Photon. Soc. Newslett., Res. Highlights* (ene. de 2012), págs. 9-13. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Digital-Signal-Processing-for-Light-Emitting-Diode-Chow-Yeh/cb5fbc2baca3dc6a197cc2eba1bb38fad08b1328#extracted>.

- 
- [10] F.J. Duarte y T.S. Taylor. “Quantum entanglement physics secures space-to-space interferometric communications”. En: *Laser Focus World* 51.4 (abr. de 2015), pág. 54. URL: <https://www.laserfocusworld.com/optics/article/16551652/interferometry-quantum-entanglement-physics-secures-spacetospace-interferometric-communications>.
- [11] V. C. Coffey. “Lasers Find Varied Uses in Space Applications”. En: *PHOTONICS spectra* 46.11 (nov. de 2012), págs. 40-45. URL: [https://www.photonics.com/Articles/Lasers\\_Find\\_Varied\\_Uses\\_in\\_Space\\_Applications/a52252](https://www.photonics.com/Articles/Lasers_Find_Varied_Uses_in_Space_Applications/a52252).
- [12] X. Lin et al. *Fundamentals of 6G Communications and Networking*. 1st. Springer International Publishing, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-37920-8.

---

## Capítulo 2

---

# Montajes ópticos para comunicaciones de espacio libre

La comunicación de espacio libre requiere, en el lado transmisor, de un arreglo óptico que permita colimar el haz luminoso con objeto de minimizar la dispersión a lo largo de la trayectoria para alcanzar el extremo receptor. El receptor debe contar igualmente con un arreglo óptico que facilite que la luz recibida se concentre hacia el área activa del fotodetector [1, 2]. Los arreglos ópticos se diseñan y realizan con lentes de diferentes tipos y que están disponibles en el laboratorio.

Los arreglos ópticos se modelan mediante el método matricial, lo que permite determinar la posición óptima de las lentes para conformar los perfiles del haz luminoso que se transmite [3, 4]. El método modela la trayectoria de rayos en superficies ópticas mediante la matriz de transferencia considerando la longitud de onda de la luz, las curvaturas y materiales de las lentes que conforman un arreglo óptico. En esta perspectiva, el método matricial permite calcular la trayectoria de los rayos que pasan por lentes en cascada y que generan un haz colimado que se transmite por el espacio libre hasta el receptor distante. El arreglo óptico transmisor asegura la transmisión de un haz colimado; el arreglo óptico receptor colecta una fracción de la luz incidente y lo enfoca hacia el área activa del fotodetector.

### 2.1. Luz infrarroja en comunicaciones ópticas

Existe una variedad de fuentes de luz utilizables en sistemas ópticos de espacio libre. Las fuentes de luz más utilizadas son los diodos emisores de luz (LED) y los diodos láser (LD). Los LEDs se utilizan principalmente para aplicaciones en ambientes interiores. Los láseres, debido a su perfil de haz altamente concentrado, se emplean en transmisiones de espacio libre en la atmósfera o en el vacío.

En este trabajo se desarrolla un esquema de comunicación óptica de espacio libre en una longitud de onda de 1550 nm, la cual aprovecha una ventana de transparencia

---

atmosférica de baja atenuación [5, 6].

En el esquema propuesto, la luz láser es emitida por una fibra óptica monomodo estándar con campo modal (*MFD*) de 10.4  $\mu\text{m}$  y abertura numérica  $NA = 0.14$  [7].

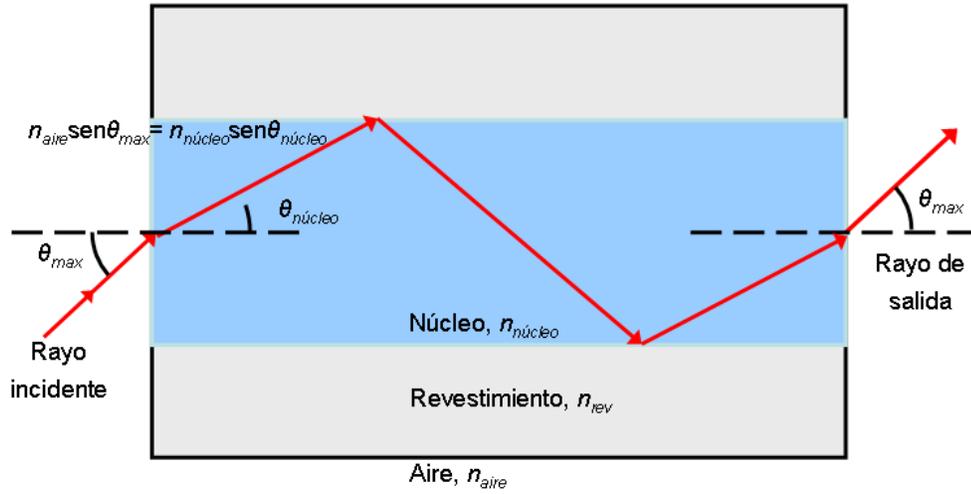
La luz emitida por la fibra óptica presenta una distribución Gaussiana. El *MFD* determina el ángulo de divergencia ( $\theta$ ) del haz a la salida de una fibra monomodo [8, 9]

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi \left(\frac{MFD}{2}\right)} \quad (2.1.1)$$

El ángulo de divergencia o aceptación depende de la longitud de onda ( $\lambda$ ) y del diámetro del campo modal de la fibra [10, 11]. Para una fibra óptica monomodo estándar con *MFD* de 10.4  $\mu\text{m}$ , el ángulo de divergencia es

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi \left(\frac{MFD}{2}\right)} = \frac{1.55 \mu\text{m}}{\pi \left(\frac{10.4 \mu\text{m}}{2}\right)} = 0.095 \text{ rad} = 5.436^\circ \quad (2.1.2)$$

Otro método para calcular el ángulo de divergencia de luz láser a la salida de la fibra óptica es mediante el modelo de rayos, como se muestra en la Figura 2.1. Esta geometría ilustra las condiciones para la reflexión total interna entre el núcleo y el revestimiento. El índice de refracción del núcleo ( $n_{nucleo}$ ) debe ser mayor al índice de refracción del revestimiento ( $n_{rev}$ ) y en combinación con  $\theta$ , ocurrirá el efecto de reflexión total interna en el núcleo de la fibra óptica.



**Figura 2.1:** Trayectoria de la luz en una fibra óptica.

De la Figura 2.1, el ángulo de incidencia  $\theta_{\text{máx}}$  determina la condición límite para la reflexión total interna del rayo incidente. La apertura numérica ( $NA$ ) determina el ángulo de aceptación o de salida de una fibra óptica y se define como [12-14]

$$NA = n \text{sen} \theta_{\text{máx}} = \sqrt{n_{\text{núcleo}}^2 - n_{\text{rev}}^2} \quad (2.1.3)$$

Cuando los rayos provenientes del aire inciden en la cara de entrada de la fibra óptica, el ángulo de incidencia máximo es

$$\theta_{\text{máx}} = \arcsen \left( \frac{NA}{n} \right) = \arcsen (NA) \quad (2.1.4)$$

Los rayos con un ángulo de incidencia menor o igual a  $\theta_{\text{máx}}$  experimentan reflexión total interna en la interfase entre el núcleo de la fibra y el revestimiento y se propagan a lo largo de la fibra. Los rayos con ángulos de incidencia mayores que  $\theta_{\text{máx}}$  se refractan y se disipan en el recubrimiento de la fibra óptica [12].

Para el cono de la fibra óptica monomodo SMF-28 con apertura numérica de 0.14 se tiene que

$$\begin{aligned} \theta_{\text{máx}} &= \arcsin (NA) = \arcsin (0.14) = 0.14 \text{ rad} \\ \theta_{\text{máx}} &= 8.048^\circ \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

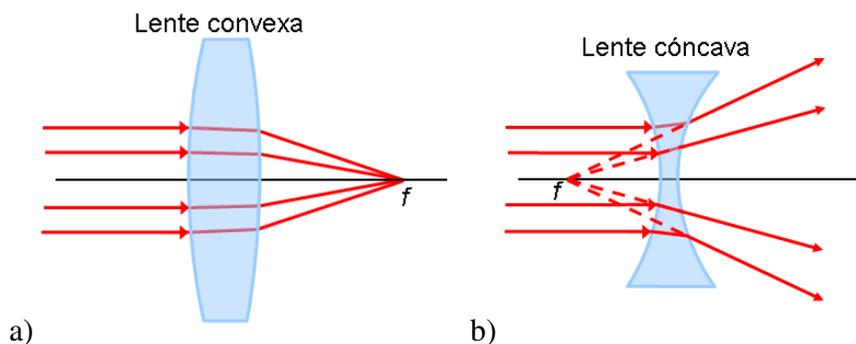
Debido a que el rayo láser emitido a la salida de la fibra óptica es divergente, se requiere de un arreglo óptico colimador del haz láser para su transmisión hacia el espacio libre.

## 2.2. Arreglo óptico transmisor

Etimológicamente, la palabra "lente" en óptica se deriva de "lēns", la palabra latina para "lenteja", que presenta una forma semejante a una lente biconvexa. Con el paso de los años, "lente" se ha convertido en un nombre genérico para un dispositivo óptico utilizado para manipular la forma de un frente de onda luminoso [15].

Las lentes son elementos ópticos que alteran la trayectoria de la luz con objeto de que un haz luminoso sea convergente, divergente o colimado. Cuando la luz incide en una interfaz entre dos medios, se refleja parcialmente hacia el medio de incidencia y se refracta en el medio hacia donde se transmite. La refracción se refiere al cambio en el ángulo de la luz incidente cuando ingresa al segundo medio. Dado que la velocidad de la luz en un medio es inversamente proporcional a su índice de refracción, se alentará o se acelerará en el medio al que entra y al mismo tiempo cambiará su dirección de propagación [16].

Una lente se fabrica normalmente con materiales como silicio fundido o vidrio óptico y sus superficies frontal y posterior presentan diversos perfiles (plano, cóncavo, convexo, etc.)

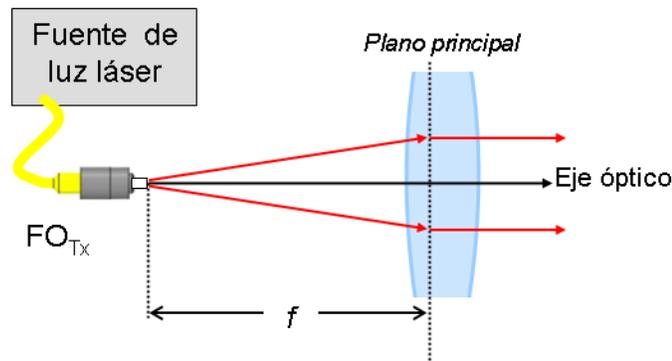


**Figura 2.2:** a) Lente convergente o convexa, b) lente divergente o cóncava.

Las lentes convergentes o convexas se denominan lentes positivas. Cuando los rayos de luz, paralelos al eje óptico, atraviesan una de estas lentes, convergen en un mismo

punto, que es el punto focal, como se muestra en la Figura 2.2a. Estas lentes son más gruesas en el centro que en los extremos. Las lentes divergentes o cóncavas se denominan lentes negativas. Cuando rayos de luz paralelos al eje óptico inciden en este tipo de lentes al atravesarlas los rayos divergen como muestra la Figura 2.2b [17].

Un arreglo óptico colimador puede constar de una o varias lentes positivas, siempre y cuando la fuente de luz esté colocada a la distancia focal, como se muestra en la Figura 2.3 [18].



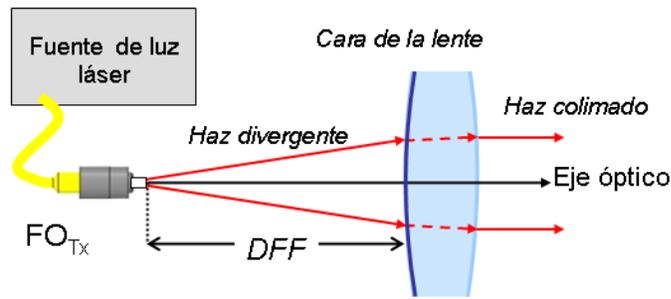
**Figura 2.3:** Distancia focal de una lente convergente.

En una lente positiva o convergente, la distancia focal ( $f$ ) es la distancia necesaria para que un haz de luz divergente en su entrada se convierte en un haz de rayos paralelos en su salida, como se ilustra en la Figura 2.3. La posición del punto focal está determinado por [18]

$$\frac{1}{f} = (n_{lente} - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{(n_{lente} - 1)d}{n_{lente}r_1r_2} \right) \quad (2.2.1)$$

donde  $n_{lente}$  es el índice de refracción del material de la lente,  $d$  es el espesor de la lente y  $r_1$  y  $r_2$  son los radios de curvatura [13].

Históricamente, la ecuación 2.2.1 se conoce como la ecuación de fabricante de lentes. Esta ecuación apareció impresa por primera vez de forma algebraica en una memoria de Edmond Halley en 1693 [19]

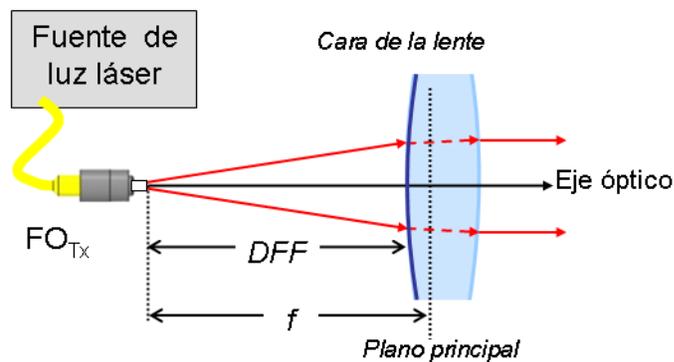


**Figura 2.4:** Distancia focal frontal de una lente convergente.

La distancia focal frontal  $DFE$  es un parámetro que caracteriza igualmente una lente y es la distancia desde el origen de un haz divergente hasta la cara frontal de la lente, como se muestra en la Figura 2.4. Esta distancia determina que la luz transmitida por la lente se convierta en un haz paralelo o colimado [13]

$$DFE = f \left( 1 + \frac{(n_{lente} - 1) d}{n_{lente} r_2} \right) \quad (2.2.2)$$

La diferencia entre las distancias focal y frontal se ilustra en la Figura 2.5. La medición de la distancia focal requiere conocer la ubicación del plano principal, localizado dentro o fuera de la lente.



**Figura 2.5:** Distancia focal y distancia focal frontal de una lente convergente.

En un arreglo óptico de varias lentes, la distancia focal se determina mediante la matriz de transferencia ABCD. Esta matriz se genera a partir de los parámetros de reflexión ( $R$ ) y de transmisión ( $T$ ) de las lentes. Para una lente cualquiera, la matriz de transferencia ABCD se forma como

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = R_2 T_1 R_1 \quad (2.2.3)$$

donde  $R_1$  y  $R_2$  son las matrices de refracción de las superficies frontal y posterior, respectivamente;  $T_1$  es la matriz de transmisión de la lente. Las matrices de refracción,  $R_1$  y  $R_2$ , están dadas como

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_{lente} - n_{aire}}{r_1} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2.4a)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_{aire} - n_{lente}}{r_2} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2.4b)$$

donde  $n_{aire}$  es el índice de refracción del aire,  $n_{lente}$  es el índice de refracción de la lente,  $r_1$  es el radio de curvatura de la superficie frontal y  $r_2$  corresponde a la superficie posterior. La matriz de transmisión  $T_1$ , está dada por

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & n_{lente} \end{bmatrix} \quad (2.2.5)$$

donde  $d$  es el espesor de la lente. En el caso de un arreglo de lentes, la matriz ABCD será el resultado de colocar en cascada las matrices de refracción y transmisión de cada lente.

Con ayuda la matriz ABCD se puede determinar de forma general la distancia focal del arreglo óptico como

$$f = -\frac{1}{C} \quad (2.2.6)$$

La distancia focal frontal se determina por

$$DFF = -\frac{D}{C} \quad (2.2.7)$$

Para el caso de una sola lente, al factorizar los términos de la matriz ABCD y con  $n_{aire} = 1$ , se tiene la expresión equivalente a la ecuación 2.2.1

$$C = -\frac{1}{f} = (n_{lente} - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{(n_{lente} - 1)d}{n_{lente} r_1 r_2} \right) \quad (2.2.8)$$

De forma similar se obtiene una expresión equivalente a la ecuación 2.2.7 para la distancia focal frontal

$$DFF = -\frac{D}{C} = f \left( 1 + \frac{(n_{lente} - 1)d}{n_{lente}r_2} \right) \quad (2.2.9)$$

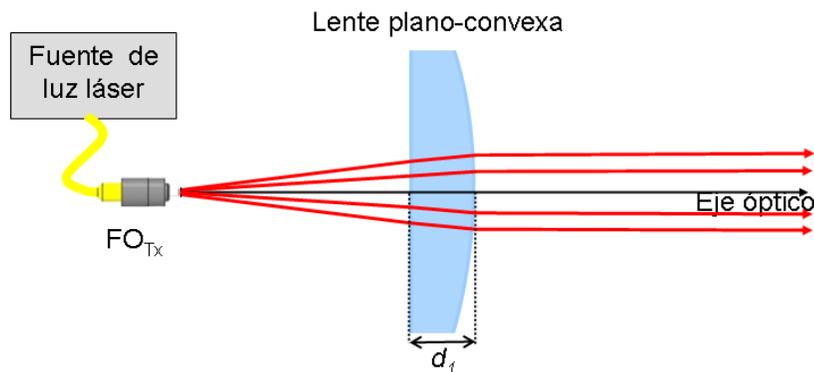
En el contexto del esquema de comunicación óptica de espacio libre en este trabajo, se requiere diseñar y realizar un arreglo óptico colimador del haz láser para su transmisión por el espacio atmosférico.

Un haz colimado concentra la potencia óptica en una sección transversal mínima, equivalente a un haz de rayos paralelos, el cual se propaga con una mínima dispersión a lo largo de la distancia entre transmisor y receptor.

Para que el haz de luz sea colimado, la fuente de luz divergente deberá estar colocada a la distancia focal del arreglo óptico transmisor [20]. Para el diseño del arreglo transmisor, se cuenta con lentes disponibles en laboratorio y es posible proponer diferentes configuraciones. En las siguientes secciones se describen tres arreglo ópticos considerados en este trabajo.

### 2.2.1. Primera configuración de arreglo óptico transmisor

Una primera alternativa de arreglo óptico colimador es utilizar una sola lente, como se muestra en la Figura 2.6.



**Figura 2.6:** Arreglo óptico transmisor configurado por una lente plano-convexa.

Esta alternativa consiste en una lente plano convexa. Las características de esta lente

se muestran en la Tabla 2.1

	Lente plano-convexa
	
$r_1$	plano
$r_2$	-30.9 mm
$d$	16.3 mm
$n_{lente}$	1.50065
$f$	61.7 mm
$DFE$	50.8 mm
$\phi$	45 mm

**Tabla 2.1:** Características de una lente utilizada en la primera configuración de arreglo óptico.

La matriz ABCD que representa la lente es dada por

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = R_2 T_1 R_1$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_{aire} - n_{lente}}{r_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & n_{lente} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_{lente} - n_{aire}}{r_1} & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz ABCD, bajo los parámetros de curvatura y espesor de la lente, se transforma en

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1.00021 - 1.50065}{\infty} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 16.3 \\ 0 & 1.50065 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1.50065 - 1.00021}{-30.9} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 10.861 \\ -0.016 & 0.824 \end{bmatrix} \quad (2.2.10)$$

Se calcula la distancia focal frontal utilizando la Ecuación 2.2.7, resultando en que la cara plana de la lente debe situarse a 50.8 mm de la cara de la fibra óptica que emite el haz láser.

La trayectoria del rayo de luz que sale de la lente es

$$\begin{bmatrix} h_{salida} \\ \theta_{salida} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{entrada} \\ \theta_{entrada} \end{bmatrix} \quad (2.2.11)$$

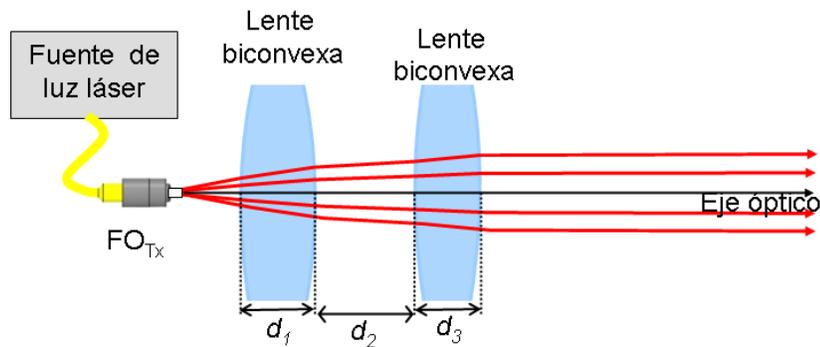
$$\begin{bmatrix} h_{salida} \\ \theta_{salida} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 10.861 \\ -0.016 & 0.824 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 7.2 \text{ mm} \\ 8.05^\circ \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} h_{salida} \\ \theta_{salida} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.7 \text{ mm} \\ -0.033^\circ \end{bmatrix} \quad (2.2.12)$$

La expresión (2.2.12) muestra que la lente plano-convexa permite colimar el haz óptico. Sin embargo, se han analizado otras configuraciones con propósito de disminuir la distancia focal del arreglo óptico en un arreglo más compacto.

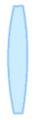
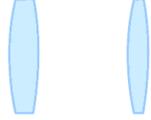
## 2.2.2. Segunda configuración de arreglo óptico transmisor

La Figura 2.7 presenta un segundo arreglo configurado con dos lentes biconvexas.



**Figura 2.7:** Arreglo óptico transmisor configurado por dos lentes biconvexas.

La Tabla 2.2 muestra los valores correspondientes a las lentes de la alternativa 2 de arreglo óptico transmisor.

	Lente biconvexa 1 	Lente biconvexa 2 	Combinación de lentes 
$r_1$	51.8 mm	51.74 mm	Separación 26 mm $n_{aire} = 1.00021$
$r_2$	-51.8 mm	-51.762 mm	
$d$	12.5 mm	10.7 mm	
$n_{lente}$	1.50065	1.50065	
$f$	53.92 mm	27.27 mm	
$DFD$	49.58 mm	25.39 mm	
$\phi$	35 mm	35 mm	

**Tabla 2.2:** Características de las lentes utilizadas en la alternativa 2 del arreglo óptico transmisor.

La matriz de transferencia que representa el segundo arreglo óptico transmisor está dada por

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = R_4 T_3 R_3 T_2 R_2 T_1 R_1 \quad (2.2.13)$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_{aire} - n_{lente}}{r_4} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{d_3}{n_{lente}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_{lente} - n_{aire}}{r_3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{d_2}{n_{aire}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_{aire} - n_{lente}}{r_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{d_1}{n_{lente}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_{lente} - n_{aire}}{r_1} & 1 \end{bmatrix}$$

Donde  $d_1$  es el espesor de la primera lente,  $d_2$  es la separación entre las lentes y  $d_3$  es el espesor de la segunda lente. Considerando los parámetros de las lentes, la matriz de transferencia ABCD es

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1.00021 - 1.50065}{-51.762} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{10.7}{1.50065} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1.50065 - 1.00021}{51.74} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{4}{1.00021} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1.00021 - 1.50065}{-51.8} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{12.5}{1.50065} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1.50065 - 1.00021}{51.8} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.275 & 36.565 \\ -0.025 & 0.254 \end{bmatrix} \quad (2.2.14)$$

La matriz ABCD proporciona la distancia focal frontal, que es de 9.99 mm. Esto significa que la primera lente se sitúa a una distancia de aproximadamente 1 cm de la fibra óptica desde la que se emite la luz láser. La trayectoria de salida del arreglo óptico del haz se calcula como

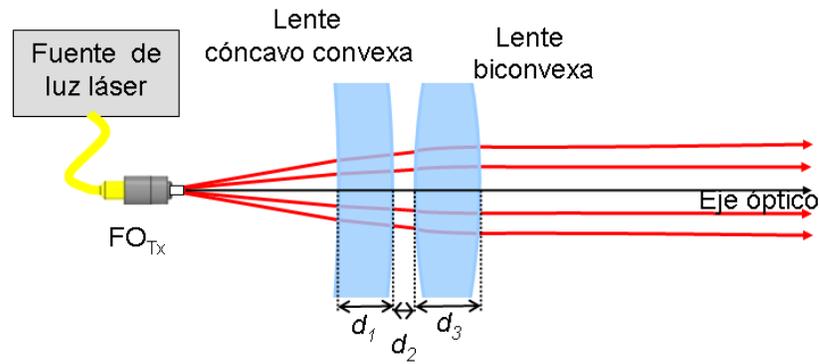
$$\begin{bmatrix} h_{salida} \\ \theta_{salida} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.275 & 36.565 \\ -0.025 & 0.254 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.41 \text{ mm} \\ 8.05^\circ \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} h_{salida} \\ \theta_{salida} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.52 \text{ mm} \\ -0.014^\circ \end{bmatrix} \quad (2.2.15)$$

De acuerdo con la expresión (2.2.15), este arreglo óptico también puede emplearse para la transmisión de señales ópticas puesto que colima la luz emitida por la fibra óptica monomodo.

### 2.2.3. Tercera configuración de arreglo óptico transmisor

La tercera configuración se esquematiza en la Figura 2.8.



**Figura 2.8:** Arreglo óptico transmisor configurado por lente cóncavo-convexa y lente biconvexa.

Para determinar la trayectoria óptica de la luz en este tercer arreglo se calculó la matriz que lo representa considerando los valores enlistados en la Tabla 2.3.

	Lente cóncava convexa	Lente bicóncava	Combinación de lentes
$r_1$	-5294 mm	51.704 mm	Separación 4 mm $n_{aire} = 1.00021$
$r_2$	-26.38 mm	-51.659 mm	
$d$	9.41 mm	10.7 mm	
$n_{lente}$	1.50065	1.50065	
$f$	53.94 mm	53.5 mm	
$DFP$	46.64 mm	49.8 mm	
$\phi$	35 mm	45 mm	

**Tabla 2.3:** Características de las lentes utilizadas en el diseño del arreglo óptico transmisor.

Utilizando los valores de curvatura, espesor e índice de refracción en el orden de la Ecuación 2.2.13, se obtiene la matriz ABCD que representa este arreglo óptico transmisor

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1.00021 - 1.50065}{-51.659} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{10.7}{1.50065} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1.50065 - 1.00021}{51.704} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{4}{1.00021} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1.00021 - 1.50065}{-26.38} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{9.41}{1.50065} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1.50065 - 1.00021}{-5294} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.735 & 14.991 \\ -0.035 & 0.646 \end{bmatrix} \quad (2.2.16)$$

En el arreglo óptico, la altura de entrada del haz de luz del láser es de 2.6 mm y el ángulo de entrada es de  $\theta_{entrada} = 8.048^\circ$ , determinada por la geometría del haz láser emitido por la fibra óptica.

Mediante estos valores geométricos de entrada y con la matriz ABCD, se calcula la trayectoria del haz de salida como

$$\begin{bmatrix} h_{salida} \\ \theta_{salida} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.735 & 14.991 \\ -0.035 & 0.646 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2.6 \text{ mm} \\ 8.05^\circ \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} h_{salida} \\ \theta_{salida} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.02 \text{ mm} \\ -0.034^\circ \end{bmatrix} \quad (2.2.17)$$

La altura o radio de salida del haz es de 4.2 mm y el ángulo tiende a cero, por lo que se considera que el haz transmitido está colimado.

#### 2.2.4. Comparación de alternativas de arreglo óptico transmisor

La condición principal para considerar un arreglo óptico transmisor es que el arreglo óptico colime el haz de luz que será transmitido en el espacio libre. Las trayectorias del haz de salida en cada alternativa se muestran en la Tabla 2.4

La Tabla 2.4 muestra una comparación entre los radios del haz colimado para cada alternativa de arreglo óptico transmisor. En cada caso, el ángulo de salida del haz tiende a cero y se considera colimado. Por lo tanto, las tres opciones cumplen con la condición de colimador de luz láser. El arreglo elegido para la transmisión óptica es la tercera configuración descrita en la sección anterior.

Se llevaron a cabo pruebas de transmisión y recepción de luz láser en el laboratorio y se encontró que transmiten toda la potencia incidente en sus entradas.

El arreglo óptico receptor se analiza en la sección siguiente. En el receptor, la luz se colecta mediante un arreglo óptico para concentrar la luz en una lente esférica que enfoca

	Radio de salida $h_{salida}$	Ángulo de salida $\theta_{salida}$
<p><b>Alternativa 1</b></p> <p>Fuente de luz láser FO<sub>Tx</sub> Lente plano-convexa Eje óptico <math>d_1</math></p>	8.7 mm	-0.033°
<p><b>Alternativa 2</b></p> <p>Fuente de luz láser FO<sub>Tx</sub> Lente biconvexa Lente biconvexa Eje óptico <math>d_1</math> <math>d_2</math> <math>d_3</math></p>	5.52 mm	-0.014°
<p><b>Alternativa 3</b></p> <p>Fuente de luz láser FO<sub>Tx</sub> Lente cóncavo convexa Lente biconvexa Eje óptico <math>d_1</math> <math>d_2</math> <math>d_3</math></p>	4.02 mm	-0.034°

**Tabla 2.4:** Comparación de la trayectoria del haz de salida de las alternativas de arreglo óptico transmisor.

la luz hacia la fibra óptica del fotodetector

### 2.3. Arreglo óptico receptor

El receptor de un sistema de comunicaciones óptico consiste esencialmente en un fotodetector, un amplificador y circuitos adicionales de procesado de señal. El arreglo óptico receptor captura la radiación luminosa incidente y la concentra en el fotodetector. Este último convierte la potencia óptica recibida en una señal eléctrica, generalmente en una corriente, que es transformada en voltaje que se amplifica para que el procesamiento electrónico demodule la información mediante la reconstrucción de pulsos, filtraje y amplificación. Puesto que el fotodetector es el elemento que transforma la señal óptica en señal eléctrica, es fundamental que la mayor cantidad de luz que ha viajado en el espacio libre incida en dicho elemento.

El arreglo óptico receptor se diseña e integra con elementos ópticos que permiten capturar la mayor cantidad de luz incidente y dirigirla hacia fotodetector. El arreglo propuesto se muestra en la Figura 2.9. Las características de las lentes utilizadas se enlista en la Tabla 2.5. En el arreglo receptor, el fotodetector se encuentra encapsulado y recibe luz a través de una fibra óptica monomodo. La óptica receptora debe captar la luz y enfocararla a la cara de entrada de la fibra óptica monomodo.

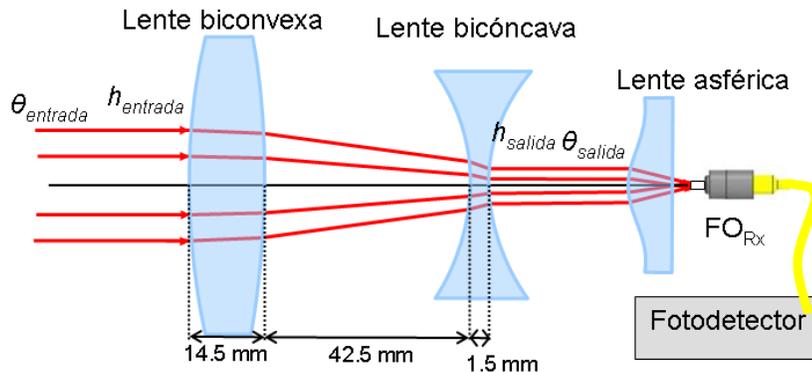
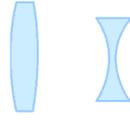


Figura 2.9: Trayectoria del haz de luz en un arreglo óptico receptor.

	Lente biconvexa	Lente bicóncava	Combinación de lentes
			
$r_1$	51.8 mm	-9.74 mm	Separación 42.5 mm $n_{aire} = 1.00021$
$r_2$	-51.8 mm	9.74 mm	
$d$	14.5 mm	1.5 mm	
$n_{lente}$	1.50065	1.7434	
$f$	54.29 mm	-6.34 mm	
$DFP$	49.22 mm	-6.76 mm	
$\phi$	35 mm	5.4 mm	

**Tabla 2.5:** Características de las lentes del arreglo óptico receptor.

El primer elemento en el arreglo óptico receptor es una lente convergente, la cual colecta una fracción de la luz que ha viajado por la atmósfera. Esta lente, que recibe un frente de onda paralelo, hace convergir la luz incidente hacia una lente bicóncava. La lente bicóncava estará colocada a la distancia focal de la lente colectora a manera de un telescopio galileano. En esta configuración, la luz transmitida por la lente divergente está colimada en un diámetro reducido que incide en una lente esférica que acopla la luz hacia una fibra óptica monomodo.

La matriz que representa el arreglo óptico receptor con base en las lentes biconvexa y bicóncava resulta del producto de sus matrices de refracción y transmisión, dada por

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.116 & 52.131 \\ -9.245 \times 10^{-5} & 8.561 \end{bmatrix} \quad (2.3.1)$$

Cuando incide un haz de luz sobre la lente biconvexa con una altura del radio transversal del haz de  $h_{entrada} = 4.02$  mm y un ángulo de cero grados, la trayectoria del haz de salida se calcula como

$$\begin{bmatrix} h_{salida} \\ \theta_{salida} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.116 & 52.131 \\ -9.245 \times 10^{-5} & 8.561 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4.02\text{mm} \\ 0^\circ \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} h_{salida} \\ \theta_{salida} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5\text{mm} \\ -0.02^\circ \end{bmatrix} \quad (2.3.2)$$

---

Lo que significa que el haz de salida de la lente bicóncava presentará un diámetro de 1 mm y un ángulo que tiende a cero, indicando que se puede considerar un haz colimado. El haz de luz de diámetro reducido incide en la lente asférica, que dirige la luz hacia la fibra óptica monomodo del fotodetector. La medición de potencia a la salida de la fibra óptica corresponde a solo un tercio de la potencia total colectada. La pérdida de potencia óptica está determinada por el acoplamiento deficiente de la lente asférica a la fibra óptica. Esto se convierte en una limitación sistemática del enlace óptico desarrollado y es un aspecto crítico que está siendo analizado para resolverse.

## 2.4. Conclusiones

La trayectoria de un haz láser, que proviene de una fibra óptica monomodo que conecta un diodo láser, es divergente; esto implica que la luz se va a dispersar a medida que se propaga. Se ha propuesto la utilización de un arreglo óptico transmisor y un arreglo óptico receptor con el fin de recuperar la cantidad máxima de luz que se ha transmitido y propagado a una distancia en la atmósfera.

El arreglo óptico transmisor colima el haz de luz divergente con el objetivo de mantener una trayectoria de la luz paralela al eje óptico. No obstante, debido a la naturaleza de la luz láser, este haz volverá a describir una trayectoria divergente al propagarse, la cual se puede calcular a través del modelo de haz gaussiano que se detalla en el capítulo siguiente.

El arreglo óptico receptor cumple la función de coleccionar la luz transmitida y hacerla incidir en un fotorreceptor. La eficacia de este arreglo óptico depende del área con el que se capta la radiación y la cantidad de luz que se hace incidir en la fibra óptica monomodo conectada al fotorreceptor.

El arreglo óptico receptor se encuentra restringido por el área de la lente que recoge la luz transmitida, por lo que puede coleccionar toda la potencia si el haz de luz tiene un diámetro transversal inferior al de la lente o se colecciona una fracción de la luz si el haz excede el tamaño de la lente. Es decir, si la distancia de propagación se incrementa, la densidad de potencia disminuye.

Los arreglos ópticos propuestos permiten la transmisión y recepción de un haz de luz concentrado que se pretende utilizar en un enlace óptico de distancias del orden de 1

---

km. Los diseños ópticos propuestos deben permitir alcanzar una distancia de transmisión determinada, con base al trazo de rayos que se ha estudiado.

## Referencias

- [1] A. K. Majumdar y J. C. Ricklin. *Free-space laser communications: principles and advances*. Springer, 2008. DOI: [10.1007/978-0-387-28677-8](https://doi.org/10.1007/978-0-387-28677-8).
- [2] H. Hemmati. *Near-Earth Laser Communications*. 1.<sup>a</sup> ed. CRC press, 2009. DOI: [10.1201/9781420015447](https://doi.org/10.1201/9781420015447).
- [3] M. J. Kidger. *Fundamental Optical Design*. Vol. PM92. SPIE PRESS, 2001. DOI: [10.1117/3.397107](https://doi.org/10.1117/3.397107).
- [4] A Nussbaum. “Modernizing the teaching of advanced geometric optics”. En: *SPIE* 1603 (1992), págs. 389-400. DOI: [10.1117/12.57869](https://doi.org/10.1117/12.57869).
- [5] Z. Sodnik y M. Sans. “Extending EDRS to Laser Communication from Space to Ground”. En: *International Conference on Space Optical Systems and Applications* 13.2 (oct. de 2012), págs. 9-12.
- [6] LightPointe. *How to Design a Reliable FSO System*. Light pointe white paper series. 2009.
- [7] *SMF-28 Ultra Optical Fiber Product Information*. Corning. URL: <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/product-information-sheets/PI-1424-AEN.pdf>.
- [8] Thorlabs. *Why is MFD an important coupling parameter for single mode fibers?* Feb. de 2020. URL: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=14203](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=14203).
- [9] A. Ghatak y K. Thyagarajan. *An Introduction to Fiber Optics*. Cambridge University Press, 1998. DOI: [10.1017/CB09781139174770](https://doi.org/10.1017/CB09781139174770).
- [10] A. M. Kowalevicz y F. Bucholtz. “Beam Divergence from an SMF-28 Optical Fiber”. En: 2006. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:27066505>.

- 
- [11] Thorlabs. *Does NA provide a good estimate of beam divergence from a single mode fiber?* Feb. de 2020. URL: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=14204](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=14204).
- [12] Thorlabs. *Guiding Light in an Optical Fiber*. URL: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=10417](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10417).
- [13] E. Hecht. *Óptica*. Pearson, 2000.
- [14] J. M. Senior y M. Y. Jamro. *Optical Fiber Communications Principles and Practice*. Ed. por 3rd. Pearson Education, 2009.
- [15] L Hazra. *Foundations of Optical System Analysis and Design*. 1.<sup>a</sup> ed. CRC Press, 2022. DOI: [10.1201/9780429154812](https://doi.org/10.1201/9780429154812).
- [16] MKS Instruments Handbook. *Principles and Applications in Photonics Technologies*. Office of the CTO. 2019. URL: <https://www.newport.com/photonics-handbook>.
- [17] D. Malacara. *Óptica básica*. 3a. Fondo de Cultura Económica, 2015.
- [18] B. K. Johnson. *Optics and Optical Instruments*. 3rd. Dover publications, 2011.
- [19] O. Darrigol. *A History of Optics: From Greek Antiquity to the Nineteenth Century*. Oxford University Press, 2012. DOI: [doi:10.1017/S0007087412001148](https://doi.org/10.1017/S0007087412001148).
- [20] K. Matsuda et al. “Beam collimation in the presence of aberrations”. En: *Optics Communications* 194.1 (2001), págs. 1-9. DOI: [10.1016/S0030-4018\(01\)01176-2](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(01)01176-2).

## Capítulo 3

---

# Propagación del haz láser utilizando el modelo de haz gaussiano

Cuando el haz de luz láser colimado se propaga en la distancia, de forma natural el haz de luz describe una trayectoria divergente. Cuando el haz diverge, la densidad de potencia de la luz por unidad de área disminuye conforme aumenta la distancia. La finalidad de este capítulo es representar la trayectoria de propagación de un haz láser en el espacio libre y modelar la potencia colectada en el arreglo óptico receptor.

A través del modelo de haz de luz gaussiano, es posible determinar el radio transversal del haz y con este valor se calcula área de distribución de la potencia de la luz transmitida en determinada distancia. El radio del haz depende de la distancia de propagación, de la longitud de onda y del radio del haz cuando se considera colimado, a través de esta información es posible estimar la potencia de la luz colectada en el área limitada por el arreglo óptico receptor.

La propagación de muchos láseres continuos se puede describir utilizando el modelo gaussiano utilizando condiciones ideales. Un haz gaussiano es un haz de luz cuyas propiedades y patrones de intensidad están dados por una función gaussiana. La expresión del haz de luz gaussiano es una solución de la ecuación de onda paraxial de Helmholtz. A continuación, se muestran las características de propagación de un haz de luz láser gaussiano [1-4].

\* La potencia de la luz se concentra principalmente dentro de un cilindro alrededor del eje del haz.

\* La distribución de intensidad en cualquier plano transversal del haz, es una función gaussiana circularmente simétrica centrada alrededor del eje del haz.

\* El ancho del haz es mínimo en la posición  $z = 0$  y gradualmente aumenta a medida que aumenta la distancia de propagación.

\* La divergencia de la propagación del haz está dada por la longitud de onda con respecto al radio de haz inicial.

---

## 3.1. Propagación del haz gaussiano

Un haz de luz gaussiano se modela como una onda paraxial monocromática que viaja a lo largo de la dirección  $z$ , modulada por una amplitud que es una función de la distancia de propagación

$$U(\vec{r}) = A_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{\rho^2}{w^2(z)}\right) \exp\left(-jkz - jk\frac{\rho^2}{2R(z)} + j\phi(z)\right) \quad (3.1.1)$$

donde  $\rho^2 = x^2 + y^2$  es la distancia transversal desde el centro del haz en el plano de transmisión,  $w_0$  es el radio mínimo del haz cuando  $z = 0$ ,  $w(z)$  es el radio transversal del haz en la distancia  $z$ ,  $R(z)$  es el radio de curvatura del frente de onda y  $\phi(z)$  es el factor de fase, el parámetro  $A_0$  es determinado como una condición inicial.

El parámetro  $w(z)$ , que corresponde al radio transversal del haz en la distancia, es un término de interés para describir el comportamiento del haz de luz al propagarse en el modelo de un haz gaussiano. Estos parámetros varían en función de la distancia de propagación  $z$ . Para explicar la transmisión y recepción de la luz, no se requieren otros parámetros, como el radio de curvatura del frente de onda ( $R(z)$ ) o la fase ( $\phi(z)$ ). Los parámetros que proporcionan información de propagación de la luz se describen a más detalle en las siguientes secciones.

### 3.1.1. Distancia de Rayleigh

Un valor de distancia recurrente en otros parámetros del modelo de luz gaussiano es la distancia de Rayleigh ( $z_R$ ), que relaciona el radio inicial del haz y la longitud de onda. Este valor indica la distancia en la que el haz de luz se considera colimado y después de esta distancia se considera divergente. La distancia de Rayleigh se representa como [3]

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (3.1.2)$$

Si el radio inicial del haz aumenta, la distancia de Rayleigh también se incrementa.

En el caso de un haz infrarrojo colimado de longitud de onda de 1550 nm y radio de

haz 4.02 mm se puede calcular la distancia de Rayleigh como

$$z_R = \frac{\pi(0.00402 \text{ m})^2}{1550 \times 10^{-9} \text{ m}} = 32.7 \text{ m} \quad (3.1.3)$$

Por lo que, a lo largo de la distancia de Rayleigh de 32.7 m, el haz se considera colimado. El trayecto del haz de luz se representa en la Figura 3.1 a una distancia de 1 km. Es notable que después de la distancia de Rayleigh, la trayectoria del haz se torna divergente.

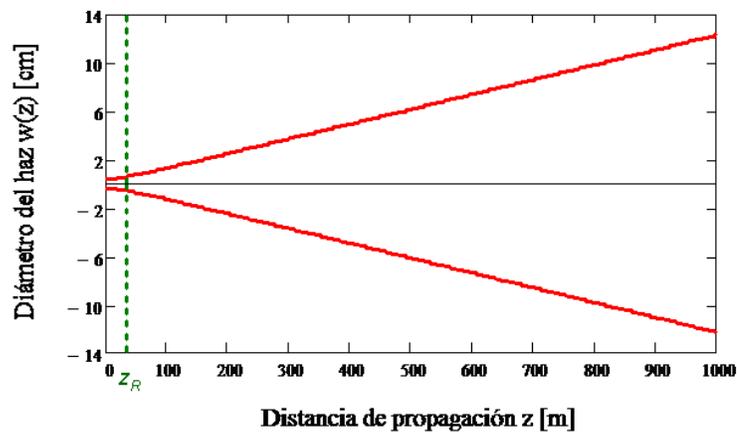


Figura 3.1: Gráfica de propagación del haz gaussiano con respecto a la distancia  $z$ .

### 3.1.2. Radio del haz

La relación del radio del haz con respecto a la distancia de propagación de la luz en  $z$  está dada por

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (3.1.4)$$

El radio mínimo es  $w_0$  cuando la distancia de propagación es  $z = 0$ . En la Figura 3.1 se grafica el cambio del radio del haz  $w$  con respecto a la distancia  $z$  para el caso de luz colimada de longitud de onda de 1550 nm y un radio inicial  $w_0$  de 4.02 mm. En la Tabla 3.1 se muestran valores del diámetro del haz ( $2w(z)$ ) en diferentes distancias de propagación.

Distancia $z$	Diámetro del haz
0 m	8.04 mm
1 m	8.044 mm
5 m	8.133 mm
100 m	25.829 mm
300 m	74.076 mm
500 m	122.994 mm
1000 m	245.594 mm

**Tabla 3.1:** Diámetro transversal del haz de luz en diferentes distancias de propagación, donde  $w_0 = 4.02$  mm y  $\lambda = 1550$  nm.

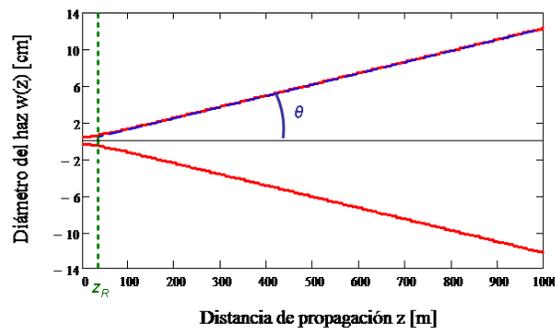
Cuando  $z = z_R$ , el radio del haz alcanza el valor  $\sqrt{2}w_0$ , en el caso del ejemplo, el radio es  $w(z_R) = 5.675$  mm o diámetro  $2w(z_R) = 10.370$  mm.

### 3.1.3. Haz divergente

Cuando el haz de luz se transmite una distancia mayor que la distancia de Rayleigh, describe una trayectoria divergente con un ángulo  $\theta$  como se muestra en la Figura 3.2. Cuando  $z \gg z_R$ , el radio del haz,  $w(z)$ , se incrementa con respecto a  $z$ , formando un cono de luz con un ángulo  $\theta$  que se puede escribir como

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (3.1.5)$$

Un radio  $w_0$  grande o una longitud de onda pequeña son necesarios para crear un haz altamente direccional. Sin embargo, los elementos atmosféricos atenúan la amplitud de la luz para longitudes de onda menores.



**Figura 3.2:** Ángulo de divergencia del haz gaussiano.

---

En el caso del haz láser colimado en laboratorio, donde se tiene una longitud de onda de 1550 nm y un radio inicial de 4.02 mm, la divergencia del haz es

$$\theta = \frac{1550 \times 10^{-9} \text{ m}}{\pi(0.00402 \text{ m})} = 1.227 \times 10^{-4} \text{ rad} = 0.007^\circ \quad (3.1.6)$$

Lo que significa que, después de la distancia de Rayleigh, el haz comenzará a divergir con un ángulo de  $0.007^\circ$ .

### 3.1.4. Intensidad óptica

La intensidad es la potencia transferida por unidad de área y se mide en watts por metro cuadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), donde el área se mide en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la energía. La intensidad óptica de un haz gaussiano está dada como

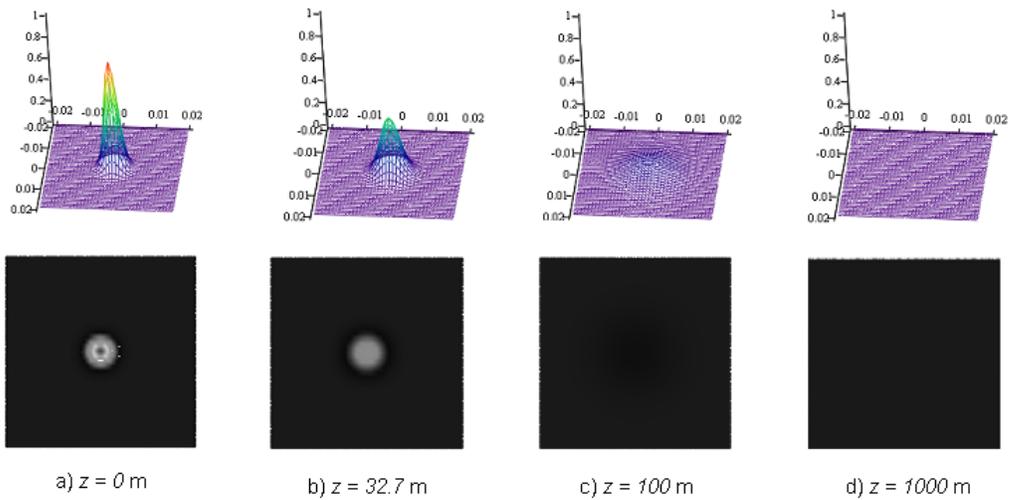
$$I(\rho, z) = I_0 \left( \frac{w_0}{w(z)} \right)^2 \exp \left( -\frac{2\rho^2}{w^2(z)} \right) \quad (3.1.7)$$

La intensidad es una función que depende de la posición,  $z$ , y de la distancia radial transversal desde el centro del haz  $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$ , y donde

$$I_0 = \frac{2P_0}{\pi w_0^2} \quad (3.1.8)$$

con  $P_0$  como la potencia inicial transmitida y con distribución de intensidad es una función gaussiana de distancia radial  $\rho$ . La función gaussiana tiene un valor máximo cuando  $\rho = 0$ , y decrece cuando  $\rho$  se incrementa. En la Figura 3.3 se muestran unos ejemplos de la gráfica de intensidad en diferentes distancias de propagación.

Cuando el haz recorre una distancia, su intensidad máxima disminuye, sin embargo, su energía se conserva contenida en el área que forma el radio  $w(z)$  [1-4], es decir, cuando mayor es la distancia de propagación el diámetro del haz se incrementa, pero la energía se conserva distribuyéndose en el área transversal del haz de luz.



**Figura 3.3:** Diagrama de perfil de intensidad de un haz gaussiano normalizado como función de la distancia radial en diferentes distancias de propagación.

### 3.1.5. Potencia óptica

La potencia óptica total del haz de luz es la integral de la intensidad óptica en un plano transversal de la distancia  $z$  dada como

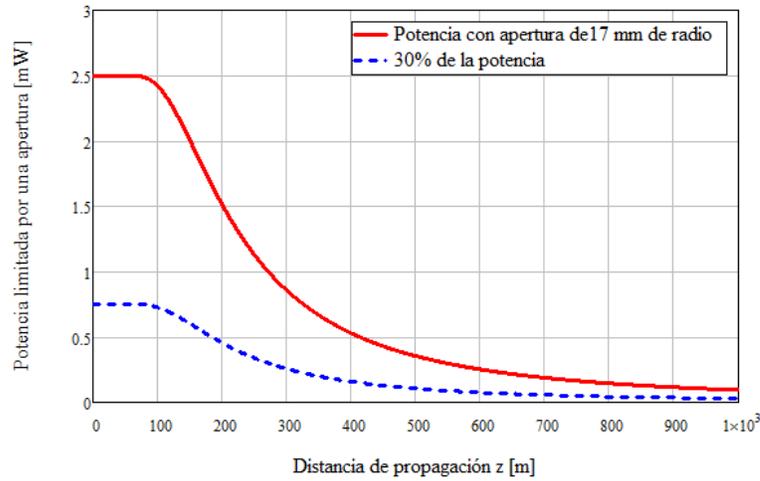
$$P = \int_0^{\infty} I(\rho, z) 2\pi\rho d\rho = \frac{I_0\pi w_0^2}{2} \quad (3.1.9)$$

Por tanto, la potencia del haz es la mitad de la intensidad máxima multiplicada por el área del haz. El resultado es independiente de  $z$ . Sin embargo, para calcular la potencia en un área finita como una apertura, o en el caso de este trabajo de tesis, para calcular la potencia de luz que puede coleccionar la lente convexa del arreglo óptico receptor, se calcula la integral entre 0 y  $r$ , donde  $r$  es el radio del área circular que se quiere calcular o el radio de la lente colectora, entonces la potencia está dada como [5]

$$P(r, z) = P_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2r^2}{w(z)^2}\right) \right] \quad (3.1.10)$$

Para el caso del haz de luz colimado con el que se ha trabajado en laboratorio, se usa un radio de apertura que corresponde al radio de la lente colectora del arreglo óptico receptor, siendo este de  $r = 17$  mm, y tomando como potencia inicial  $P_0 = 2.5$  mW se

puede esperar una medición de potencia que se muestra en la gráfica de la Figura 3.4



**Figura 3.4:** Línea roja continua corresponde a la gráfica de la potencia del haz en una apertura de 17 mm de radio. La línea azul punteada representa el 30% de la potencia esperada en la salida de la fibra óptica del sistema óptico receptor.

De la Figura 3.4 se observa que la potencia que capta la lente permanece constante hasta que el radio del haz ( $w(z)$ ) supera el radio de la lente, a partir de esa distancia la potencia disminuye.

En la Tabla 3.2 se muestran valores de la potencia en diferentes distancias con apertura de la lente de 17 mm de radio y potencia inicial transmitida de 2.5 mW. En la columna derecha se presentan valores posibles en relación con las mediciones llevadas a cabo experimentalmente en el laboratorio.

Distancia z	Potencia	30% de la potencia
0 m	2.5 mW	750 $\mu$ W
1 m	2.5 mW	750 $\mu$ W
5 m	2.5 mW	750 $\mu$ W
100 m	2.4 mW	726 $\mu$ W
300 m	0.86 mW	257 $\mu$ W
500 m	354 $\mu$ W	106 $\mu$ W
1000 m	94 $\mu$ W	28 $\mu$ W

**Tabla 3.2:** Cálculo de valores de potencia con respecto a la distancia z para  $P_0 = 2.5$  mW

---

## 3.2. Propagación de un haz gaussiano en la atmósfera

Cuando la luz se propaga a través del espacio libre o la atmósfera, puede ser afectada por una turbulencia óptica, provocando variaciones aleatorias en la trayectoria de la luz. La calidad de la potencia del haz en el receptor se deteriora y comienza a dividirse en regiones de intensidad. Para un camino óptico suficientemente largo o un canal de propagación con una notoria turbulencia óptica, la pérdida en la calidad del haz en el receptor provoca regiones aleatorias y fluctuantes de baja o nula intensidad de señal. Además, al propagarse un haz de luz láser representado como un haz gaussiano, el ancho del haz sufre cambios, estas variaciones son explicadas en este capítulo.

### 3.2.1. Propagación de un haz gaussiano en turbulencia óptica

A través de la turbulencia óptica, la trayectoria del haz varía manteniendo la mayor cantidad de luz dentro de un radio. El radio de la amplitud de campo,  $w(z)$ , de un haz coherente ahora se expresa como

$$w_{\zeta}(z) = w_0 \sqrt{1 + \zeta \left( \frac{z}{z_R} \right)^2} \quad (3.2.1)$$

donde  $\zeta$  es el parámetro dado como

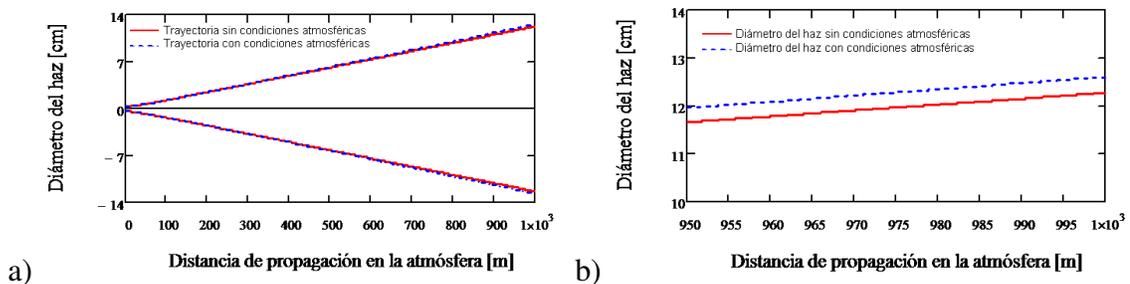
$$\zeta = \zeta_s + \frac{2w_0^2}{\rho_0^2}, \quad (3.2.2)$$

el parámetro  $\zeta$  es llamado parámetro de coherencia global y es una medida del grado de coherencia de la luz a lo largo de la propagación del haz, es decir, es un parámetro que determina relación de fase constante del frente de onda de la luz. El término  $\zeta_s$  es el grado de coherencia espacial parcial del emisor láser, donde el valor  $\zeta_s = 1$  describe un haz coherente y  $\zeta_s > 1$  es un haz parcialmente coherente. El parámetro  $\rho_0$  es la longitud de coherencia de una onda esférica propagándose en turbulencia y está dado como

$$\rho_0(z) = (0.55C_n^2 k^2 z)^{-3/5} \quad (3.2.3)$$

en donde  $C_n^2$  es llamado parámetro de estructura del índice de refracción, que describe la fuerza de la turbulencia atmosférica [6-8]. Este parámetro es calculado con datos ambientales locales usando el modelo PAMELA. Para calcular el parámetro de estructura del índice de refracción son necesarios valores atmosféricos y de posición locales como coordenadas, horario, temperatura, presión atmosférica, condiciones de nubosidad y velocidad del viento. Los valores utilizados fueron obtenidos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico, estación Cholula; de la estación meteorológica El Capricho localizada en el Aeropuerto Internacional Hermanos Serdán y la estación meteorológica de Puebla de Zaragoza localizada en las instalaciones de la Comisión Nacional del Agua.

La Figura 3.5 se muestra el efecto del aire en la trayectoria de propagación del haz láser. Se calculó el parámetro de estructura del índice de refracción para el día 263, correspondiente al martes 20 de noviembre del año 2018 a las 13:00 hrs, siendo este  $C_n^2 = 5.456 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  con condiciones atmosféricas de viento de 2.2 m/s, nubosidad de 3/8, presión atmosférica de 788.8 mbar y temperatura 22.8 °C en latitud 19.032456 y longitud 98.316454 (Santa María Tonantzintla, Puebla); por lo que  $\zeta = 1.055$ .



**Figura 3.5:** a) Comparación de propagación de la luz en el vacío y en atmósfera. b) CComparación de propagación de la luz en el vacío y en atmósfera entre las distancias de 950 y 1000 m

La Figura 3.5a presenta una comparación entre la trayectoria de la luz en condiciones atmosféricas y sin ellas. En la Figura 3.5b se presenta el radio del haz en una distancia cercana a 1 km, donde la dispersión debido a la atmósfera es más clara. En la distancia de 1 km, el radio del haz de luz en condiciones atmosféricas es 3.3 mm mayor que radio del haz sin condiciones atmosféricas.

La diferencia de la trayectoria del haz de luz no es significativa en condiciones atmosféricas estables; sin embargo, en otras localidades, como en alta mar, las condiciones atmosféricas son variables.

La potencia colectada en el arreglo óptico receptor se ve influenciada por la turbulencia óptica y esta cambia como

$$P(r, z) = P_0 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{2r^2}{w_\zeta(z)^2} \right) \right] \quad (3.2.4)$$

Cuando el haz recorre una distancia con turbulencia óptica, la potencia se concentra en una área transversal mayor en comparación del área que sería sin condiciones atmosféricas, lo que provoca que disminuya la potencia recibida. En la Tabla 3.3 se compara la potencia que recibe una lente de 17 cm de radio en diferentes distancias de propagación.

Distancia $z$	Potencia	30% de la potencia
0 m	2.5 mW	750 $\mu$ W
1 m	2.5 mW	750 $\mu$ W
5 m	2.5 mW	750 $\mu$ W
100 m	2.4 mW	726 $\mu$ W
300 m	0,85 mW	255 $\mu$ W
500 m	346 $\mu$ W	103 $\mu$ W
1000 m	89 $\mu$ W	26 $\mu$ W

**Tabla 3.3:** Cálculo de valores de potencia con respecto a la distancia  $z$  en condiciones atmosféricas para  $P_0 = 2.5$  mW

Al comparar la Tabla 3.3 con la Tabla 3.2 se nota que hay disminución de la detección de la potencia, pero no es una variación significativa, ya que no son condiciones atmosféricas extremas. Así pues, es viable llevar a cabo un enlace óptico en el INAOE y sus cercanías, dado que la atenuación por condiciones atmosféricas no tiene implicaciones severas.

### 3.3. Conclusiones

Un haz láser colimado que se propaga en el espacio libre presenta un comportamiento de dispersión al propagarse. El modelo de onda de un haz gaussiano representa con mayor precisión las variaciones que sufre la luz láser durante su propagación. El cambio más

---

significativo que sufre el haz de luz al propagarse es el aumento del diámetro transversal del haz, lo que reduce la densidad de potencia por área. Así pues, la cantidad de luz colectada cambia proporcionalmente en función de la distancia.

Al enviar y recibir la luz en una distancia, la potencia transmitida se verá restringida por el área de la lente del arreglo óptico que recibe la luz. El modelo del haz gaussiano posibilita calcular la cantidad de potencia que puede ser colectada en diferentes distancias de propagación.

La atmósfera es un entorno que puede experimentar alteraciones ambientales que afectan la trayectoria de la luz en forma aleatoria durante su propagación. El impacto de la variación atmosférica puede alterar la potencia de la luz recibida, sin embargo, en distancias de 1 km y en condiciones atmosféricas estables no se genera una pérdida de potencia significativa.

## Referencias

- [1] A. K. Majumdar y J. C. Ricklin. *Free-space laser communications: principles and advances*. Springer, 2008. DOI: [10.1007/978-0-387-28677-8](https://doi.org/10.1007/978-0-387-28677-8).
- [2] H. Kaushal, V. K. Jain y S. Kar. *Free Space Optical Communication*. 1.<sup>a</sup> ed. Springer, 2017. DOI: [10.1007/978-81-322-3691-7](https://doi.org/10.1007/978-81-322-3691-7).
- [3] A. T. Friberg y R. J. Sudol. “Propagation parameters of Gaussian Schell-model beams”. En: *Optics Communications* 41.6 (mayo de 1982), págs. 383-387. DOI: [10.1016/0030-4018\(82\)90161-4](https://doi.org/10.1016/0030-4018(82)90161-4).
- [4] B. Saleh y M. Teich. *Fundamental of Photonics*. 2nd. Canada Wiley Interscience, jun. de 2007. DOI: [10.1002/0471213748](https://doi.org/10.1002/0471213748).
- [5] *Gaussian Beam Optics*. Technical notes. Melles Griot y Newport. URL: <https://web.archive.org/web/20160304031525/http://www.pamu.edu/courses/2010fall/phy431/PostNotes/PHY431-Notes-GaussianBeamOptics.pdf>.
- [6] J. C. Ricklin y F. M. Davidson. “Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser Communication”. En: *J. Opt. Soc. Am. A* 19.9 (2002), págs. 1794-1802. DOI: [10.1364/JOSAA.19.001794](https://doi.org/10.1364/JOSAA.19.001794).

- 
- [7] R. Arockia. *Free Space Optical Communication: System Design, Modeling, Characterization, and Dealing With Turbulence*. DE GRUYTER, ene. de 2016, pág. 34. DOI: [10.1515/9783110452617](https://doi.org/10.1515/9783110452617).
- [8] E. Oh et al. “Estimating Optical Turbulence Using the PAMELA Model”. En: *Free-Space Laser Communications IV, Proc. SPIE 5550* (oct. de 2004), págs. 256-266. DOI: [10.1117/12.561481](https://doi.org/10.1117/12.561481).

# Capítulo 4

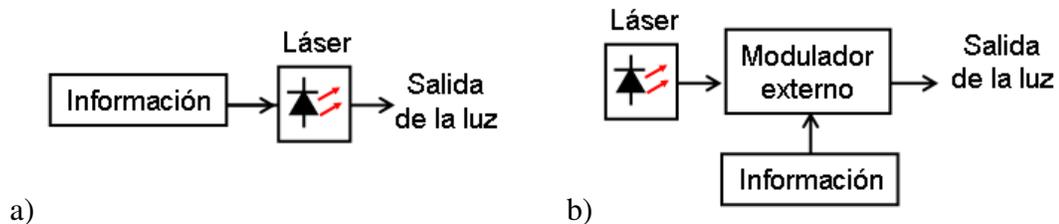
---

## Esquema optoelectrónico transmisor-receptor

Un esquema de comunicaciones tiene por objetivo transmitir información entre un emisor y un receptor separados por una cierta distancia. La información proviene de fuentes de información: sonido, imagen, datos, señales biomédicas, señales meteorológicas o cualquier forma de señal analógica, discreta o digital. En un enlace de comunicaciones ópticas por espacio libre, la información modula un haz luminoso, el cual se transmitirá por la atmósfera o el espacio abierto.

La modulación de luz se realiza mediante dos maneras alternativas: a) por modulación directa de la corriente de una fuente emisora de luz, la cual puede ser un láser semiconductor o un diodo emisor de luz; b) mediante modulación externa, utilizando un modulador electroóptico. La técnica de modulación directa de la corriente de la fuente óptica es simple y de baja complejidad en componentes y circuitería. Las técnicas de modulación externas incluyen la modulación electroóptica o electro-absorción; estas permiten una mayor velocidad y una menor distorsión de modulación, pero requieren de componentes especiales y costosos.

En un sistema de comunicación óptica basado en la modulación directa, la información modula la corriente de emisión láser, como se muestra en la Figura 4.1a. La modulación externa se ilustra en la Figura 4.1b, la señal de información se aplica a un modulador electroóptico que la imprime en la luz que viaja por el dispositivo.

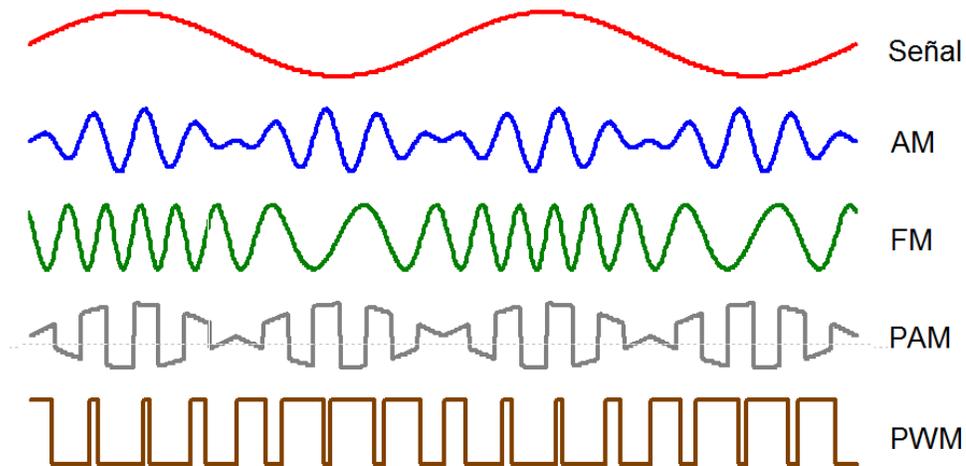


**Figura 4.1:** Esquema de modulación de la luz a) de forma directa y b) de forma indirecta.

Las técnicas comúnmente utilizadas para modular una portadora eléctrica son modulación de amplitud (AM), modulación de frecuencia (FM), modulación de fase (PM), modulación de amplitud de pulso (PAM), modulación de ancho de pulso (PWM),

---

modulación por posición de pulsos (PPM), modulación digital de amplitud (OOK), modulación por corrimiento de frecuencia (FSK), modulación por desplazamiento de fase (PSK), entre otras [1-6]. Algunas de estas modulaciones se muestran en la Figura 4.2.



**Figura 4.2:** Diagrama de diversas modulaciones.

Las modulaciones electrónicas se convierten en modulaciones ópticas mediante modulación directa de la potencia óptica emitida por la fuente luminosa.

## 4.1. Tipos de modulación

En el diseño de un sistema de comunicación óptica, la técnica de modulación impresa en la portadora óptica será enviada por el transmisor a manera que el receptor pueda recuperarla eficientemente. En esta sección se describen algunas de las técnicas de modulación empleadas en transmisión óptica.

### 4.1.1. Modulación de intensidad

En comunicaciones ópticas, las diferentes modulaciones eléctricas se convierten en modulación de intensidad óptica cuando se varía la corriente de emisión de una fuente luminosa.

#### 4.1.1.1. Modulación en amplitud (AM)

La modulación en amplitud (AM) se produce cuando la amplitud instantánea de la señal portadora  $u(t)$  cambia proporcionalmente con la señal base de información  $m(t)$ . La Figura 4.3 muestra las formas de onda de la señal portadora, la señal de información y la señal modulada AM

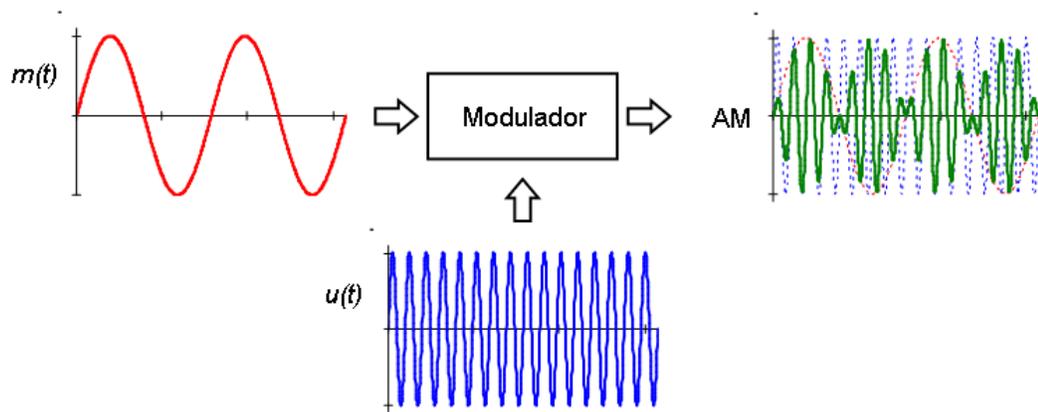
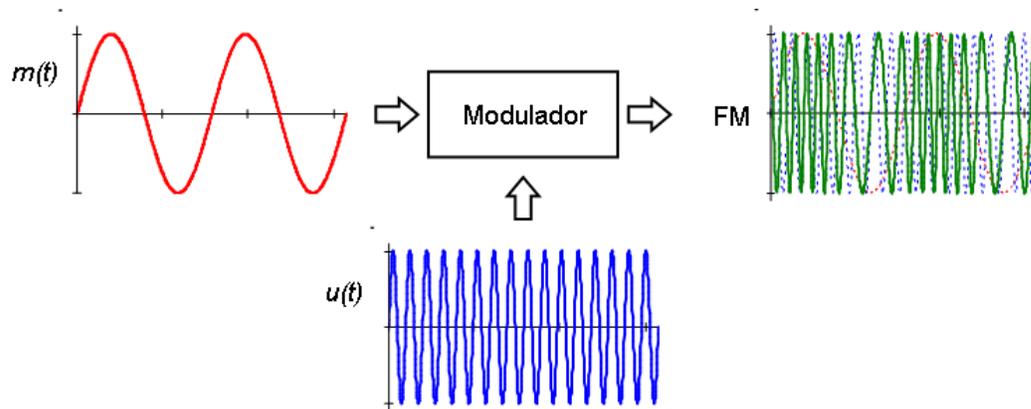


Figura 4.3: Esquema de modulación de amplitud.

En la modulación AM, la información se imprime en la amplitud de la señal portadora. La modulación AM se convierte en una señal óptica que se transmite por la atmósfera. A lo largo de la distancia de propagación, la señal óptica se atenúa, lo que ocasiona de manera directa la pérdida de información cuando se utiliza esta técnica de modulación.

#### 4.1.1.2. Modulación de frecuencia (FM)

Si la frecuencia de la onda portadora varía de forma lineal con una señal de información (Figura 4.4), se genera la técnica de FM. La FM es un método que tiene ventajas sobre el método de modulación AM, en función que la información no se imprime en la amplitud de la portadora. La modulación de frecuencia es más inmune a la atenuación de la señal y la información se recupera con mayor calidad, en comparación con AM.



**Figura 4.4:** Esquema de modulación de frecuencia.

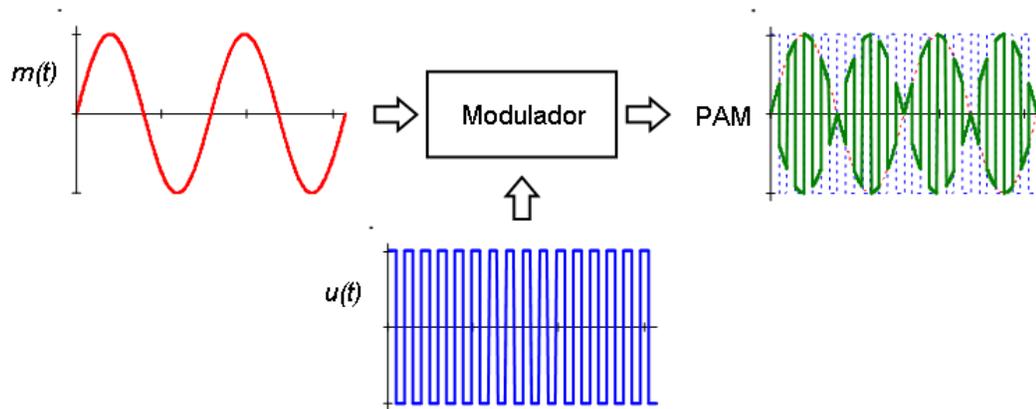
La señal FM se convierte en señal óptica mediante la variación de la corriente de la fuente de emisión luminosa.

## 4.1.2. Subportadora de pulsos

En los sistemas de modulación por pulsos, la portadora es una sucesión periódica de pulsos eléctricos. La señal de información es impresa en la portadora de pulsos al variar algunos parámetros como su amplitud, su duración o su frecuencia.

### 4.1.2.1. Modulación por amplitud de pulsos (PAM)

La modulación por amplitud de pulsos es representada por un tren de pulsos cuya amplitud varía en correspondencia con la amplitud de la señal de información (Figura 4.5).



**Figura 4.5:** Esquema de modulación de amplitud de pulso.

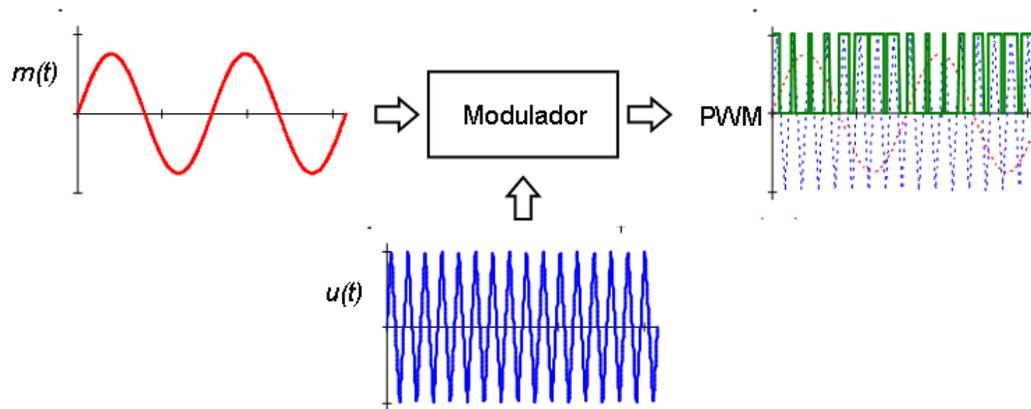
La modulación PAM se convierte en pulsos ópticos modulados en intensidad mediante la variación de la corriente en las fuentes ópticas láser o diodos emisores de luz.

### 4.1.3. Subportadora temporal de pulsos

En la modulación temporal de pulsos, la información se imprime en el ancho, posición o frecuencia del pulso, en función de la amplitud de la señal de información [5]. La modulación temporal de pulsos es inmune a los efectos no lineales del circuito electrónico y de los emisores ópticos en los sistemas de transmisión.

#### 4.1.3.1. Modulación PWM

La modulación de ancho de pulsos (PWM, pulse width modulation) es una técnica de modulación que presenta una secuencia de pulsos rectangulares cuya duración o ancho depende del valor de amplitud de la señal moduladora, como se ilustra en la Figura 4.6



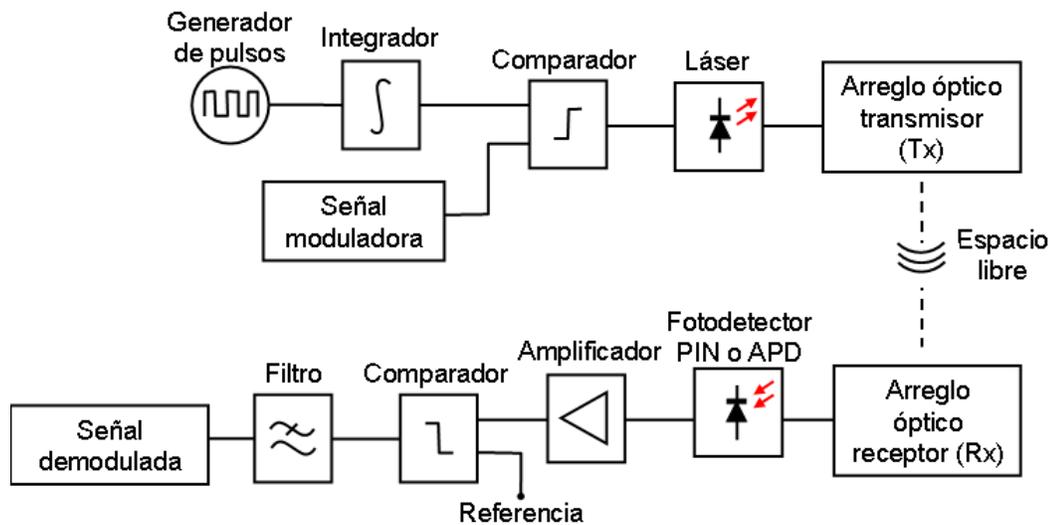
**Figura 4.6:** Esquema de modulación temporal de ancho de pulsos.

En este trabajo se emplea la técnica PWM, ya que la atenuación de los pulsos al propagarse en la atmósfera no afecta la información al estar contenida en el ancho del pulso y no en su amplitud. La modulación se imprime en la duración del pulso en función de la amplitud de la señal de información [4, 5]. La señal PWM modula la corriente de inyección de un diodo láser para convertirla en la señal óptica transmitida.

## 4.2. Esquema de transmisión óptica utilizando modulación PWM

La modulación PWM es la técnica de modulación temporal de pulsos (PTM, pulse time modulation) más simple y fácil de realizar usando circuitería electrónica de baja complejidad. Para poder transmitir o recibir pulsos PWM, es necesario contar con el ancho de banda necesario, cuyo valor depende esencialmente de la duración mínima del pulso.

El esquema de la Figura 4.7 muestra el diagrama a bloques de un sistema de comunicación óptica por espacio libre basado en modulación PWM. En el esquema de generación PWM, un tren de pulsos pasa por un integrador, el cual produce una señal triangular  $u(t)$ .



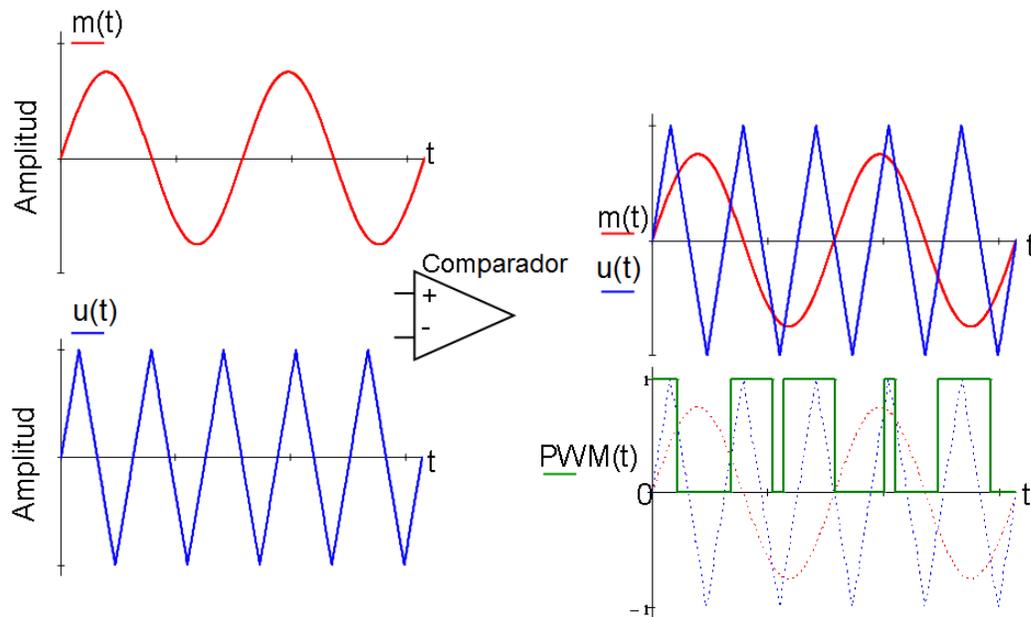
**Figura 4.7:** Esquema de generación y transmisión de señal PWM y recuperación de señal modulada.

La modulación PWM resulta de la comparación de las amplitudes de la señal de información  $m(t)$  y una onda triangular  $u(t)$ . El comparador genera un tren de pulsos eléctricos definidos por

$$PWM(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } m(t) < u(t) \\ 0 & \text{si } m(t) > u(t) \end{cases} \quad (4.2.1)$$

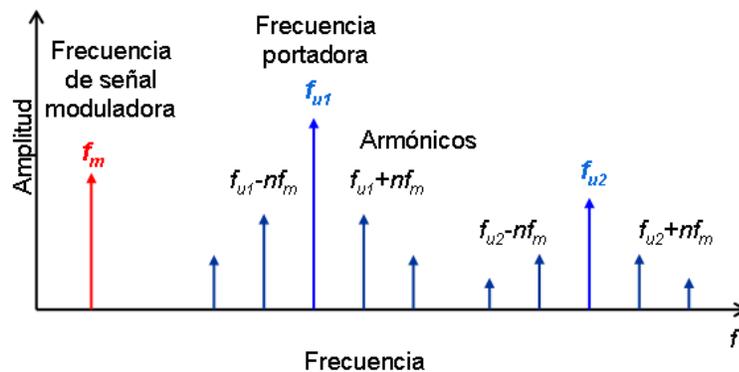
La frecuencia de la subportadora triangular debe ser superior a la frecuencia máxima de la señal de información. Un circuito comparador genera un pulso cuya duración depende del tiempo en que la amplitud de señal de información está por encima o por debajo del valor medio de la señal triangular. El comparador genera pulsos, la duración o ancho del pulso es máximo para el valor máximo de la información; el valor es mínimo para los valores mínimos de la misma (Figura 4.8)

Conforme a la descripción anterior, la señal PWM es un tren de pulsos eléctricos de amplitud constante y la información está impresa en la duración de cada pulso. La señal PWM modula la corriente de inyección de un diodo láser para convertirla en la señal óptica de transmisión. [7, 8]. De acuerdo a la Figura 4.7, un arreglo óptico transmisor permite generar un haz óptico colimado que viajará por el espacio libre.



**Figura 4.8:** Generación de la modulación PWM. La señal moduladora (senoidal roja) se compara con una onda triangular (Azul) y se genera la señal PWM (verde).

La distribución espectral de la señal PWM se muestra en la Figura 4.9. El espectro incluye la señal de información y una serie infinita de armónicos de la frecuencia portadora y modulada por las componentes espectrales de la información.



**Figura 4.9:** Espectro de frecuencias de una señal PWM.

A la distancia de propagación, la luz es colectada por el arreglo óptico receptor, el cual permite concentrar la luz recibida a la entrada de una fibra óptica que la guía al fotodetector. El fotodetector convierte la señal óptica pulsos eléctricos. El receptor está integrado por un amplificador de alta ganancia y un comparador que permite regenerar

---

los pulsos PWM. Los pulsos regenerados permiten recuperar la información mediante un simple filtraje pasa-bajas.

### 4.3. Tipos de receptores ópticos

La función del receptor óptico es convertir la señal óptica en eléctrica para después ser amplificada, reconstruida y demodulada para recuperar la información transmitida. El receptor de un enlace de comunicaciones ópticas consiste esencialmente de un fotodetector, un amplificador y circuitos de demodulación y filtraje con objeto de recuperar la información enviada desde el transmisor. Los receptores ópticos utilizan generalmente fotodetectores tipo PIN o APD

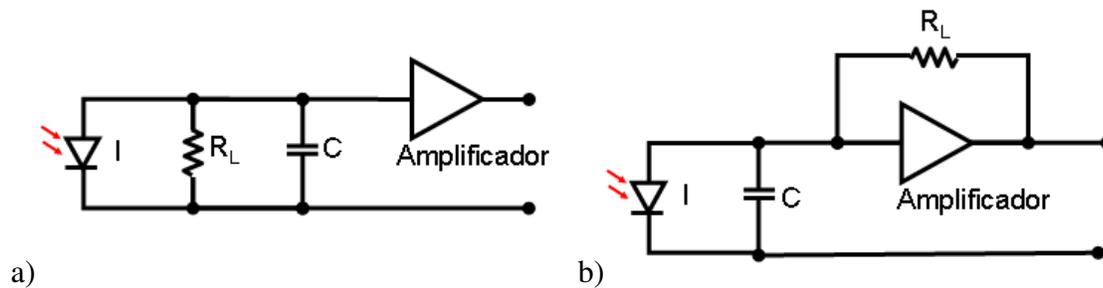
Los receptores ópticos tipo PIN son dispositivos semiconductores compuestos de tres capas, una capa de tipo P, una capa de semiconductor intrínseco y una capa tipo N. La luz incidente genera pares electrón-hueco en la región intrínseca de la unión, produciendo una fotocorriente proporcional a la potencia óptica recibida.

Los fotodetectores APD se basan en el fenómeno de ionización por impacto, según el cual, un portador (electrón o hueco), al ser acelerado por un campo eléctrico intenso para adquirir suficiente energía cinética y por impacto sobre los átomos de la red cristalina origina un par electrón-hueco adicionales. A su vez, los portadores originados participan en el mismo proceso multiplicador. Esta multiplicación o amplificación mejora la sensibilidad de detección [9].

En el receptor óptico, el fotodetector convierte la luz en fotocorriente y el amplificador la transforma en un voltaje proporcional a la potencia óptica recibida. Las dos configuraciones más usuales son receptores ópticos de alta impedancia y de transimpedancia, como se muestra en la Figura 4.10.

Un receptor de alta impedancia depende de la resistencia de carga ( $R_L$ ). Una resistencia de carga grande reduce el ruido térmico y mejora la sensibilidad del receptor. El principal inconveniente del amplificador de alta impedancia es que su ancho de banda depende de  $R_L$ . Existe un compromiso entre la resistencia de carga y el ancho de banda.

En la Figura 4.10b se muestra el esquema de un amplificador de transimpedancia. En este amplificador, la resistencia de carga,  $R_L$ , está conectada como una resistencia de



**Figura 4.10:** Receptores ópticos básicos, a) alta impedancia y b) transimpedancia.

retroalimentación de la salida a la entrada del amplificador. Este amplificador proporciona una configuración que tiene alta sensibilidad y mayor ancho de banda. Su rango dinámico es mejor en comparación con el amplificador de alta impedancia. Los amplificadores de transimpedancia se utilizan a menudo en receptores ópticos debido a sus características mejoradas [6].

El enlace óptico de espacio libre desarrollado en este trabajo emplea un receptor óptico de alta impedancia con un ancho de banda de 100 MHz, lo que resulta suficiente para regenerar la alta modulación PWM y recuperar la información con alta calidad cuando se utiliza un fotodetector APD.

## 4.4. Conclusiones

En este capítulo se ha descrito la configuración de un enlace óptica de espacio libre basado en la transmisión de información impresa en modulación PWM.

Un arreglo óptico transmisor genera un haz de luz colimado con modulación PWM que se propaga por el espacio libre. El arreglo óptico receptor colecta la luz y la conduce a una fibra óptica conectada al fotodetector PIN y APD. La señal óptica se convierte en energía eléctrica que se demodula para la recuperación de la señal.

Este esquema propuesto se ha realizado experimentalmente y ha sido probado en laboratorio. La configuración experimental y pruebas se describen en el capítulo siguiente.

---

## Referencias

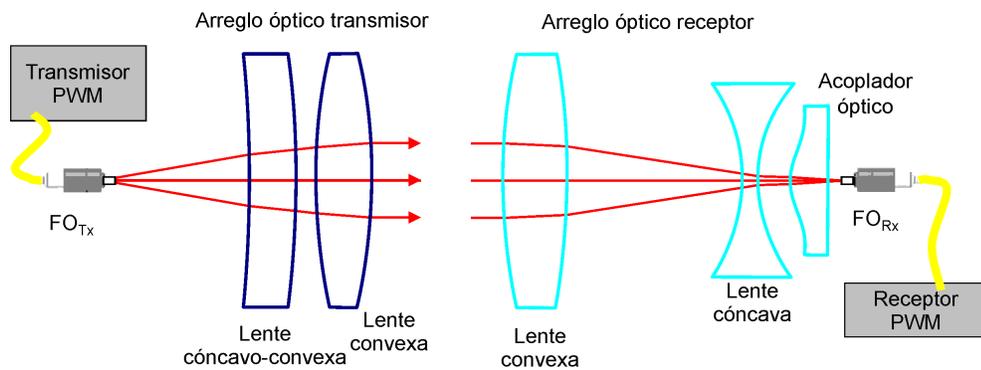
- [1] H. Hemmati. *Near-Earth Laser Communications*. 1.<sup>a</sup> ed. CRC press, 2009. DOI: [10.1201/9781420015447](https://doi.org/10.1201/9781420015447).
- [2] T. Kawanishi. “Transparent Waveform Transfer for Resilient and Low-latency Links”. En: *IEEE photonics society news* 28.4 (ago. de 2014), págs. 4-8. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14511725>.
- [3] L. Yang, B. Zhu y J. Cheng. “Free-Space Optical Communications Using ON-OFF Keying and Source Information Transformation”. En: *Journal of lightwave technology* 34.11 (jun. de 2016), pág. 2601. DOI: [10.1109/JLT.2016.2542203](https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2542203).
- [4] M. Santiago-Bernal. “Comunicaciones vía fibra óptica utilizando modulación de retardos ópticos como portadoras de información”. Tesis doct. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, feb. de 2013.
- [5] U. Schiller y J. R. T. Z. Ghassemlooy. “A voltage-controlled oscillator for use within a pulse frequency modulation system”. En: *International Journal of Electronics* 84(1) (1998), págs. 37-44. DOI: [10.1080/002072198134977](https://doi.org/10.1080/002072198134977).
- [6] G. P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems*. 4th. Wiley, 2010. DOI: [10.1002/9780470918524](https://doi.org/10.1002/9780470918524).
- [7] C. Gutiérrez-Martínez. “Analog TV Transmission Via Optical Fiber Using PWM-Subcarrier”. En: *Midwest Symposium on Circuits and Systems* (1990), págs. 804-807. DOI: [10.1109/MWSCAS.1990.140842](https://doi.org/10.1109/MWSCAS.1990.140842).
- [8] M. Santiago-Bernal, C. Gutiérrez-Martínez y J. Santos-Aguilar. “Optical transmission of video signals using pulse time modulated sub-carriers over optical delays carriers”. En: *Midwest Symposium on Circuits and Systems* (ago. de 2012), págs. 282-285. DOI: [10.1109/MWSCAS.2012.6292012](https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2012.6292012).
- [9] M. C. España Boquera. *COMUNICACIONES ÓPTICAS Conceptos esenciales y resolución de ejercicios*. Díaz de Santos, 2005.

---

## Capítulo 5

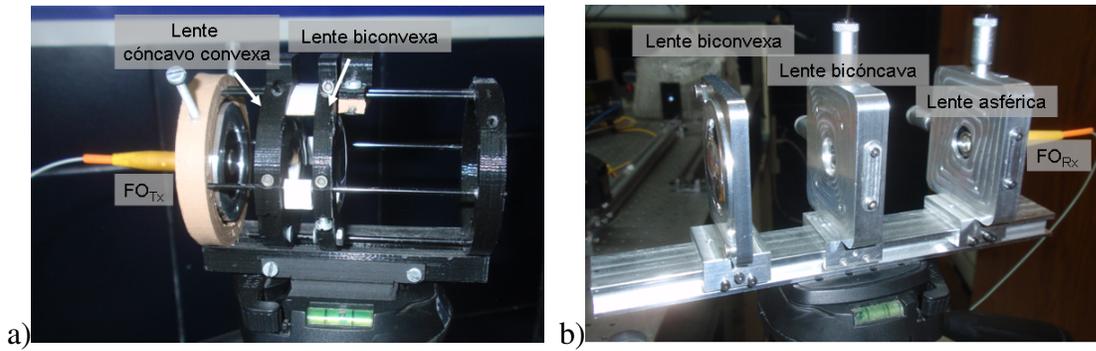
# Evaluación experimental en laboratorio del enlace óptico por espacio libre

La transmisión óptica se realiza y caracteriza en laboratorio con objeto de evaluar el enlace con alcance potencial de 1 km. En el experimento de laboratorio, la potencia óptica es generada por un diodo láser semiconductor con salida a fibra óptica que emite una potencia de 2.5 mW en una longitud de onda de 1.55  $\mu\text{m}$ . El receptor detecta la luz recibida mediante fotodetectores PIN y APD, con responsividades de 0.85 A/W a 1.55  $\mu\text{m}$ . El esquema del enlace experimental se ilustra en la Figura 5.1. El esquema está configurado por una sección transmisora y una sección receptora. El transmisor está integrado por el subsistema electrónico de generación de la señal PWM y del arreglo óptico transmisor que conforma el haz óptico para su transmisión por el espacio libre. La sección receptora está integrada por el arreglo óptico conformador de haz en recepción, el cual colecta la luz recibida y la concentra en el fotodetector. La señal fotodetectada es procesada para demodular la señal PWM recibida y recuperar la información proveniente del transmisor distante.



**Figura 5.1:** El esquema conceptual del enlace óptico de espacio libre desarrollado en este trabajo.

En este trabajo, los arreglos ópticos transmisor y receptor se han diseñado y realizado utilizando lentes fabricadas en el taller de óptica del INAOE. La Figura 5.2 muestra los arreglos realizados.



**Figura 5.2:** Arreglos ópticos para el enlace óptico por espacio libre; a) transmisor; b) receptor.

La Figura 5.3 muestra el montaje experimental del enlace óptico en laboratorio; en primer plano se observa el arreglo óptico transmisor; al fondo, el receptor. La distancia de separación es 3 m.



**Figura 5.3:** El enlace óptico experimental en laboratorio.

---

## 5.1. Prueba y caracterización experimental del enlace óptico de espacio libre en laboratorio

La transmisión experimental en espacio libre ha sido caracterizada en el laboratorio en una distancia máxima de 5 m. La prueba experimental se basa en la transmisión y recepción del haz láser modulado con la subportadora eléctrica PWM. El arreglo transmisor óptico envía al espacio libre un haz colimado con potencia promedio de 2.5 mW.

En relación con los subsistemas electrónicos, en el lado transmisor, la modulación PWM se genera siguiendo el esquema descrito en el Capítulo 4 de este documento. El esquema transmite señales de prueba triangulares con amplitud de 200 mV<sub>pp</sub> y frecuencia de 10 KHz. La señal eléctrica PWM se convierte en una señal óptica equivalente, la cual se transmite hacia el espacio libre. A la distancia de 5 m, el arreglo óptico receptor colecta el haz colimado transmitido, lo que a esta distancia equivale a la potencia total de 2.5 mW. Sin embargo, el acoplamiento hacia la fibra óptica del fotodetector introduce pérdidas y a la salida de la fibra óptica, únicamente se recupera el 25 % de la potencia total recibida. De este modo, solo se obtienen 700 μW a la salida de la fibra óptica. Esta pérdida se debe a la ineficiencia del acoplamiento óptico hacia la fibra óptica que guía la luz hacia el fotodetector.

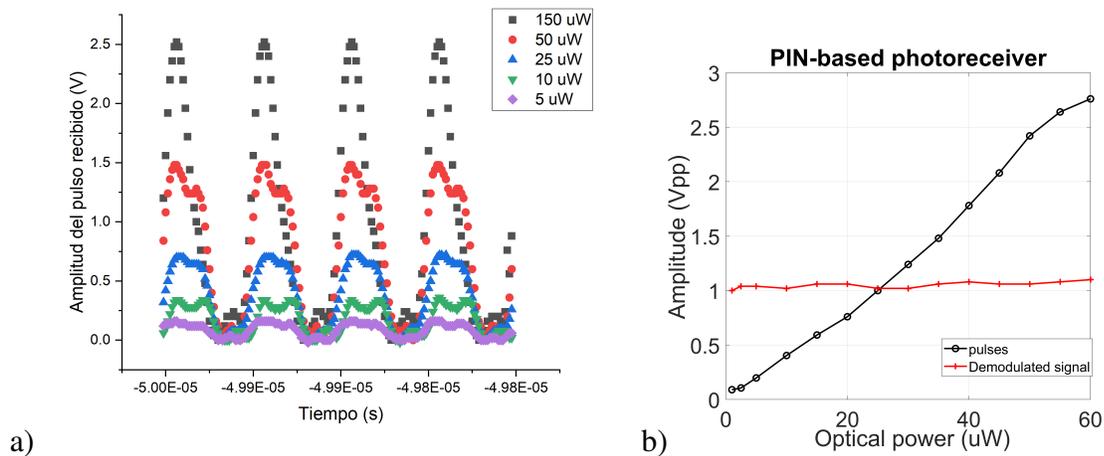
Sin embargo, la potencia de 700 μW es muy elevada y satura al receptor óptico. Para una detección eficiente, la potencia óptica recibida debe atenuarse progresivamente con objeto de determinar el nivel mínimo que permita recuperar la señal transmitida con una buena calidad. Un atenuador óptico variable regula la potencia de los pulsos recibidos hasta niveles de 100 nW. Este valor de potencia es la referencia para evaluar la calidad de recuperación de la información recibida. La calidad de recepción se cuantifica midiendo la relación señal a ruido a la salida del receptor. Un nivel de calidad aceptable requiere de una relación señal a ruido de al menos 30 dB.

En las siguientes secciones, se muestran resultados obtenidos de la recuperación de la señal cuando el receptor óptico utiliza dos tipos de fotodetectores distintos; en un primer caso, un fotodiodo PIN; en un segundo caso, un fotodiodo APD.

## 5.2. Recepción óptica con fotodetector PIN

Una primera caracterización en laboratorio se realizó utilizando un fotodetector tipo PIN. La potencia óptica recibida se atenuó en un intervalo entre 1 y 15  $\mu\text{W}$  y se midieron tanto la amplitud del pulso recibido, como la amplitud de la señal demodulada.

La relación entre el voltaje de salida del receptor y la potencia óptica recibida se muestra en la Figura 5.4. La potencia en el fotodetector se ha variado entre 1 y 150  $\mu\text{W}$ . En la Figura 5.4a, se muestran gráficamente las amplitudes en voltaje de los pulsos a la salida del fotorreceptor en función de la potencia incidente.

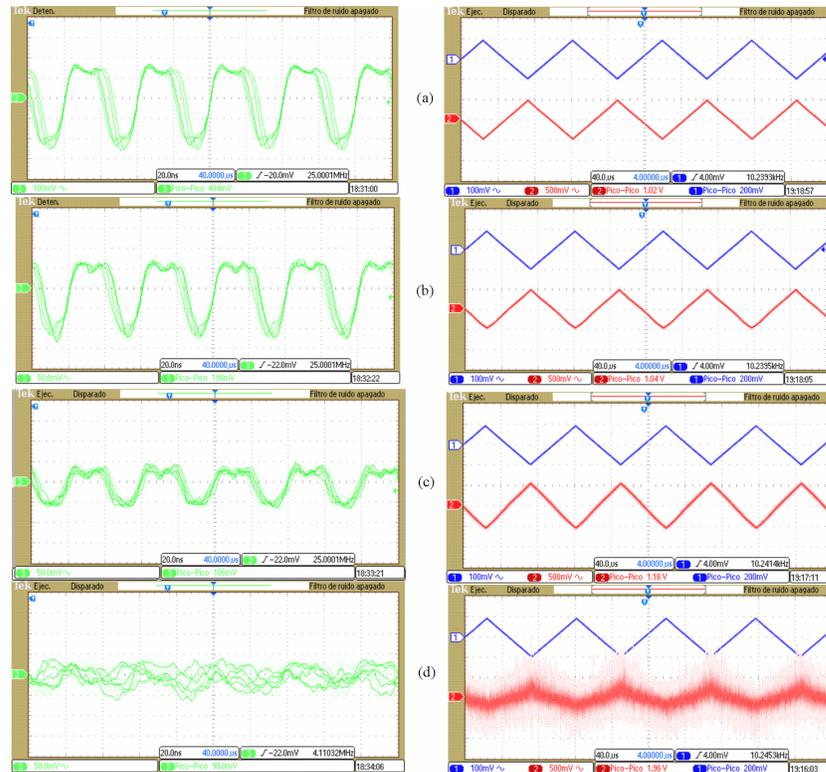


**Figura 5.4:** Amplitud de pulsos a la salida con respecto a la potencia detectada por un fotodetector PIN; a) atenuación progresiva de los pulsos ópticos recibidos; b) amplitud de los pulsos recibidos (trazo negro) y amplitud de la señal demodulada (trazo rojo), con respecto a la potencia óptica recibida.

En la Figura 5.4b, se observa que la variación de la amplitud de los pulsos detectados es aproximadamente lineal entre 50 y 1  $\mu\text{W}$ . Los pulsos muestran la modulación PWM. El receptor óptico comienza a saturarse con potencias recibidas superiores a 50  $\mu\text{W}$ . La variación lineal en la amplitud de los pulsos representa la atenuación progresiva equivalente a la atenuación natural cuando la señal óptica se propaga por el espacio atmosférico. El esquema de transmisión-recepción ha sido ajustado para recuperar la señal de información con amplitud de 1  $V_{pp}$ .

Para validar el proceso de transmisión-recepción óptica, la Figura 5.5 muestra, en su lado izquierdo, las formas de onda de los pulsos recibidos a potencias ópticas de 10, 5, 2.5 y 1  $\mu\text{W}$ . Del lado derecho se muestran las señales triangulares, moduladora (trazo azul) y

demodulada (trazo rojo). De la Figura 5.5, es fácil observar que aunque la amplitud del pulso recibido disminuye, la amplitud de la señal demodulada se mantiene relativamente constante en  $1 V_{pp}$ , aún en los niveles más bajos de potencia óptica recibida. El límite de sensibilidad del receptor óptico con fotodetección PIN es de alrededor de  $2.5 \mu W$ . Cuando la potencia es de  $1 \mu W$ , ya no se logra una demodulación eficiente de la señal de información.



**Figura 5.5:** Formas de onda recuperadas mediante fotodetector PIN en función de la potencia óptica recibida; a)  $10 \mu W$ ; b)  $5 \mu W$ ; c)  $2.5 \mu W$ ; d)  $1 \mu W$ .

De las formas de onda demoduladas, se observa que la potencia mínima para obtener una buena calidad de recuperación es de  $2.5 \mu W$  cuando se utiliza un fotodetector PIN.

En la prueba completa del esquema de comunicación, se realizaron mediciones de la amplitud de los pulsos a diferentes potencias ópticas recibidas, entre  $50$  y  $1 \mu W$ . La Tabla 5.1 muestra las amplitudes en voltaje de los pulsos detectados en función de la potencia incidente en el fotodetector.

Como se aprecia de la medición de las señales, aunque la amplitud de los pulsos decrece, las amplitudes de las señales demoduladas se mantienen constantes aún con

muy bajos niveles de potencia óptica recibida. Este resultado representa la ventaja de la utilización de la modulación en la duración de los pulsos y no de su amplitud. En este proceso, la información no se imprime en la amplitud de los pulsos sino en su duración. La transmisión óptica contiene la información en la duración de los pulsos transmitidos, no es sus amplitudes. En el receptor, los pulsos recibidos se amplifican y se regeneran. La información se recupera a partir de la duración de los pulsos reconstruidos mediante una etapa de filtraje pasa bajas a la salida del receptor.

Potencia óptica recibida [ $\mu\text{W}$ ]	Amplitud del pulso recibido [V]	Amplitud de la señal demodulada [ $V_{pp}$ ]
50	2.42	1.1
30	1.24	1.0
25	0.960	1.02
20	0.760	1.08
15	0.592	1.06
10	0.404	1.02
5	0.198	1.04

**Tabla 5.1:** Amplitudes de pulsos y señales moduladora y demodulada con fotodetector PIN.

La calidad de la transmisión se evalúa cuantitativamente mediante la relación señal a ruido de la señal demodulada. Esta medida compara la amplitud de la señal recuperada con respecto al nivel de ruido a la salida del receptor. La señal a ruido está dada por

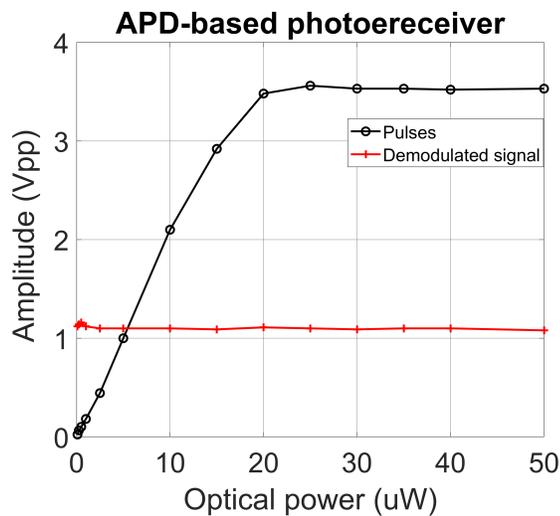
$$SNR = 20 \log \frac{\text{Amplitud pico-pico señal}}{\text{Amplitud ruido}} \quad (5.2.1)$$

Cuando se utiliza el fotodetector PIN, la amplitud de la señal es  $1 V_{pp}$  y la amplitud del ruido es de 30 mV. De esta manera, la relación SNR es del orden de 30 dB, cuando la potencia óptica es de  $5 \mu\text{W}$ .

### 5.3. Recepción óptica con fotodetector APD

En una segunda etapa de caracterización del enlace óptico de espacio libre, se realizaron pruebas en laboratorio de transmisión y recepción con un fotodetector de avalancha APD. La señal transmitida es igualmente una onda triangular de  $200 \text{ mV}_{pp}$  de amplitud y una frecuencia de 10 kHz. De la misma manera con que se ha realizado la

caracterización descrita en la sección anterior, en este caso, la potencia óptica recibida se varió gradualmente entre 50 y 0.1  $\mu\text{W}$  y se midieron las amplitudes, tanto de los pulsos recibidos, como de la señal de información demodulada. En la Figura 5.6 se muestra la relación de las amplitudes del pulso óptico recibido (trazo negro), donde se aprecia el comportamiento lineal del receptor para potencias entre 0.1 y 20  $\mu\text{W}$  y la saturación del receptor con potencias mayores. En la figura también se muestra la amplitud de 1  $V_{pp}$  de la señal demodulada con respecto de la potencia de luz recibida (trazo rojo). Se observa que la amplitud de la señal demodulada se mantiene constante hasta la potencia de 0.1  $\mu\text{W}$ , sin importar la atenuación de los pulsos ópticos.

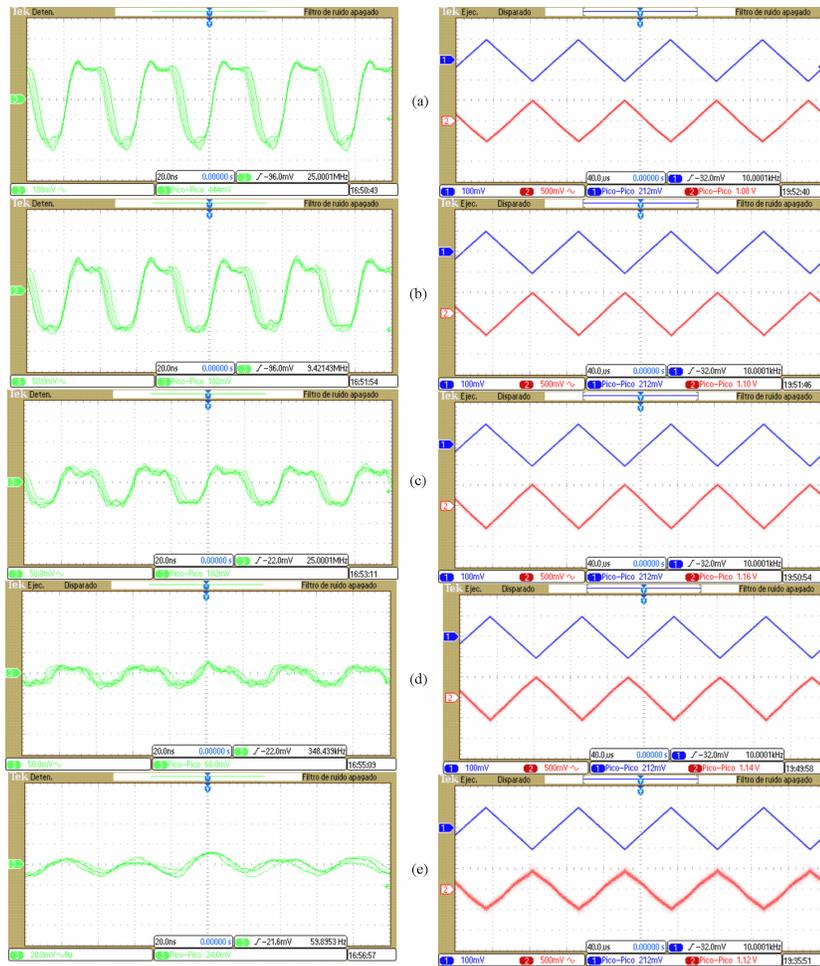


**Figura 5.6:** Relación de amplitud del pulso y de la señal demodulada con respecto a la potencia óptica recibida mediante un fotodetector APD.

La Figura 5.7 muestra las formas de onda, tanto de los pulsos recibidos, como de las señales demoduladas, para potencias entre 2.5 y 0.1  $\mu\text{W}$ . En la sección izquierda de la Figura 5.7 se observan los pulsos modulados en su duración o ancho y se observa su atenuación progresiva entre 2.5 y 0.1  $\mu\text{W}$ . La demodulación se realiza aún con una potencia óptica de 0.1  $\mu\text{W}$ . Tomando como referencia la potencia de 0.25  $\mu\text{W}$ , la información se demodula satisfactoriamente con una relación señal a ruido de 40 dB.

La recepción con fotodetector APD resulta más ventajosa en comparación con un fotodiodo PIN, en función que el APD presenta una ganancia, lo que mejora la sensibilidad del receptor. En este caso, el receptor que utiliza un APD es 10 veces más sensible (10 dB) que el receptor basado en PIN. El receptor con APD presenta una

sensibilidad de  $0.1 \mu\text{W}$ , en comparación con el receptor basado en PIN, el cual presenta una sensibilidad de  $2.5 \mu\text{W}$ .



**Figura 5.7:** Formas de onda recuperadas mediante receptor APD en función de la potencia óptica recibida; a)  $2.5 \mu\text{W}$ ; b)  $1 \mu\text{W}$ ; c)  $0.5 \mu\text{W}$ ; d)  $0.25 \mu\text{W}$ ; e)  $0.1 \mu\text{W}$ .

## 5.4. Comparación de los esquemas ópticos caracterizados

De la caracterización de los enlaces ópticos de espacio libre basados en modulación PWM y fotodetectores PIN y APD, los resultados se resumen en la Tabla 5.2. El mejor desempeño del enlace se alcanza con el esquema basado en fotodetector APD, el cual muestra una sensibilidad superior en 10 dB en comparación con el esquema basado en

---

PIN.

Potencia óptica transmitida	2.5 mW
Potencia umbral con fotodetector PIN	2.5 $\mu$ W
Relación señal-ruido	30 dB
Potencia umbral con fotodetector APD	0.1 $\mu$ W
Relación señal-ruido	40 dB

**Tabla 5.2:** Comparación de la potencia mínima detectada de los fotodetectores PIN y APD.

## 5.5. Transmisión óptica de video por espacio libre

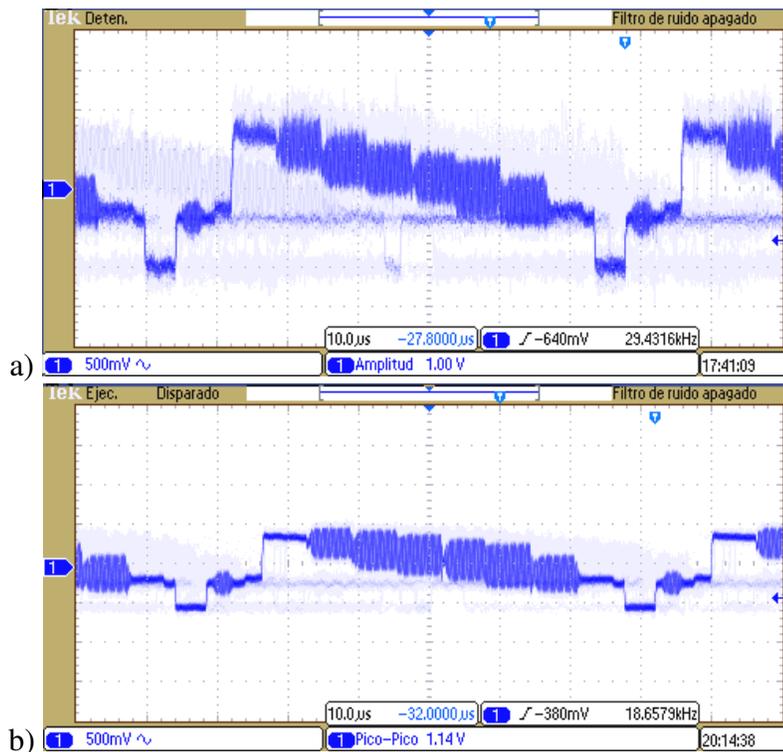
Los resultados experimentales descritos en las secciones precedentes muestran que el enlace óptico con modulación PWM puede ser utilizado eficazmente para la transmisión de información por el espacio libre. El enlace óptico reportado es un esquema de baja complejidad y bajo costo en aplicaciones prácticas para transmisión de información analógica o digital, tales como señales de instrumentación, señales de sensores remotos, voz, audio y video, así como señales digitales de naturaleza diversa. El esquema puede ser utilizado para establecer comunicaciones con fines específicos entre edificios o instalaciones en ambientes cercanos con aplicaciones de transmisión de señales de voz, video, imágenes, de sensores diversos, de instrumentación y control, datos digitales, etc.

Para mostrar la capacidad de transmitir señales de información complejas, el enlace óptico desarrollado ha sido probado exitosamente para la transmisión de video analógico. Un generador de video NTSC provee una señal compuesta, la cual es transmitida por el enlace óptico de espacio libre. La Figura 5.9 muestra las señales de video demoduladas a la salida del receptor óptico. La Figura 5.9a muestra la señal recuperada a la salida del receptor con fotodiodo PIN cuando los pulsos ópticos recibidos presentan una potencia de 2.5  $\mu$ W. La Figura 5.9b muestra la señal demodulada cuando el receptor utiliza un fotodiodo APD recibiendo una potencia óptica de 0.25  $\mu$ W. La mayor sensibilidad del receptor con APD muestra una señal demodulada con calidad superior en 10 dB, en comparación con el receptor basado en fotodetector PIN.

De la figura 5.9a, se observa que la recuperación de la señal de video con fotodetector PIN aparece notoriamente degradada por ruido, debido a que la potencia óptica recibida está en el límite de sensibilidad del receptor. En la figura 5.9b, la señal de video presenta menor cantidad de ruido debido a la ganancia y mayor sensibilidad aportadas por el

fotodetector APD.

El esquema también ha sido probado con señales reales de video analógico, generadas por una cámara de video NTSC. La transmisión ha sido probada en laboratorio con el enlace óptico desarrollado en una distancia de 3-5 m. El enlace óptico experimental se muestra en la Figura 5.9, donde se observa en primer plano el arreglo óptico transmisor; en segundo plano, al fondo, se observa el arreglo óptico receptor y un monitor de video que despliega el videorecuperado con el receptor con fotodetector APD.



**Figura 5.8:** Señales de video a la salida del enlace óptico de espacio libre; a) Video recuperado con fotodetector PIN; b) video recuperado con fotodetector APD.

## 5.6. Conclusiones

El esquema de comunicaciones ópticas por espacio libre desarrollado y evaluado en este trabajo representa una plataforma inicial para diseñar este tipo de sistemas con aplicaciones prácticas. Los esquemas de transmisión óptica son una alternativa a los esquemas de radiofrecuencia con ventajas claras de no requerir licencias y/o asignaciones de frecuencia. De igual manera, los esquemas ópticos cuentan con disponibilidad de

---

mayores anchos de banda, en comparación con los esquemas de radio. Un enlace óptico puede transmitir fácilmente información en bandas de Gigahertz, lo que garantiza el manejo de grandes volúmenes de transmisión que superan las capacidades de los enlaces radioeléctricos. Una condición necesaria para las transmisiones ópticas es que generalmente deben establecerse con línea de vista para asegurar la transmisión óptima.

El esquema desarrollado en este trabajo está diseñado para enlaces ópticos de relativa corta distancia, con alcances de hasta 1 km en línea de vista. El esquema se ha configurado con elementos de bajo costo con componentes electrónicos y ópticos convencionales. La capacidad de transmisión disponible, permite la transmisión en ambientes exteriores como enlaces de comunicaciones entre edificios e instalaciones exteriores de diversa naturaleza. Las aplicaciones inmediatas del enlace desarrollado son la transmisión de señales analógicas y digitales que ocupan banda de frecuencias hasta 10 MHz.

En las pruebas de laboratorio del enlace óptico desarrollado, se ha determinado la sensibilidad de la recepción óptica, dependiendo de la utilización fotodetectores PIN o APD. La fotodetección con APD permite recuperar la información transmitida con buena calidad, con niveles de potencia óptica débiles, entre 0.5 y 0.1  $\mu\text{W}$ .

El alcance de la transmisión óptica, cuando la potencia óptica de 2.5 mW, se determina según el modelo de propagación de un haz gaussiano, descrito en el Capítulo 3 de este documento. De acuerdo con los cálculos mostrados en el capítulo referido, la potencia óptica recibida a una distancia de 1 km es del orden de 100  $\mu\text{W}$ . La potencia recibida a la distancia mencionada deberá atenuarse para una operación eficiente del receptor.

Considerando que la sensibilidad del receptor puede detectar una potencia del orden de 1  $\mu\text{W}$ , la distancia de transmisión podría extenderse hasta 3 km y el enlace óptico operará todavía eficientemente. Es necesario indicar que el esquema desarrollado no ha sido probado fuera de laboratorio y el trabajo futuro es realizar pruebas de transmisión al exterior con propósito de comprobar el alcance de distancias de 1 km o mayores.



**Figura 5.9:** Enlace óptico de espacio libre transmitiendo video analógico; a) enlace óptico a corta distancia; b) detalle de la recepción y despliegue de video analógico.

# Capítulo 6

---

## Conclusiones generales y perspectivas

El objetivo de esta tesis doctoral ha sido la realización de un sistema de enlace de comunicación óptica de espacio libre, que ofrece alta capacidad de transmisión a través de un enlace óptico. Se ha realizado la transferencia de información y de video en laboratorio desde un arreglo óptico transmisor hasta un arreglo óptico receptor separados una distancia entre 1 hasta 5.5 m, recuperando correctamente la señal original. El enlace óptico se ha realizado utilizando luz láser infrarroja en una longitud de onda de 1550 nm. Se ha escogido esta longitud de onda, ya que se encuentra en una ventana de menor atenuación por los componentes atmosféricos.

Una señal de información modula la emisión del láser con una subportadora PWM, se ha utilizado esta modulación, puesto que la información está contenida en el ancho del pulso y no en la amplitud. Esta modalidad de modulación no ha sido tan documentada en otros estudios de enlace óptico registrados en la bibliografía.

El haz láser transmitido emerge de la fibra óptica de forma divergente, con el arreglo óptico transmisor propuesto se colima el haz óptico para reducir las pérdidas de radiación durante la propagación del haz. El arreglo óptico receptor colecta la luz transmitida y dirige la luz hacia la fibra óptica del fotodetector. En la etapa del arreglo óptico receptor se observa una eficiencia de 30%, la pérdida de potencia de la luz ocurre en la sección de incidir la luz en la fibra óptica monomodo del receptor.

Los arreglos ópticos de transmisión y recepción se han diseñado utilizando lentes existentes en laboratorio, mientras que los soportes estructurales se han diseñado y fabricado en aluminio y con impresión 3D, lo que resulta en un valor económico y asequible.

Durante la elaboración de la tesis, se llevaron a cabo pruebas de enlace óptico con dos tipos de fotodetectores, tipo PIN y APD. Obteniendo que la detección mediante el fotodetector APD posibilita la recuperación de la información transmitida y recibida aún con niveles de potencia de 0.1  $\mu$ W.

Se ha estudiado la propagación del haz de luz en la distancia a través del modelo de

---

haz gaussiano. Este modelo permite calcular la potencia luminosa que el arreglo óptico receptor puede coleccionar. Con este modelo se calcula que al enviar un haz de luz colimado de 4.02 mm de radio, 2.5 mW de potencia a 1 km de distancia, se recibe una potencia de 94  $\mu$ W en el arreglo óptico receptor, mientras que en la salida de la fibra óptica se obtiene una potencia de 28  $\mu$ W. Este nivel de potencia es suficiente para recuperar la información transmitida en un enlace óptico superior a 1 km.

Los enlaces de comunicación óptica de espacio libre resultan atractivos para el mercado de comunicaciones para transmitir información de forma segura y eficiente. Este tipo de enlaces de comunicación pueden resultar competitivos con respecto a los enlaces de fibra óptica o de radiofrecuencia.

## **6.1. Perspectivas**

Como trabajo a futuro se propone realizar pruebas de enlace óptico fuera de laboratorio.

Se sugiere utilizar un receptor óptico con material fotosensible expuesto para prevenir la pérdida de potencia que se experimentó al incidir la luz colectada en una fibra óptica monomodo.

Se sugiere incrementar el diámetro del haz colimado transmitido y examinar la recepción de la luz en distancias fuera del laboratorio para detectar mejoras o pérdidas de energía en el receptor.

Además, se propone realizar el enlace óptico en condiciones atmosféricas desfavorables, tales como lluvia fuerte o neblina, para observar si existen cambios en la recuperación de la información transmitida debido a la variación del haz propagado en tales circunstancias.

# Índice de figuras

Figura 1.1	Elementos de la comunicación. . . . .	15
Figura 1.2	Sistema de comunicaciones de radiofrecuencia. . . . .	16
Figura 1.3	Esquema de transmisión de señal a través de fibra óptica. . . . .	17
Figura 1.4	Esquema de enlace óptico de espacio libre. . . . .	19
Figura 1.5	Transmitancia de la atmósfera en condiciones meteorológicas de alta transparencia. . . . .	20
Figura 2.1	Trayectoria de la luz en una fibra óptica. . . . .	27
Figura 2.2	a) Lente convergente o convexa, b) lente divergente o cóncava. . .	28
Figura 2.3	Distancia focal de una lente convergente. . . . .	29
Figura 2.4	Distancia focal frontal de una lente convergente. . . . .	30
Figura 2.5	Distancia focal y distancia focal frontal de una lente convergente. .	30
Figura 2.6	Arreglo óptico transmisor configurado por una lente plano-convexa.	32
Figura 2.7	Arreglo óptico transmisor configurado por dos lentes biconvexas. .	34
Figura 2.8	Arreglo óptico transmisor configurado por lente cóncavo-convexa y lente biconvexa. . . . .	37
Figura 2.9	Trayectoria del haz de luz en un arreglo óptico receptor. . . . .	40
Figura 3.1	Gráfica de propagación del haz gaussiano con respecto a la distancia $z$ . . . . .	47
Figura 3.2	Ángulo de divergencia del haz gaussiano. . . . .	48
Figura 3.3	Diagrama de perfil de intensidad de un haz gaussiano normalizado como función de la distancia radial en diferentes distancias de propagación.	50
Figura 3.4	Línea roja continua corresponde a la gráfica de la potencia del haz en una apertura de 17 mm de radio. La línea azul punteada representa el 30% de la potencia esperada en la salida de la fibra óptica del sistema óptico receptor. . . . .	51

Figura 3.5 a) Comparación de propagación de la luz en el vacío y en atmósfera. b) Comparación de propagación de la luz en el vacío y en atmósfera entre las distancias de 950 y 1000 m . . . . .	53
Figura 4.1 Esquema de modulación de la luz a) de forma directa y b) de forma indirecta. . . . .	57
Figura 4.2 Diagrama de diversas modulaciones. . . . .	58
Figura 4.3 Esquema de modulación de amplitud. . . . .	59
Figura 4.4 Esquema de modulación de frecuencia. . . . .	60
Figura 4.5 Esquema de modulación de amplitud de pulso. . . . .	61
Figura 4.6 Esquema de modulación temporal de ancho de pulsos. . . . .	62
Figura 4.7 Esquema de generación y transmisión de señal PWM y recuperación de señal modulada. . . . .	63
Figura 4.8 Generación de la modulación PWM. La señal moduladora (senoidal roja) se compara con una onda triangular (Azul) y se genera la señal PWM (verde). . . . .	64
Figura 4.9 Espectro de frecuencias de una señal PWM. . . . .	64
Figura 4.10 Receptores ópticos básicos, a) alta impedancia y b) transimpedancia. . . . .	66
Figura 5.1 El esquema conceptual del enlace óptico de espacio libre desarrollado en este trabajo. . . . .	69
Figura 5.2 Arreglos ópticos para el enlace óptico por espacio libre; a) transmisor; b) receptor. . . . .	70
Figura 5.3 El enlace óptico experimental en laboratorio. . . . .	70
Figura 5.4 Amplitud de pulsos a la salida con respecto a la potencia detectada por un fotodetector PIN; a) atenuación progresiva de los pulsos ópticos recibidos; b) amplitud de los pulsos recibidos (trazo negro) y amplitud de la señal demodulada (trazo rojo), con respecto a la potencia óptica recibida. . . . .	72
Figura 5.5 Formas de onda recuperadas mediante fotodetector PIN en función de la potencia óptica recibida; a) 10 $\mu\text{W}$ ; b) 5 $\mu\text{W}$ ; c) 2.5 $\mu\text{W}$ ; d) 1 $\mu\text{W}$ . . . . .	73
Figura 5.6 Relación de amplitud del pulso y de la señal demodulada con respecto a la potencia óptica recibida mediante un fotodetector APD. . . . .	75
Figura 5.7 Formas de onda recuperadas mediante receptor APD en función de la potencia óptica recibida; a) 2.5 $\mu\text{W}$ ; b) 1 $\mu\text{W}$ ; c) 0.5 $\mu\text{W}$ ; d) 0.25 $\mu\text{W}$ ; e) 0.1 $\mu\text{W}$ . . . . .	76

---

Figura 5.8	Señales de video a la salida del enlace óptico de espacio libre; a) Video recuperado con fotodetector PIN; b) video recuperado con fotodetector APD. . . . .	78
Figura 5.9	Enlace óptico de espacio libre transmitiendo video analógico; a) enlace óptico a corta distancia; b) detalle de la recepción y despliegue de video analógico. . . . .	80

# Índice de tablas

Tabla 2.1	Características de una lente utilizada en la primera configuración de arreglo óptico. . . . .	33
Tabla 2.2	Características de las lentes utilizadas en la alternativa 2 del arreglo óptico transmisor. . . . .	35
Tabla 2.3	Características de las lentes utilizadas en el diseño del arreglo óptico transmisor. . . . .	37
Tabla 2.4	Comparación de la trayectoria del haz de salida de las alternativas de arreglo óptico transmisor. . . . .	39
Tabla 2.5	Características de las lentes del arreglo óptico receptor. . . . .	41
Tabla 3.1	Diámetro transversal del haz de luz en diferentes distancias de propagación, donde $w_0 = 4.02$ mm y $\lambda = 1550$ nm. . . . .	48
Tabla 3.2	Cálculo de valores de potencia con respecto a la distancia $z$ para $P_0 = 2.5$ mW . . . . .	51
Tabla 3.3	Cálculo de valores de potencia con respecto a la distancia $z$ en condiciones atmosféricas para $P_0 = 2.5$ mW . . . . .	54
Tabla 5.1	Amplitudes de pulsos y señales moduladora y demodulada con fotodetector PIN. . . . .	74
Tabla 5.2	Comparación de la potencia mínima detectada de los fotodetectores PIN y APD. . . . .	77

---

**En memoria de:**

Neza

Xico

Sra. Erlinda

Emmanuel

Steam

Mis seres queridos que están en mi corazón