

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

**MODELADO EN MATLAB DE UN LiDAR DE  
ABSORCIÓN DIFERENCIAL PARA LA  
DETECCIÓN REMOTA DE  
CONTAMINANTES**

**(MATLAB modeling of a differential absorption  
LiDAR for the remote detection of  
contaminants)**

Para acceder al Título de

***Graduado en  
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Álvaro Gómez Manzanares

Octubre -2014



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

### **CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

**Realizado por:** Álvaro Gómez Manzanares.

**Director del TFG:** Adolfo Cobo García.

**Título:** “Modelado en MATLAB de un LiDAR de absorción diferencial para la detección remota de contaminantes”

**Title:** “MATLAB modeling of a differential absorption LiDAR for the remote detection of contaminants”

**Presentado a examen el día:**

para acceder al Título de

## **GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

### Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): María Ángeles Quintela Incera.

Secretario (Apellidos, Nombre): Adolfo García Cobo.

Vocal (Apellidos, Nombre): Víctor Fernández Solórzano.

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG  
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado N°  
(a asignar por Secretaría)

## Agradecimientos.

---

En primer lugar, me gustaría agradecer su trabajo a mi director de Trabajo de Fin de Grado, Adolfo, porque gracias a su tiempo, consejos, correcciones y comprensión he podido llevar a cabo este trabajo satisfactoriamente.

A mis amigos y compañeros de equipo, que me hacen desconectar de la vida ingenieril, apoyándome y comprendiendo mis problemas.

Y por último, pero no menos importante, a mi familia y en especial a mis padres, siempre apoyando y ayudándome en todo lo que he llevado a cabo en la vida para poder llegar hasta aquí.

A todos, gracias.

# “Modelado en MATLAB de un LiDAR de absorción diferencial para la detección remota de contaminantes”

## **Palabras clave:**

LiDAR, absorción diferencial, Matlab, láser de fibra, detección de contaminantes.

## Índice

---

Agradecimientos.....	3
Lista de ilustraciones.....	6
1. Introducción.....	8
2. Funcionamiento del LiDAR.....	10
2.1. Fundamentos.....	10
2.2. El transmisor.....	11
2.2.1. El transmisor óptico.....	11
2.2.2. El modulador óptico.....	16
2.2.3. Las lentes del transmisor.....	17
2.2.4. El splitter del transmisor.....	17
2.3. El receptor.....	18
2.3.1. Las lentes.....	18
2.3.2. El filtro óptico.....	21
2.3.3. El splitter del receptor.....	22
2.3.4. El detector óptico.....	22
3. Clasificación.....	24
4. La ecuación del LiDAR.....	25
5. Selección de componentes y simulación en Matlab.....	29
5.1. Elección de los contaminantes a detectar.....	29
5.2. Elección de un láser de fibra comercial.....	32
5.3. Elección de una lente colimadora comercial.....	33
5.4. Elección de un filtro comercial.....	35
5.5. Elección de un receptor comercial.....	36
5.6. Simulación en Matlab.....	37
5.6.1. Mejoras al diseño planteado.....	40
6. Conclusión.....	46
7. Bibliografía.....	48
Apéndice A.....	50
Apéndice B.....	51
Apéndice C.....	53
Apéndice D.....	55

## Lista de ilustraciones.

---

Ilustración 2. 1: Componentes esenciales de un sistema LiDAR utilizando la técnica de modulación externa.....	10
Ilustración 2. 2: Diferencia entre LED y láser. [3].....	11
Ilustración 2. 3: Tabla resumen comparación LED y láser. [4].....	12
Ilustración 2. 4: Rango de colores y materiales. [5].....	12
Ilustración 2. 5: Estructura del láser diodo. [7].....	13
Ilustración 2. 6: Procesos de emisión espontánea y estimulada. [9].....	13
Ilustración 2. 7: Diferencia entre Fabry-Perot, DFB y VCSEL.....	14
Ilustración 2. 8: Espectro óptico del diodo láser Fabry-Perot.....	14
Ilustración 2. 9: Estructura típica de un láser Fabry-Perot. [11].....	14
Ilustración 2. 10: Espectro óptico del diodo láser VCSEL. [12].....	15
Ilustración 2. 11: Estructura típica del diodo láser VCSEL. [10].....	15
Ilustración 2. 12: Espectro óptico del diodo láser DFB.....	15
Ilustración 2. 13: Estructura típica de un láser DFB. [10].....	16
Ilustración 2. 14: Modulación externa.....	17
Ilustración 2. 15: Esquema de un splitter del transmisor en un láser con modulación externa. ....	17
Ilustración 2. 16: Tipos de lentes (de dcha. a izqda.): Biconvexa, plano-convexa, menisco divergente, menisco convergente, plano-cóncava y biconvexa. [14].....	18
Ilustración 2. 17: Formación de una imagen en una lente. ....	19
Ilustración 2. 18: Lente convergente. [15].....	19
Ilustración 2. 19: Lente divergente. [15].....	19
Ilustración 2. 20: Lente ideal (izqda.) y lente real con aberración esférica (dcha.). [15].....	20
Ilustración 2. 21: Aberración comática. [15].....	20
Ilustración 2. 22: Aberración cromática. [15].....	21
Ilustración 2. 23: Transmisión de un filtro ideal.....	21
Ilustración 2. 24: Esquema de un splitter del receptor.....	22
Ilustración 2. 25: Fotodiodo PIN de InGaAs. [16].....	22
Ilustración 2. 26: Fotodiodo APD.....	23
Ilustración 4. 1: LiDAR biestático (izqda.) y LiDAR monoestático (dcha.). [20].....	25
Ilustración 4. 2: Objetivo extenso (izqda.) y objetivo puntual (dcha.). ....	25
Ilustración 4. 3: Esquema entre LiDAR y objetivo.....	26
Ilustración 4. 4: Espectro de radiación solar. [23].....	27
Ilustración 5. 1: Espectro de absorción del CO <sub>2</sub> . ....	29
Ilustración 5. 2: Espectro de absorción del CO. ....	30
Ilustración 5. 3: Concentración de CO en Santander. ....	30
Ilustración 5. 4: Espectro de absorción del NO. ....	32
Ilustración 5. 5: Esquema de un sistema LiDAR DIAL. [22].....	32
Ilustración 5. 6: Haz de luz de láser en haz colimado (izqda.) y haz de luz colimado concentrado en el receptor (dcha.).....	33
Ilustración 5. 7: Fragmento de la hoja de características del componente LA1740.....	33
Ilustración 5. 8: Tipos de recubrimiento anti-reflectante de la lente. ....	34
Ilustración 5. 9: Especificaciones del recubrimiento anti-reflectante. ....	34
Ilustración 5. 10: Colocación del filtro en el sistema LiDAR. ....	35

Ilustración 5. 11: Transmisión en un filtro Fabry-Perot ideal para el caso del CO <sub>2</sub> (izqda.) y para el caso del CO (dcha.) .....	35
Ilustración 5. 12: Fragmento de la hoja de características del componente IAG350H2 .....	36
Ilustración 5. 13: Línea de comandos en Matlab solicitando el gas a detectar .....	37
Ilustración 5. 14: Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO <sub>2</sub> ...	37
Ilustración 5. 15: Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO. ....	38
Ilustración 5. 16: Mensaje de error al escoger el gas NO. ....	38
Ilustración 5. 17: Comparación de la NEP con la potencia recibida. ....	39
Ilustración 5. 18: Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO <sub>2</sub> , con distancia máxima de trabajo. ....	40
Ilustración 5. 19: Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO, con distancia máxima de trabajo. ....	41
Ilustración 5. 20: Área detectada sin telescopio (izqda.) y área detectada con telescopio (dcha.). ....	42
Ilustración 5. 21: Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO <sub>2</sub> , con distancia máxima de trabajo. ....	42
Ilustración 5. 22: Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO, con distancia máxima de trabajo. ....	43
Ilustración 5. 23: Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO <sub>2</sub> , con distancia máxima de trabajo. ....	44
Ilustración 5. 24: Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO, con distancia máxima de trabajo. ....	45

## 1. Introducción.

---

Un sistema de comunicación está diseñado para transmitir y recibir información. La transmisión de señales a distancia también puede aprovecharse para obtener información de sitios remotos, como detectar objetos o cuantificar la presencia de sustancias. Un tipo particular de estos sistemas son los que utilizan el sonido (SONAR), las ondas de radio (RADAR) o la luz (LiDAR), que se están desarrollando para multitud de aplicaciones, desde militares hasta medioambientales.

El presente trabajo de fin de grado, estudiará los sistemas **LiDAR** (del acrónimo inglés, “**L**ight **D**etection and **R**anging o **L**aser **I**maging **D**etection and **R**anging”), que utilizan el láser como componente principal. Desde el primer láser de trabajo en 1960 hasta hoy en día, el láser ha asumido un papel central en los sistemas de comunicación. Así, en 1989, LiDAR comenzó a ser una alternativa a los radares de control de velocidad. [1]

Los sistemas LiDAR utilizan tecnologías similares a los sistemas de RADAR, pero hay diferencias en cómo funciona cada tecnología y los tipos de aplicaciones para las que cada una puede ser utilizada. La energía reflejada de los objetos para determinar varios aspectos de ellos mismos se utiliza en ambas tecnologías, pero el tipo de energía utilizada en cada uno es diferente.

Un sistema de **RADAR** (del acrónimo inglés, “**R**adio **d**etection and **r**anging”) envía pulsos de energía de grandes longitudes de onda utilizando ondas de radio y cuando estas ondas de radio se reflejan, el receptor procesa la señal recibida para determinar la información del objeto reflectante.

Por otro lado, en el sistema LiDAR se usan longitudes de onda mucho más pequeñas que en radar, típicamente el ultravioleta, el visible o el infrarrojo cercano. Por este motivo, es posible medir objetos que tengan un tamaño comparable o mayor a la longitud de onda de emisión, haciendo al sistema LiDAR, en general, mucho más sensible en la medición de gases y aerosoles que un RADAR, siendo una mejor elección para el estudio de atmósferas lejanas o para detectar objetos muy pequeños, como las partículas de polvo.

Este trabajo de fin de grado surge como motivación por estudiar y analizar la ecuación de un sistema LiDAR basado en absorción diferencial a dos longitudes de onda (DIAL), para la detección y cuantificación remota de gases contaminantes en la atmósfera. Se desarrollará un programa en MATLAB que implemente la ecuación y se validará con un ejemplo de gas contaminante, obteniendo como resultado la viabilidad de la técnica al utilizar láseres de fibra y otros dispositivos optoelectrónicos no convencionales.

En la sección 1, como ya se ha mencionado, se ha realizado una breve introducción a los sistemas de comunicación, especialmente los sistemas LiDAR y se han fijado los objetivos del trabajo de fin de grado.

En la sección 2, se analizarán los fundamentos del sistema LiDAR y se estudiarán los diferentes dispositivos que componen el sistema.

En la sección 3, se realizará una clasificación de los diferentes tipos de sistemas LiDAR que existen hoy en día.

En la sección 4, se analizará la ecuación LiDAR, comenzando por su forma más general para finalizar la sección con la forma específica para un sistema LiDAR utilizando la técnica DIAL.

En la sección 5, se elegirán los contaminantes a detectar en la ecuación del LiDAR y los diferentes dispositivos comerciales con sus valores reales para su posterior simulación real mediante la herramienta de software matemático Matlab. Se estudiará la viabilidad del diseño planteado y se plantearán diversas mejoras del mismo.

En la sección 6 se concluye el trabajo de fin de grado, analizando los resultados obtenidos en la simulación y comentando aplicaciones y líneas futuras para los sistemas LiDAR.

## 2. Funcionamiento del LiDAR.

### 2.1. Fundamentos.

Un sistema LiDAR consiste en un transmisor que genera una señal, con una potencia específica y con una longitud de onda específica, que atraviesa todos los componentes por los que está compuesto el transmisor. La luz generada por el transmisor pasa a través de un splitter, que divide la señal en dos partes. Una parte pasa a través de un modulador óptico que modula la señal óptica para transmitirla en el espacio libre y la otra parte se dirige al splitter de la parte del receptor, donde se utilizará como referencia. Respecto a la parte que atraviesa el modulador, una vez que la luz ha sido modulada, pasa a través de todos los componentes ópticos del transmisor (fibras ópticas y amplificadores ópticos), que amplifican y entregan la señal a la antena, que proyectará el haz de láser en el espacio libre y recorrerá la distancia entre el LiDAR y el objetivo.

Una vez el haz llega al objetivo, la potencia del rayo se refleja y parte de esa potencia vuelve al receptor del LiDAR. El receptor captura la señal reflejada a través de una antena receptora y una vez que la señal cruza la antena, esta pasará a través de la óptica del receptor (como la óptica del transmisor), que amplifica la luz recibida para hacer más fácil la detección con el detector óptico correspondiente.

Después de cruzar la óptica del receptor, la señal recibida pasa a través de un filtro óptico que elimina todo el ruido posible para hacer una mejor detección. Después de filtro óptico, la señal pasa a través de otro splitter, que une la señal recibida del objetivo con la señal de referencia del transmisor y se lo da al detector óptico, donde se detecta la señal recibida y se convierte en una señal eléctrica para procesar la información. [2]

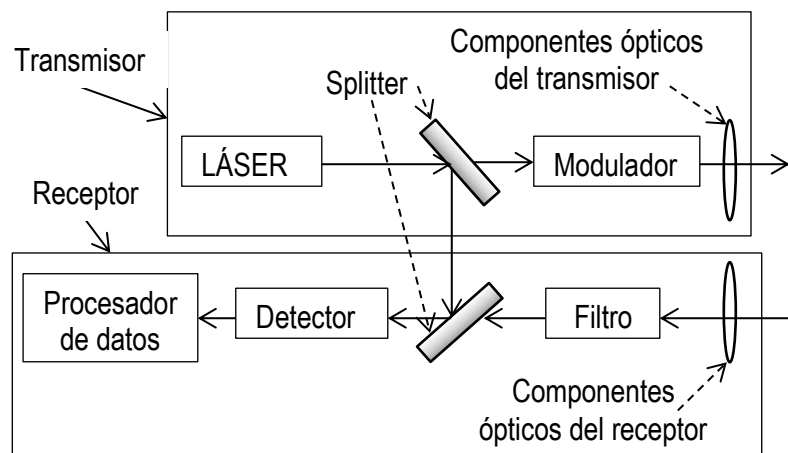


Ilustración 2. 1: Componentes esenciales de un sistema LiDAR utilizando la técnica de modulación externa.

A continuación, se estudiará cada parte de un sistema LiDAR típico.

## 2.2. El transmisor.

Los principales componentes del transmisor de un sistema LiDAR son: el transmisor óptico, las lentes del transmisor, el modulador óptico y el splitter óptico.

### 2.2.1. El transmisor óptico.

Pueden existir dos tipos de transmisor óptico: el diodo LED o el diodo láser. Ambos son dispositivos semiconductores, pero la principal diferencia entre ellos es que el diodo LED produce luz incoherente y el diodo láser produce luz coherente. En el láser, las ondas electromagnéticas mantienen una relación de fase fija y predecible entre sí durante un período de tiempo, mientras que la luz del LED contiene diferentes longitudes de onda y amplitudes de luz.

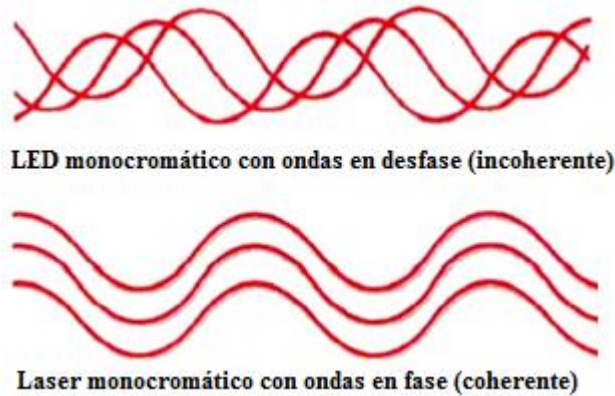


Ilustración 2. 2: Diferencia entre LED y láser. [3]

El diodo láser se utiliza igual que un diodo LED, es decir, como un diodo P-N polarizado directamente. Sin embargo, aunque su estructura parece similar a la de un LED en lo que respecta a electrones y huecos, no lo es en lo referente a los fotones. Como en el caso del LED, se inyectan electrones y huecos en la zona activa polarizando directamente el diodo láser. Para bajos niveles de inyección, estos electrones y huecos se recombinan de forma radiante mediante el proceso de emisión *espontánea*, emitiendo fotones. Sin embargo, la estructura del diodo láser está diseñada para que a altos niveles de inyección el proceso de emisión venga determinado por la emisión *estimulada*. La emisión estimulada permite obtener una alta pureza espectral de la señal, fotones coherentes y una alta velocidad de respuesta. La diferencia fundamental es pues la emisión espontánea en el LED y estimulada en el láser.

Otra diferencia destacable aparece en lo referido a la dirección de la emisión de la luz: Un diodo LED emite fotones en muchas direcciones mientras que un diodo láser consigue realizar un guiado de la luz preferencial una sola dirección.

En la siguiente tabla se resumen otras diferencias entre los LED y láser diodos:

Parámetro	LED	LÁSER
Principio de emisión	Espontánea	Estimulada
Coherencia	Incoherente	Coherente
Potencia de salida	Baja	Alta
Velocidad de operación	Lenta	Rápida
Apertura numérica	Alta	Baja
Vida útil	Larga	Media
Coste	Bajo	Alto
Modulación	Hasta cientos de MHz	Hasta cientos de GHz

Ilustración 2. 3: Tabla resumen comparación LED y láser. [4]

### El diodo LED.

El **LED** (del acrónimo inglés, “**L**ight-**E**mitting **D**iode”) es un dispositivo semiconductor que emite luz incoherente cuando una corriente eléctrica pasa a través de él.

Para crear un diodo LED se unen dos regiones “N” y “P”. En el punto de unión de esas dos regiones se forma una barrera de potencial, cuya función es impedir el paso de los electrones desde la región negativa “N” hacia la positiva “P” cuando no se encuentran debidamente polarizados y los electrones no poseen la suficiente energía para poder atravesarla. Cuando se aplica a los extremos del LED una tensión que permita polarizarlo directamente, los electrones provenientes de la fuente de suministro de corriente directa comienzan a fluir a través del diodo. Bajo esas condiciones, cada vez que un electrón en exceso con carga negativa presente en la región “N” adquiere la suficiente energía como para poder vencer la resistencia que le ofrece la barrera de potencial, la atraviesa y se combina con un hueco positivo en exceso en la región “P”. En el mismo instante que ocurre esa combinación, la energía en exceso que adquirió dicho electrón para poder atravesar la barrera de potencial, se transforma en energía electromagnética, que libera, en ese preciso momento, en forma de fotón de luz.

El color del LED depende del material con el que esté construido, ya que la corriente que pasa por ellos es siempre la misma, por lo que para variar de color hay que variar de material.

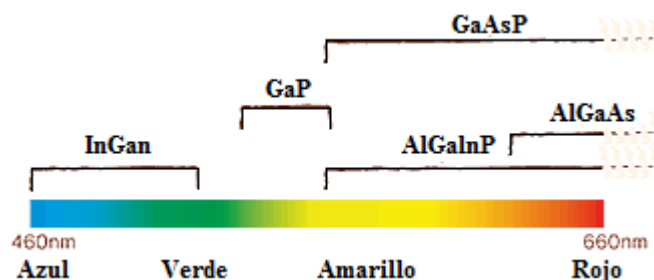


Ilustración 2. 4: Rango de colores y materiales. [5]

Los semiconductores utilizados para la elaboración de un LED son arseniuro de galio (GaAs), galio fosfuro (GAP), fosfuro de arseniuro de galio (GaAsP), indio, galio y nitrógeno (InGaN). Los LEDs para aplicaciones de comunicaciones están hechos comúnmente de GaAsP o GaAs.

## 2. Funcionamiento del LiDAR.

Los LEDs tienen muchas ventajas sobre las lámparas incandescentes y fuentes de luz fluorescentes, por su bajo consumo de energía, su larga vida útil, su pequeño tamaño, su durabilidad, su resistencia a las vibraciones y su baja emisión térmica. Pero se están sustituyendo en gran medida por los dispositivos de diodos láser, ya que estos últimos tienen una mayor velocidad, su luz es de longitud de onda única (monocromática) y tiene una divergencia significativamente menor [6] (estos conceptos serán explicados más detalladamente en la siguiente sección del presente documento).

*El diodo láser.*

Un **láser** diodo (del acrónimo inglés, "Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation") es un diodo emisor de luz con una cavidad óptica para amplificar la luz emitida desde la banda prohibida de energía que existe en los semiconductores. Tienen una gran dispersión y tienen muy poco acoplamiento en la fibra óptica, por lo que en un sistema de LiDAR, un diodo láser se utiliza en la mayoría de las ocasiones como transmisor óptico.

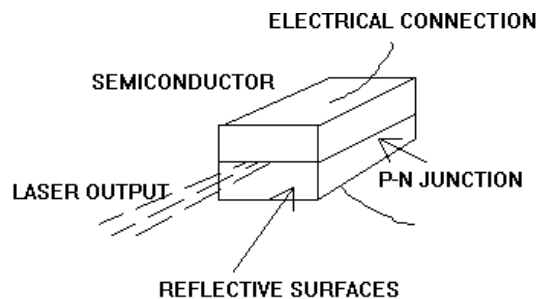


Ilustración 2. 5: Estructura del láser diodo. [7]

Los diodos láser, emiten luz por el principio de emisión estimulada, la cual surge cuando un fotón induce a un electrón que se encuentra en un estado excitado a pasar al estado de reposo. Este proceso está acompañado con la emisión de un fotón, con la misma frecuencia y fase del fotón estimulante. Para que el número de fotones estimulados sea mayor que el de los emitidos de forma espontánea, para que se compensen las pérdidas, y para que se incremente la pureza espectral, es necesario por un lado tener una fuerte inversión de portadores, que se logra con una polarización directa de la unión, y por el otro una cavidad resonante. Es importante decir que, cuando tiene lugar la emisión estimulada, el fotón emitido tiene exactamente la misma longitud de onda, la fase y dirección que la del fotón que estimuló. La cantidad de energía de un fotón determina directamente su longitud de onda y la energía puede provenir de fuentes como el calor, descargas eléctricas, corrientes eléctricas, reacciones químicas... [8]

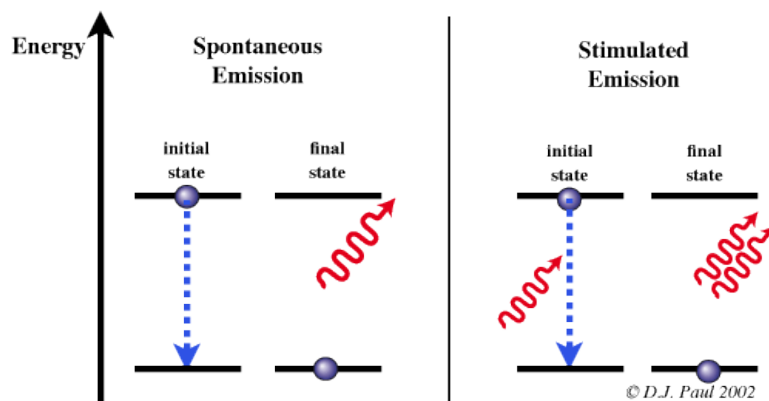


Ilustración 2. 6: Procesos de emisión espontánea y estimulada. [9]

## 2. Funcionamiento del LiDAR.

La mayoría de los láseres utilizados en el ámbito de las comunicaciones son los Fabry-Perot, VCSEL y DFB. Los VCSEL se fabrican sobre pastillas de material semiconductor para que puedan emitir luz desde la superficie del chip, mientras que los Fabry-Perot y DFB emiten luz desde el lateral del chip, desde una cavidad del láser creada en el medio del chip.

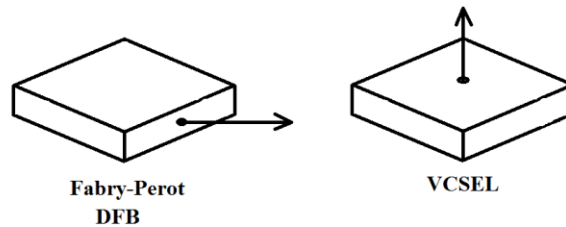


Ilustración 2. 7: Diferencia entre Fabry-Perot, DFB y VCSEL.

- *Fabry-Perot*: Es el tipo de diodo láser más común y el más económico, pero su principal problema es que tiene un espectro multimodo, es decir, tiene varios modos en su respuesta de frecuencia, lo que produce una anchura espectral más grande que los demás tipos, como el VCSEL o el DFB (véase ilustración 2.8). Al ser un dispositivo multimodo, no se considera adecuado para aplicaciones que requieren grandes distancias. [10]

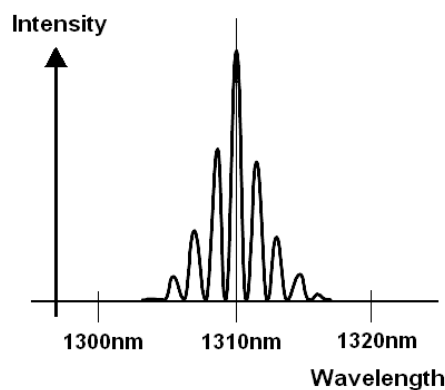


Ilustración 2. 8: Espectro óptico del diodo láser Fabry-Perot.

Se basa en un LED con dos espejos en paralelo, dispuestos como en la ilustración 2.9. Las caras del cristal proveen la retroalimentación óptica necesaria dentro de la cavidad para aumentar la concentración de fotones y con ello mantener la inversión de población necesaria para que se produzca la emisión estimulada.

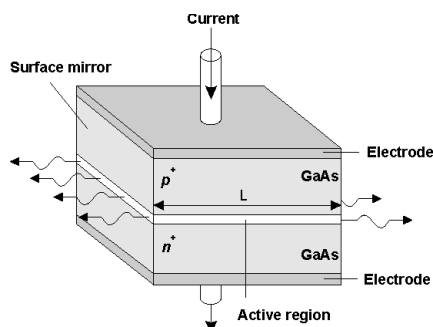


Ilustración 2. 9: Estructura típica de un láser Fabry-Perot. [11]

## 2. Funcionamiento del LiDAR.

- *Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)*: Posee un espectro distinto al Fabry-Perot (véase Ilustración 2.10).

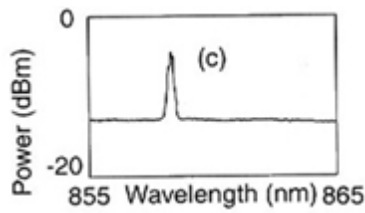


Ilustración 2. 10: Espectro óptico del diodo láser VCSEL. [12]

Para el funcionamiento del VCSEL se requiere de una región activa de emisión de luz encerrada en un resonador que consta de dos espejos, conocidos como reflectores distribuidos de Bragg.

Una de las ventajas de este dispositivo es que su haz es circular, por lo que posee un mejor acoplo en fibra. Además, pueden ser probados en varias etapas del proceso de producción para verificar su calidad (otro tipo de láseres no pueden ser probados hasta el final del proceso de producción), lo que abarata su coste.

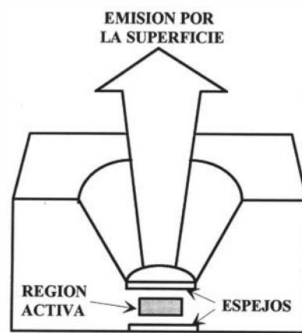


Ilustración 2. 11: Estructura típica del diodo láser VCSEL. [10]

- *Distributed Feed Back (DFB)*: Este láser es una modificación del Fabry-Perot, resolviendo el problema de este último sobre su espectro multimodo (véase ilustración 2.12).

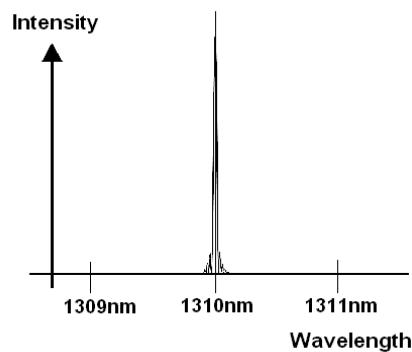


Ilustración 2. 12: Espectro óptico del diodo láser DFB.

## 2. Funcionamiento del LiDAR.

En los láseres DFB hay una capa corrugada periódicamente llamada “guiding layer” a lo largo de la región activa del dispositivo. Estas corrugaciones periódicas actúan como una red de difracción a lo largo de la cavidad óptica del láser. De manera similar a lo que ocurre en un láser Fabry-Perot, la onda de luz que resuena en la cavidad óptica está compuesta de dos ondas propagándose en sentido opuesto. Sin embargo, en la estructura DFB, se crea un acoplamiento mutuo entre las dos ondas, y por tanto dejan de ser necesarios los espejos en la superficie del láser para obtener retroalimentación óptica. Por tanto, la retroalimentación es distribuida a lo largo de la cavidad.

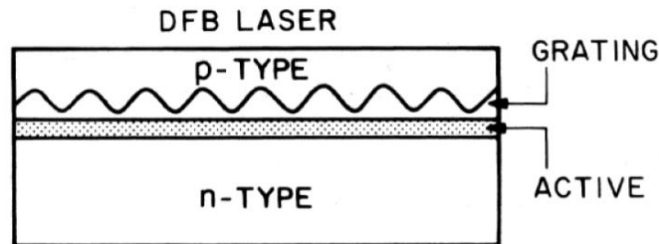


Ilustración 2. 13: Estructura típica de un láser DFB. [10]

### 2.2.2. El modulador óptico.

Los transmisores láser, explicados en la sección anterior, son modulados por un dispositivo llamado modulador óptico, que es capaz de modificar la amplitud de la señal óptica que circula a través de él, de acuerdo con una señal de control eléctrica. Este dispositivo se basa en dos principios de funcionamiento, dependiendo de las propiedades del material que se utilizan en el modulador:

- *Efecto electro-óptico*: En el que la tensión eléctrica en algunos materiales permite cambiar su índice de refracción y, por tanto, la fase de la señal óptica, que es equivalente a una modulación de amplitud según la señal de tensión de control.
- *Fenómeno electro-absorción*: En la que la señal eléctrica de control cambia la característica de absorción de un material. Al aumentar la absorción reduce la amplitud de la señal óptica y viceversa.

La modulación se puede realizar por dos vías diferentes: la modulación externa y la modulación interna. [13]

### Modulación externa.

Esta técnica de modulación se utiliza en los enlaces de larga distancia, por lo que es el más utilizado en un sistema de LiDAR, donde el rango de detección de los objetivos es tan largo como sea posible. En la modulación externa, una fuente de luz emite una potencia óptica constante, mientras que otro dispositivo externo a la fuente (el modulador), modifica la amplitud de la portadora óptica de acuerdo con la señal a transmitir, como se explica en la siguiente ilustración:

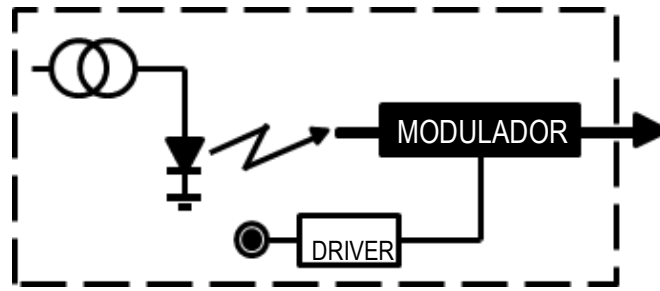


Ilustración 2. 14: Modulación externa.

### Modulación interna.

La modulación interna se utiliza en los sistemas de LiDAR que no necesitan cubrir una distancia muy larga, por lo que su uso no es muy común. Esta técnica de modulación modula la corriente de excitación de la fuente de luz, ya que posee un modulador en el interior del transmisor óptico.

#### 2.2.3. Las lentes del transmisor.

Las lentes del transmisor tienen las mismas características y el mismo funcionamiento que las lentes del receptor, por lo que se explicarán en la sección 2.3.1., conjuntamente con las lentes del receptor.

#### 2.2.4. El splitter del transmisor.

El splitter del transmisor es un componente pasivo, que divide el haz de luz que entra por él mismo en dos. Si el sistema LiDAR tiene modulación externa, una parte de la señal óptica incidente entra en el modulador óptico y la otra se utiliza como señal de referencia para el splitter del receptor (véase ilustración 2.15). Si el sistema tiene modulación interna, la primera parte entra en las lentes del transmisor directamente y la otra se utiliza también como referencia para el splitter del receptor.

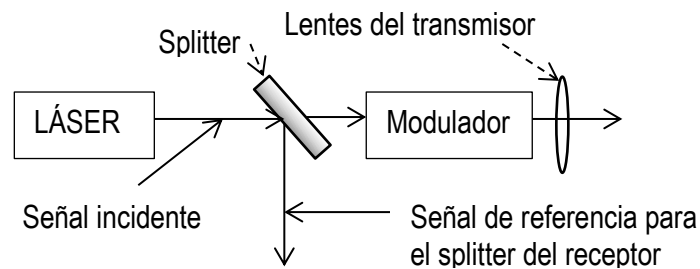


Ilustración 2. 15: Esquema de un splitter del transmisor en un láser con modulación externa.

### 2.3. El receptor.

En un sistema LiDAR, la función del receptor es capturar la señal dispersada desde el objetivo y entregarlo al detector. En la práctica, el receptor del LiDAR siempre detectará una señal distinta de cero, incluso cuando no hay un objetivo que reflejar, debido a otras fuentes de señal tales como:

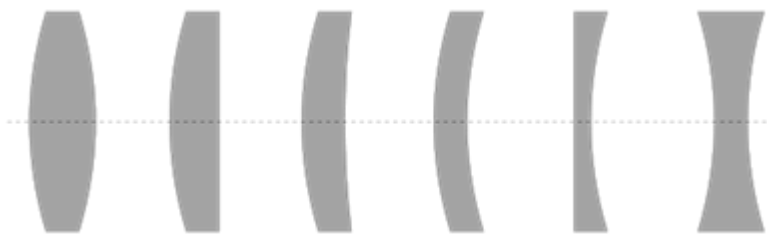
- Reflexiones desde el suelo, y otros objetos del entorno.
- Interferencias con las señales de otros sistemas electrónicos.
- Ruido: Como en cualquier sistema de comunicación, aparecerán señales no deseadas que se mezclan con la señal útil que se quiere transmitir o recibir.

Para determinar el rango de rendimiento máximo del LiDAR es importante saber el factor conocido como mínima potencia recibida ( $P_{emin}$ ) para un receptor dado. Todos los receptores están diseñados para soportar un cierto nivel de sensibilidad basado en el rendimiento y requerimientos. Si se tiene un receptor con más sensibilidad de la requerida, se limitará el ancho de banda del receptor y hará que el receptor procese señales no deseadas.

Los dispositivos ópticos más importantes del receptor son: el filtro óptico, el detector óptico, el splitter óptico y las lentes del receptor.

#### 2.3.1. Las lentes.

Una lente óptica (tanto del receptor como del transmisor) es un componente óptico, principalmente hecho de vidrio, que tiene la capacidad de refractar la luz, esto es, desviar los rayos luminosos que llegan a ella. Las lentes se clasifican por la curvatura de sus dos superficies ópticas: biconvexas (si ambas superficies son convexas), equiconvexas (si ambas superficies son convexas y tienen el mismo radio de curvatura), bicóncavas (dos superficies cóncavas), plano-convexas o plano-cóncavas (si una de las superficies es plana y la otra es convexa o cóncava) y convexa-cóncava o menisco (una convexa y una cóncava).



**Ilustración 2. 16:** Tipos de lentes (de dcha. a izqda.): Biconvexa, plano-convexa, menisco divergente, menisco convergente, plano-cóncava y biconcava. [14]

## 2. Funcionamiento del LiDAR.

La construcción de una imagen en una lente se realiza aplicando las tres propiedades siguientes (véase ilustración 2.17):

- Todo rayo paralelo al eje principal, se refracta pasando por el foco.
- Todo rayo que pasa por el centro óptico, no se desvía.
- Todo rayo que pasa por el foco, se refracta paralelo al eje principal.

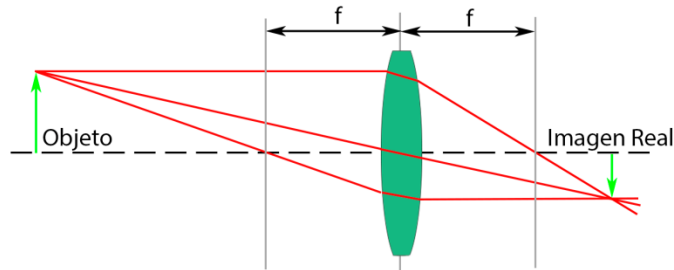


Ilustración 2. 17: Formación de una imagen en una lente.

Si la lente es biconvexa o plano-convexa, un haz colimado de luz que viaja paralelo al eje de la lente y que pasa a través de la lente, convergerá en un punto en el eje a una cierta distancia detrás de la misma (conocida como la longitud focal).

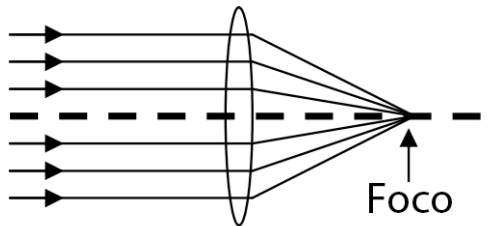


Ilustración 2. 18: Lente convergente. [15]

Si la lente es bicóncava o plano-cóncava, un haz colimado de luz que pasa a través de la lente se divergirá. La distancia desde el punto donde surge el haz de luz hasta la lente se conoce también como longitud focal aunque se considera negativa con respecto a la longitud focal de una lente convergente.

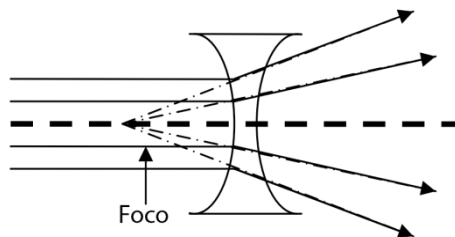


Ilustración 2. 19: Lente divergente. [15]

Las lentes menisco pueden ser convergentes o divergentes, dependiendo de las curvaturas relativas de las dos superficies. Una lente de menisco divergente tiene una superficie cóncava más pronunciada y es más delgada en el centro que en el borde. Por otra parte, una lente de menisco convergente tiene una superficie convexa pronunciada y es más gruesa en el centro que en el borde.

Ningún tipo de lente de las anteriores comentadas es capaz de formar imágenes perfectas, ya que siempre hay un cierto grado de distorsión o aberración que hace que la imagen sea una réplica imperfecta del objeto. Las aberraciones no se deben a defectos de construcción, sino que son una consecuencia de las leyes de la refracción y la reflexión. Hay varios tipos de aberración que pueden afectar a la calidad de la imagen. Los más importantes son:

- *La aberración esférica:* Se produce debido al aumento de la refracción de los rayos de luz cuando golpean un objetivo o debido a un reflejo de los rayos de luz cuando golpean un espejo cerca de su borde. Provoca una imperfección en la imagen creada. Se puede reducir mediante el uso de una lente no esférica, pero estas lentes son caras, por lo que otra opción para minimizar este tipo de aberración es elegir correctamente la curvatura de las superficies de la lente para cada aplicación en particular, por ejemplo, una lente plano-convexa (que enfoca un haz colimado) produce una mancha focal más nítida que los demás tipo de lentes.

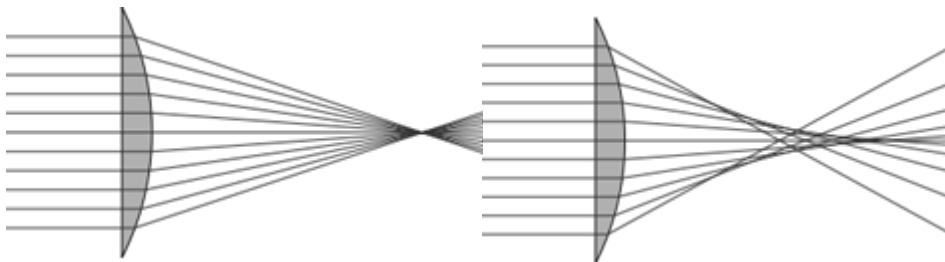


Ilustración 2. 20: Lente ideal (izqda.) y lente real con aberración esférica (dcha.). [15]

- *La aberración comática:* Es una forma exagerada de aberración esférica que ocurre cuando la luz que pasa a través de la lente del eje óptico y la luz que pasa a través de la lente cerca del foco de la lente, se enfocan en diferentes partes del plano focal. Es llamada así porque la forma de la imagen del punto formado es similar a un cometa. Se puede minimizar (y en algunos casos incluso eliminar) eligiendo correctamente la curvatura de las superficies de la lente para cada aplicación en particular.

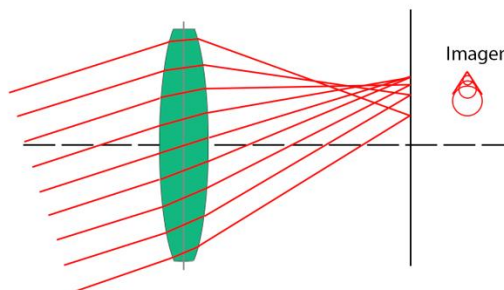


Ilustración 2. 21: Aberración comática. [15]

- *La aberración cromática:* Viene provocada por la imposibilidad de la lente para enfocar todos los colores en un único punto de convergencia. Es causada por la dispersión del material de la lente debido a la variación de su índice de refracción ( $n$ ) respecto la longitud de onda de la luz. El efecto puede reducirse colocando dos lentes juntas en una configuración conocida como doblete acromático o utilizando diferentes materiales en la construcción de la lente, tales como revestimientos especializados.

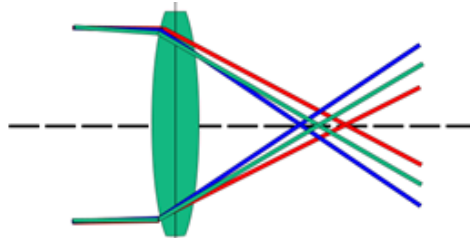


Ilustración 2. 22: Aberración cromática. [15]

### 2.3.2. El filtro óptico.

Los filtros ópticos son dispositivos con una entrada y una salida, utilizados para transmitir selectivamente o rechazar una longitud de onda o intervalo de longitudes de onda. En un sistema LiDAR, es uno de los dispositivos más importantes del receptor porque es responsable de eliminar el mayor ruido posible y los factores no deseados del canal. Un filtro ideal deja pasar un rango definido de longitudes de onda sin atenuación y bloquea todas las otras longitudes de onda (véase la siguiente ilustración).

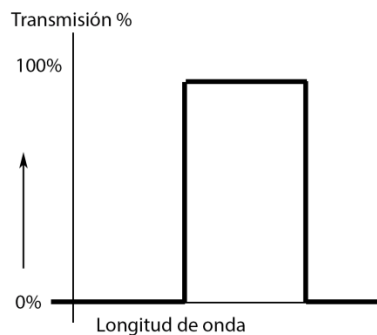


Ilustración 2. 23: Transmisión de un filtro ideal.

Existen varios tipos de filtros ópticos:

- *Filtro dicróico:* Transmite luz de cierto color y refleja el color complementario.
- *Filtro infrarrojo:* Se utiliza para bloquear la luz visible y dejar pasar el infrarrojo.
- *Filtro ultravioleta:* Bloquea la radiación ultravioleta, pero permite pasar la luz visible.
- *Filtro de paso alto:* Atenúa longitudes de onda cortas y deja pasar longitudes de onda más largas en el rango activo del espectro (ultravioleta, visible o infrarrojo).
- *Filtro de paso bajo:* Atenúa longitudes de onda largas y deja pasar longitudes de onda más cortas en el rango activo del espectro (por lo general, la región ultravioleta y la visible).
- *Filtro de paso banda:* Bloquea todas las longitudes de onda fuera de un intervalo seleccionado. Está hecho mediante la combinación de un filtro de paso alto y un filtro de paso bajo.

### 2.3.3. El splitter del receptor.

El splitter del receptor tiene las mismas características y el mismo funcionamiento que el splitter del transmisor es decir, es un componente pasivo, que divide el haz de luz que entra por él mismo en dos.

La función que tiene en el sistema receptor es unir la señal recibida del objetivo con la señal de referencia del transmisor y entregársela al detector óptico (véase ilustración siguiente).

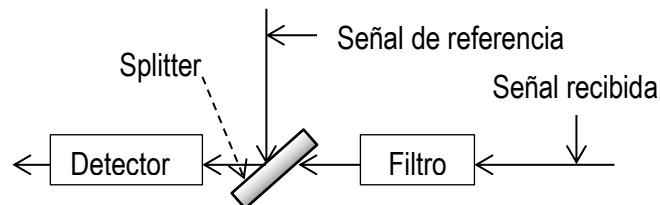


Ilustración 2. 24: Esquema de un splitter del receptor.

### 2.3.4. El detector óptico.

El detector óptico o fotodetector es el principal componente del receptor. Típicamente, es un fotodiodo semiconductor que utiliza el efecto fotoeléctrico para convertir la luz en electricidad. Está diseñado para operar en polarización inversa, lo que es un problema significativo: A niveles bajos de luz, la corriente aleatoria producida por el calor ambiental es una fuente de ruido. Hay varios tipos de fotodiodos, pero los más importantes son el fotodiodo PIN y fotodiodo de avalancha (APD).

#### *El fotodiodo PIN.*

La clave para el funcionamiento de un fotodiodo PIN es que la energía del fotón absorbido debe ser suficiente para mover un electrón a través de la banda prohibida (de lo contrario no será absorbido). Sin embargo, el material absorberá fotones de cualquier energía más alta que su energía de banda prohibida. Está fabricado con unas regiones de alta conductividad P y N junto con una intrínseca de baja conductividad, que típicamente está construida con InGaAs.

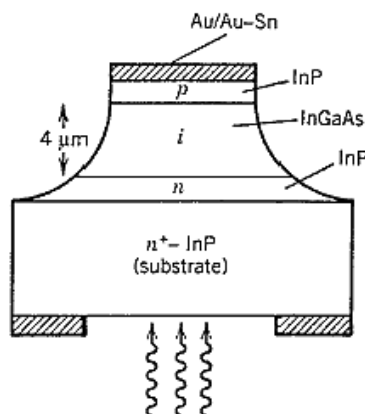
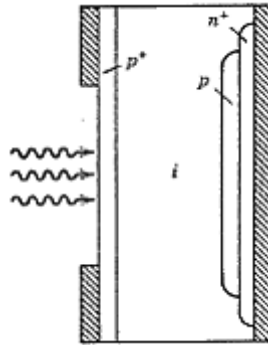


Ilustración 2. 25: Fotodiodo PIN de InGaAs. [16]

El fotodiodo PIN es el tipo de fotodetector más utilizado en los sistemas de comunicaciones ópticas, ya que es altamente fiable, tiene un bajo nivel de ruido y es compatible con circuitos amplificadores de baja tensión.

*El fotodiodo avalancha (APD).*

Los fotodiodos de avalancha amplifican la señal durante el proceso de detección. En su forma básica, un APD es un fotodiodo PIN con una polarización inversa muy alta. La principal diferencia estructural entre un APD y un diodo PIN es que la zona  $i$  (que en una estructura PIN está ligeramente dopada con N) se dopa ligeramente con P. De esta forma, el dispositivo está diseñado para asegurar un campo eléctrico uniforme en toda la capa. [17]



**Ilustración 2. 26:** Fotodiodo APD.

En los sistemas LiDAR de larga distancia, donde la sensibilidad es uno de los factores más importantes, el APD es el fotodiodo más utilizado. Sin embargo, una de sus limitaciones al introducirse en sistemas amplificados es el ruido producido por el propio componente.

### 3. Clasificación.

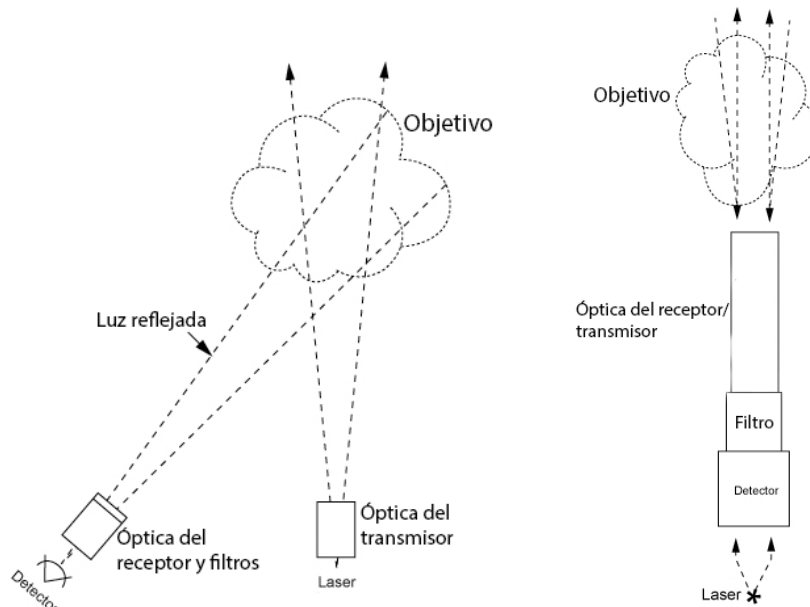
Los sistemas ópticos en general se pueden dividir en dos grandes grupos: *Sistemas coherentes* (en los que el receptor conoce cierta información de la señal que recibe) y *sistemas no coherentes* (en los que ocurre lo contrario que en los sistemas coherentes) [18]. Para no aumentar la complejidad del presente trabajo, la ecuación a modelar en las próximas secciones estará basada en un sistema LiDAR no coherente.

En cuanto a los sistemas LiDAR específicamente, existen varios tipos de sistemas LiDAR, como: LiDAR de scattering elástico, LiDAR Raman, LiDAR de fluorescencia (o de resonancia), LiDAR Doppler y DIAL. [19]

- *LiDAR de scattering elástico (en inglés, elastic-backscatter LiDAR)*: es la forma clásica de LiDAR. En su forma más simple, se utiliza un láser que emite una sola longitud de onda y un detector que mide el scattering elástico de la radiación de las moléculas y las partículas de la atmósfera. Por scattering elástico se entiende como al proceso en el que la longitud de onda de la radiación se mantiene sin cambios. Este tipo de LiDAR proporciona información sobre la presencia y la ubicación de capas de aerosoles y de la nube y también es conocido como LiDAR de Rayleigh-Mie.
- *LiDAR Raman*: Se usa mandando un pulso de una longitud de onda y observando el efecto Raman de la señal de regreso de las diferentes especies atómicas y moleculares. Se entiende como efecto Raman al scattering inelástico de un fotón, es decir, cuando su estado cuántico interno cambia. Esta técnica suele utilizarse como herramienta para medir un amplio rango de propiedades meteorológicas y ambientales.
- *LiDAR de fluorescencia (o de resonancia)*: Se utiliza un láser sintonizado en la línea de absorción de la especie estudiada y se observa la fluorescencia radiada por el átomo o la molécula mientras decae al estado base.
- *El LiDAR Doppler*: Se emplea para medir la velocidad de un objetivo, ya que cuando la luz transmitida desde el LiDAR alcanza al objetivo que se mueve hacia o alejándose del LiDAR, la longitud de onda de la luz reflejada o dispersada por el objetivo cambiará ligeramente al generarse una longitud de onda mayor o menor que la incidente, según se aleje o se acerque al dispositivo LiDAR, de acuerdo con el efecto Doppler, que da nombre a la combinación de las dos técnicas. El objetivo puede ser tanto rígido como atmosférico, ya que la atmósfera contiene muchas partículas de polvo y aerosoles que son transportados por el viento y en los se esté interesado medir, puesto que son pequeños y suficientemente ligeros como para que se muevan a la velocidad del viento y permitan, de esta forma una medida remota de la velocidad del viento.
- *DIAL (Differential Absorption LiDAR)*: Utiliza láseres de dos longitudes de onda distintas, seleccionadas para que una de estas longitudes de onda sea absorbida por la molécula que interesa y la otra longitud de onda no. La diferencia entre la intensidad las dos señales de regreso indica la energía absorbida por la especie y de esta forma se puede deducir la concentración de la molécula investigada. En la sección 4 de este trabajo se modelará la ecuación para este tipo de sistemas LiDAR, ya que es el más adecuado para detectar ciertas moléculas presentes en la atmósfera (como el CO<sub>2</sub>, ozono, agua, SO<sub>2</sub>, o NO<sub>2</sub>) o medir concentraciones químicas.

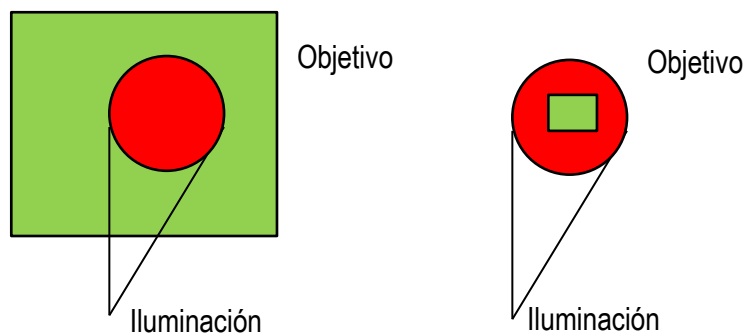
#### 4. La ecuación del LiDAR.

La ecuación del LiDAR describe el rendimiento del sistema para unos parámetros ambientales y de objetivos dados. En el presente trabajo de fin de grado se estudiará un sistema LiDAR en su configuración convencional: monoestático, lo que significa que el transmisor y el receptor se encuentran en la misma ubicación. Hay algunos otros tipos de configuración, como biestático, en donde el foco emisor de la luz se encuentra a gran distancia del receptor.



**Ilustración 4. 1:** LiDAR biestático (izqda.) y LiDAR monoestático (dcha.). [20]

Antes de empezar a analizar la ecuación, es importante saber que existen dos tipos de objetivos a los que se puede enfrentar un LiDAR, en función de la cantidad de área del objetivo que abarque [21]: Objetivo extenso, que es la situación común en un LiDAR de campo cercano (el objetivo es más grande que el rayo láser) y objetivo puntual, que es una situación común en un LiDAR de campo lejano (el rayo láser es más grande que el área del objetivo). Por lo tanto, la ecuación del LiDAR puede tomar dos expresiones posibles: una para expresar la situación de un campo lejano (objetivo puntual) y otra para expresar la situación de un campo cercano (objetivo extenso). El presente trabajo de fin de grado está pensado para modelar la ecuación de un sistema LiDAR mediante fibra óptica para la detección de contaminantes en la atmósfera y tener información en un volumen de atmósfera de la presencia de contaminantes, por lo que se procederá a estudiar la situación más adecuada para este caso, es decir, el campo lejano con la técnica LiDAR DIAL no coherente.



**Ilustración 4. 2:** Objetivo extenso (izqda.) y objetivo puntual (dcha.).

## 4. La ecuación del LiDAR.

Se partirá de la siguiente ecuación general para el LiDAR, planteada en el curso de la profesora Xinzhaio Chu, de la Universidad de Colorado, "LiDAR Remote Sensing" [22]:

$$N_S(\lambda, R) = \frac{P_L(\lambda_L)\Delta t}{\frac{hc}{\lambda_L}} [\beta(\lambda, \lambda_L, \theta, R) \cdot \Delta R] \cdot \frac{A}{R^2} \cdot e^{-\int_0^R \alpha(\lambda_L, r') dr'} \cdot e^{-\int_0^R \alpha(\lambda, r') dr'} \cdot [\eta(\lambda, \lambda_L) \cdot G(R)] + N_B \quad (4.1)$$

Esta ecuación calcula los fotones detectados a una  $\lambda$  determinada a una distancia entre el LiDAR y el punto de la atmósfera considerado ( $R$ ), pero lo que interesa en el presente documento es trabajar con potencias ópticas, por lo que la primera modificación será cambiar los elementos que aparecen expresando la cantidad de fotones por potencia óptica:

$$P_{recibida}(\lambda, R) = P_{laser} \cdot [\beta(\lambda, \lambda_L, \theta, R) \cdot \Delta R] \cdot \frac{A}{R^2} \cdot e^{-\int_0^R \alpha(\lambda_L, r') dr'} \cdot e^{-\int_0^R \alpha(\lambda, r') dr'} \cdot [\eta(\lambda, \lambda_L) \cdot G(R)] + P_B \quad (4.2)$$

Donde el término  $P_{recibida}(\lambda, R)$  es la potencia recibida en el receptor a una  $\lambda$  determinada a una distancia entre el LiDAR y el punto de la atmósfera considerado ( $R$ ), y el término  $P_{laser}$  es la potencia generada por el láser. El término  $\beta(\lambda, \lambda_L, \theta, R)$  es la probabilidad por unidad de distancia para que un fotón se disperse en una longitud de onda ( $\lambda$ ) en un ángulo  $\theta$ , mientras que  $\Delta R$  es la distancia espacial que ocupa el haz de luz en la dirección de propagación. El término  $\beta$  se calcula utilizando la expresión del coeficiente de Rayleigh [22]:

$$\beta_{Rayleigh}(\lambda, z, \theta = \pi) = 2.938 \cdot 10^{-32} \frac{P(z)}{T(z)} \cdot \frac{1}{\lambda^{4.0117}} (m^{-1}sr^{-1}) \quad (4.3)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda en metros,  $P$  es la presión atmosférica en milibares y  $T$  es la temperatura en grados Kelvin a una altura  $z$ , por lo que sustituyendo en la ecuación con unos valores estándar (presión atmosférica media de 1013 milibares y temperatura en grados Kelvin de 300 K), se obtiene la siguiente expresión en función de la longitud de onda:

$$\begin{aligned} \beta_{Rayleigh}(\lambda, z, \theta = \pi) &= 2.938 \cdot 10^{-32} \frac{1013}{300} \cdot \frac{1}{\lambda^{4.0117}} = \\ &= 9.9206 \cdot 10^{-32} \cdot \frac{1}{\lambda^{4.0117}} (m^{-1}sr^{-1}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Volviendo de nuevo a la ecuación general (ecuación 4.2), el término  $\frac{A}{R^2}$  es la probabilidad que tiene un fotón disperso para ser recibido por el receptor, donde  $R$  es la distancia entre el receptor y el objetivo y  $A$  es el área del receptor, siguiendo el esquema siguiente:

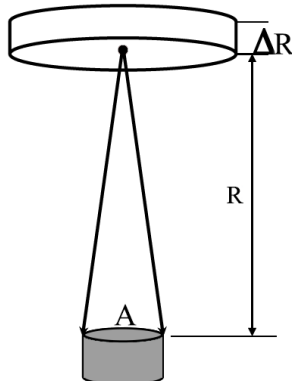


Ilustración 4. 3: Esquema entre LiDAR y objetivo.

En cuanto a los términos exponenciales de la ecuación general (4.2),  $[e^{-\int_0^R \alpha(\lambda_L, r') dr'} \cdot e^{-\int_0^R \alpha(\lambda, r') dr'}]$  es la transmisión atmosférica de la luz láser en una longitud de onda de salida ( $\lambda_L$ ) y una de retorno ( $\lambda$ ). Donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción del gas a medir y se integra entre 0 y la distancia considerada  $R$ . Si se supone una concentración constante (por ejemplo, igual concentración del gas a detectar en todo el camino), esa integral se convierte en una simple multiplicación. Como se ha mencionado anteriormente, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar un sistema LiDAR utilizando la técnica DIAL, en donde existe una única longitud de onda de salida y de retorno, por lo que los dos términos exponenciales de la ecuación general se pueden agrupar, quedando la ecuación general de la siguiente forma:

$$P_{recibida}(\lambda, R) = P_{laser} \cdot [\beta(\lambda, \theta, R) \cdot \Delta R] \cdot \frac{A}{R^2} \cdot e^{-2 \int_0^R \alpha(\lambda, r') dr'} [\eta(\lambda) \cdot G(R)] + P_B \quad (4.5)$$

El término  $\eta(\lambda, \lambda_L)$  es la eficiencia del hardware óptico del sistema LiDAR es decir, la eficiencia de los espejos, las lentes, los receptores o los filtros. El término  $G(R)$  se trata del factor de forma geométrica, que solo tiene sentido si el haz láser rebota en un objeto físico y produce sobre el receptor una mancha de iluminación con la luz reflejada. En el caso a estudiar, el scattering es en todas las direcciones, y el porcentaje de luz capturada ya está considerado numéricamente en el factor  $\frac{A}{R^2}$ , por lo que se considerará  $G(R) = 1$  en todos los casos.

El último término,  $P_B$ , es la luz de fondo o ruido de fondo “no controlado”. Su fuente principal es la luz del sol esparcida por la atmósfera que entra al receptor. La mejor solución para minimizar este valor es añadir un filtro óptico detrás de la lente que limite el rango de longitudes de onda recogido por el detector. El filtro reduce mucho este término, ya que la luz solar dispersada por la atmósfera está distribuida en muchas longitudes de onda (véase Ilustración 4.4) y aparece como ruido en el receptor, pero limita a solo unos pocos nanómetros de longitud de onda la señal.

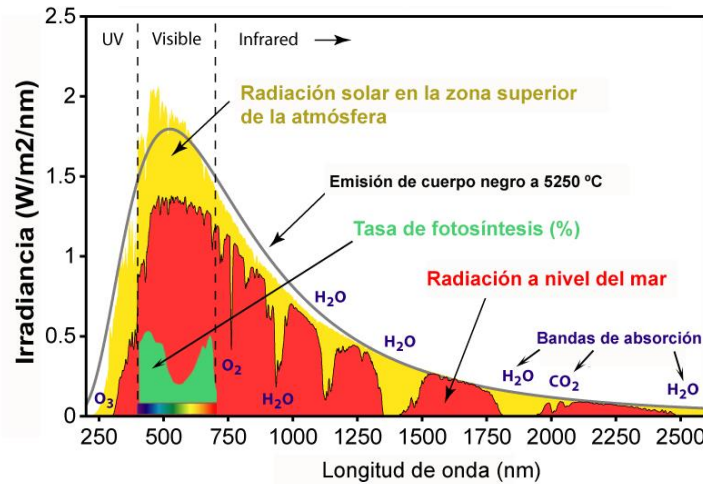


Ilustración 4. 4: Espectro de radiación solar. [23]

Para trabajar de día, el filtro tiene que ser más estrecho (es decir, abarcar menos longitudes de onda), ya que la influencia de la luz solar es plena, mientras que por la noche, esa radiación es menor, pero sigue habiendo ruido, debido a la luz de la luna y, sobre todo, a la radiación térmica del aire, la tierra, la vegetación, etc. [24] Esta radiación térmica infrarroja se concentra en longitudes de onda de muchos micrómetros, por lo que, como el rango con el que se va a trabajar con el LiDAR es en torno a 1,5 micrómetros, el ruido “nocturno” es un problema para otros tipos de LiDAR distinto al del presente trabajo.

## 4. La ecuación del LiDAR.

Lo más relevante es que, como se va a proceder a medir a dos lambdas (ON y OFF) en sucesión rápida, ambas medidas se restan para sacar la concentración del gas, por lo que el término  $P_B$  se cancela, y no es importante. Pese a esto, es necesario seguir teniendo en cuenta el filtro, ya podría ocurrir que el ruido de fondo  $P_B$  sea muy superior a la señal recibida y entonces, aunque teóricamente se cancele, en la práctica va a introducirse mucho error.

Un LiDAR con la técnica DIAL utiliza un láser de dos longitudes de onda distintas, seleccionadas para que una de estas longitudes de onda sea absorbida por la molécula que interesa y la otra longitud de onda no. Esto hace que a la hora de estudiar la ecuación en Matlab, se resolverá dos veces: una para una longitud de onda que es absorbida por el gas ( $\lambda_{ON}$ ) y otra para una longitud de onda no absorbida ( $\lambda_{OFF}$ ) lo más cercana a la anterior.

$$P_{recibida}(\lambda_{ON}, R) = P_{laser} \cdot [\beta(\lambda_{ON}, \theta, R) \cdot \Delta R] \cdot \frac{A}{R^2} \cdot e^{-2 \int_0^R \alpha(\lambda_{ON}, r') dr'} [\eta(\lambda_{ON}) \cdot G(R)] + P_B \quad (4.6)$$

$$P_{recibida}(\lambda_{OFF}, R) = P_{laser} \cdot [\beta(\lambda_{OFF}, \theta, R) \cdot \Delta R] \cdot \frac{A}{R^2} \cdot e^{-2 \int_0^R \alpha(\lambda_{OFF}, r') dr'} [\eta(\lambda_{OFF}) \cdot G(R)] + P_B \quad (4.7)$$

## 5. Selección de componentes y simulación en Matlab.

En la presente sección se escogerán los contaminantes a detectar en la ecuación del LiDAR y los diferentes dispositivos comerciales con sus valores reales típicos obtenidos de sus hojas características, para su posterior simulación real mediante la herramienta de software matemático Matlab.

### 5.1. Elección de los contaminantes a detectar.

De entre los posibles contaminantes que un LiDAR con la técnica DIAL puede detectar ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$ , Benzeno, Tolueno, Xilenos,  $\text{SH}_2$ ...), se buscarán aquellos gases que absorban a una longitud de onda dentro del rango en el que emiten los láseres de fibra utilizados en la simulación real que se llevará a cabo en Matlab (entre 1530 y 1611 nm, es decir entre  $6535 \text{ cm}^{-1}$  y  $6207 \text{ cm}^{-1}$ ). Los parámetros necesarios de cada gas para la posterior simulación de la ecuación en Matlab son: la absorción y su concentración en la atmósfera.

Se elegirá el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que absorbe en una longitud de onda de 1573 nm, dentro del rango de emisión de los láseres que se van a utilizar. Desde la página web HITRAN (del acrónimo inglés, **H**igh **R**esolution **T**ransmission), una recopilación de parámetros espectroscópicos utilizados para predecir y simular la transmisión y emisión de luz en la atmósfera [25], se obtiene el siguiente espectro de absorción del  $\text{CO}_2$  en el rango de emisión de los láseres de fibra:

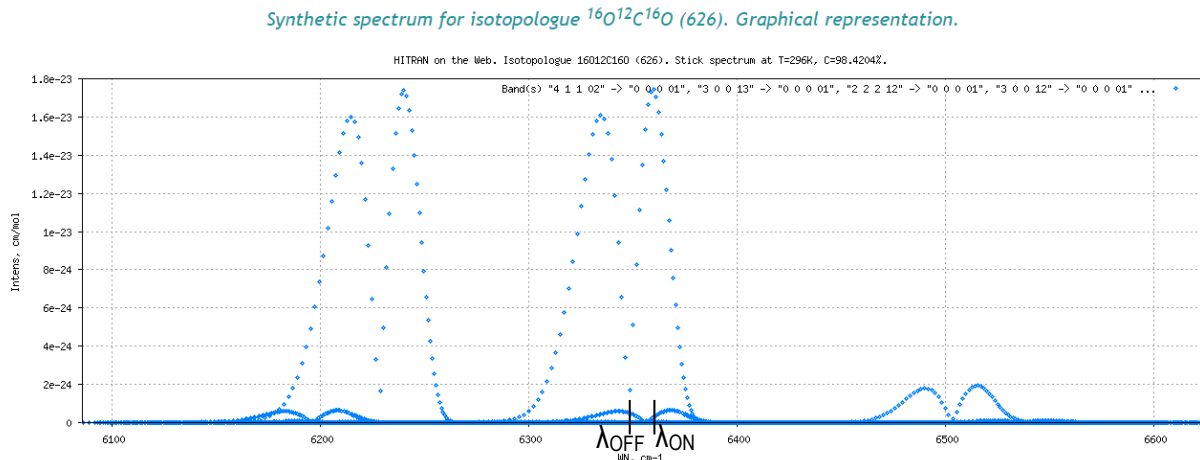


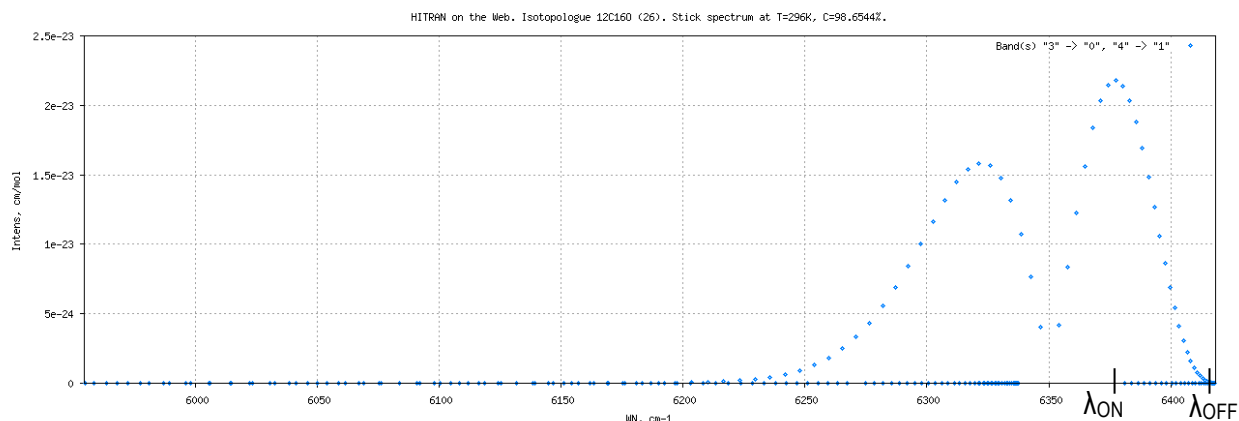
Ilustración 5. 1: Espectro de absorción del  $\text{CO}_2$ .

Por lo que en el programa de Matlab se escogerá un valor para la longitud de onda absorbida para el  $\text{CO}_2$  ( $\lambda_{\text{ON}}$ ) de 1573 nm ( $6357 \text{ cm}^{-1}$ ) con una absorción de  $1.8\text{E-}23 \text{ cm}^{-1}/\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}$ , mientras que la longitud de onda cercana que no absorbe ( $\lambda_{\text{OFF}}$ ) será considerada a 1574 nm ( $6353 \text{ cm}^{-1}$ ).

Este parámetro absorción es directamente proporcional a la concentración del gas en la atmósfera. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la concentración media anual de los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera en 2013 está actualmente en  $396 \text{ ppm}$  (partes por millón) ( $712.638 \text{ mg/m}^3$ ) [26], parámetro que se utilizará en la simulación en Matlab.

Otro contaminante elegido será el monóxido de carbono (CO), cuyo espectro se obtendrá de nuevo de la página web HITRAN [25] en el rango de emisión de los láseres de fibra:

*Synthetic spectrum for isotopologue  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$  (26). Graphical representation.*



**Ilustración 5. 2:** Espectro de absorción del CO.

Por lo que en el programa de Matlab se escogerá un valor para la longitud de onda absorbida para el CO ( $\lambda_{ON}$ ) de 1568 nm ( $6377 \text{ cm}^{-1}$ ) con una absorción de  $2.2\text{E-}23 \text{ cm}^{-1}/\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}$ , mientras que la longitud de onda que no absorbe ( $\lambda_{OFF}$ ) será considerada a 1560 nm ( $6410 \text{ cm}^{-1}$ ).

El valor de concentración de CO, se obtendrá de la página web de la Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio y Urbanismo del Gobierno de Cantabria [27], en la estación meteorológica de Santander el día 18 de septiembre de 2014:  $0.2 \text{ mg/m}^3$  ( $0.175 \text{ ppm}$ ).

## Santander Centro

Última media horaria 18-09-2014 16:00

### Contaminantes

PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	36 T
SO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0 T
NO2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	32 T
NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	14 T
<b>CO (<math>\text{mg}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>0.2 T</b>
BEN ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1.1 T
TOL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	5.5 T
XIL ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	4.1 T

Calidad del aire: ● Buena

**Ilustración 5. 3:** Concentración de CO en Santander.

Los valores de tanto el parámetro de absorción, como el de la concentración, mencionados anteriormente, no vienen expresados en las unidades adecuadas para introducirlos en la ecuación general (ecuación 4.6). Por este motivo, es necesario llevar a cabo las siguientes transformaciones [28]:

- La absorción (que se nombrará  $S$ ) en  $cm^{-1}/mol \cdot cm^{-2}$  es necesaria convertirla a  $cm^{-2} atm^{-1}$  (que se nombrará  $S'$ ), de la siguiente forma:

$$S' = S \cdot \frac{7.34 \cdot 10^{21}}{T} \quad (5.1)$$

Donde  $T$  es la temperatura en Kelvin, que se considerará como 300K (temperatura ambiente).

- El porcentaje de luz absorbida tras recorrer una distancia  $R$  (llamado  $\alpha'$ ) se expresará de la siguiente forma:

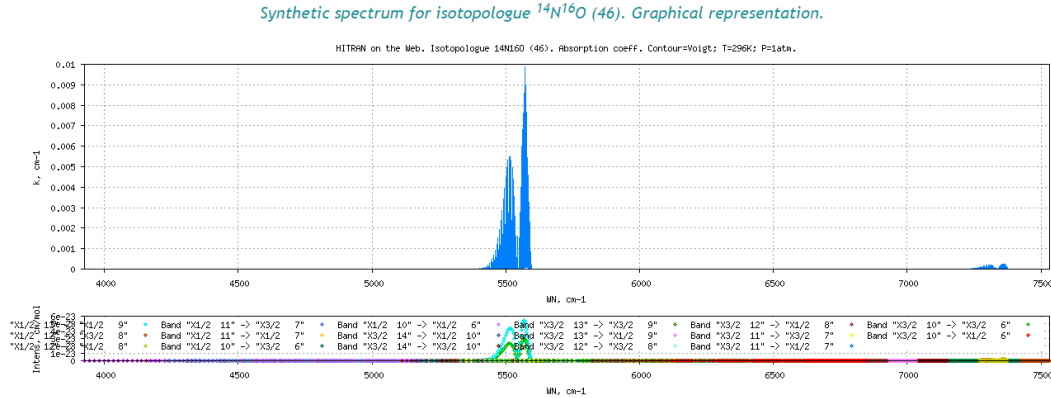
$$\alpha' = S' \cdot P \cdot x_j \cdot R \quad (5.2)$$

Con  $P$  siendo la presión, que se considerará 1 atmósfera,  $x_j$  la fracción molar, que según la ley de Avogadro en un gas ideal, es la misma que la fracción en volumen (es decir, por ejemplo, para la concentración de  $CO_2$  de 396 ppm, se obtiene un 0,0396% tanto en moles como en volumen) y  $R$  la distancia recorrida por la luz absorbida por el gas (en la ecuación general se multiplicará por 2, ya que la luz tiene camino de ida y vuelta).

Este valor de  $\alpha'$  representa la luz absorbida en la ecuación, por lo que la última transformación necesaria es convertir esa luz absorbida en luz transmitida, para obtener el  $\alpha$  definitivo de la ecuación general:

$$\alpha = 1 - \alpha' \quad (5.3)$$

El último contaminante elegido será el monóxido de nitrógeno ( $NO$ ), un gas que absorbe fuera del rango de emisión de los láseres de fibra utilizados pero que se estudiará para así poder demostrar la ecuación en Matlab en todas sus opciones. Desde la página web de HITRAN [25] se obtiene el siguiente espectro de absorción:



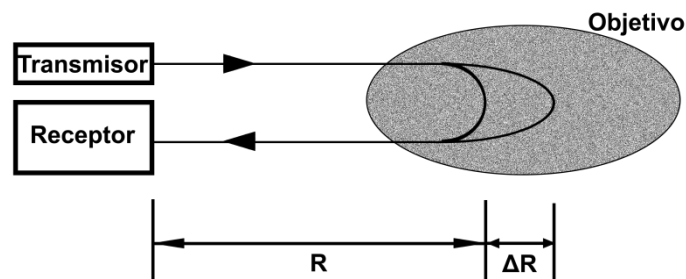
**Ilustración 5. 4:** Espectro de absorción del  $NO$ .

Como se puede apreciar, los picos de absorción en el espectro aparecen en torno a  $5500\text{ cm}^{-1}$  ( $1818\text{ nm}$ ), por lo que se encuentra fuera del rango de emisión de los láseres de fibra que se van a utilizar (entre  $1530\text{ nm}$  y  $1611\text{ nm}$ ). Es decir, este contaminante no podrá ser detectado mediante los láseres de fibra utilizados.

## 5.2. Elección de un láser de fibra comercial.

Se elegirá un láser de fibra de potencia de  $10\text{ mW}$  con un rango de longitud de onda variable entre  $1530$  y  $1611\text{ nm}$ , tomado como referencia de un láser de fibra de los compañeros del departamento *TEISA* [29].

Un parámetro importante a tener en cuenta en la ecuación es la distancia espacial que ocupa el haz de luz en la dirección de propagación ( $\Delta R$  en la ecuación general), ya que al ser el láser un pulso de luz, ocupa una distancia finita determinada por la velocidad.



**Ilustración 5. 5:** Esquema de un sistema LiDAR DIAL. [22]

Se tomará como tiempo de propagación del láser  $15\text{ nanosegundos}$ , valor típico en un láser pulsado de gran intensidad, por lo que resolviendo en la ecuación general de la cinemática, con la velocidad tomando el valor de la velocidad de la luz en el vacío, se obtiene el siguiente valor para  $\Delta R$ :

$$\Delta R = \text{velocidad} \cdot \text{tiempo} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 15 \cdot 10^{-9} \text{s} = 4.5 \text{ metros} \quad (5.4)$$

### 5.3. Elección de una lente colimadora comercial.

La lente colimadora del sistema tiene dos funciones: transformar la luz de salida del láser en un haz colimado en el espacio libre (izquierda en la ilustración 5.6) y concentrar la luz reflejada colimada en el receptor (derecha en la ilustración 5.6).

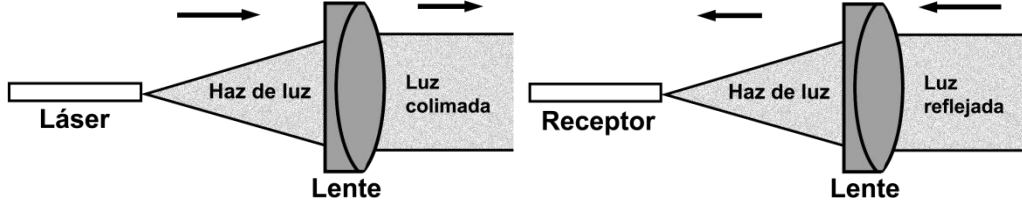


Ilustración 5. 6: Haz de luz de láser en haz colimado (izqda.) y haz de luz colimado concentrado en el receptor (dcha.)

El radio del haz colimado se puede calcular mediante la siguiente ecuación [30]:

$$r_{HAZcolimado} = f \cdot \theta_{FIBRA} \approx f \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot r_{FIBRA}} \quad (5.5)$$

Donde  $f$  es la longitud focal,  $\lambda$  es la longitud de onda y  $r_{FIBRA}$  es el radio de la fibra. Se supone que la distancia entre el extremo de la fibra y la lente está cerca de la longitud focal  $f$  de la lente ya que, si la distancia es demasiado pequeña, el haz se desviará, mientras que, si la distancia es muy grande, el haz convergerá en otro foco a cierta distancia.

Para operar la ecuación con valores reales, se elegirá la lente comercial plano-convexa LA1740, de Thorlabs [31]. En su hoja de características se encuentra el valor de la distancia focal ( $f$ ), 85 milímetros (véase Ilustración 5.7.). El tamaño del haz en la fibra de los compañeros de departamento [29] es en torno a 9 micrómetros de diámetro.

**N-BK7 Plano-Convex Lenses: Diameter = 75 mm**

ITEM #	DIA (mm)	f (mm)	PRICE UNCOATED (For Coated Lens Add Suffix)			
			\$	£	€	RMB
LA1740	75.0	85.0	\$ 58.00	£ 41.76	€ 50.46	¥ 462.26
LA1238	75.0	100.0	\$ 52.00	£ 37.44	€ 45.24	¥ 414.44

Ilustración 5. 7: Fragmento de la hoja de características del componente LA1740.

Por lo que, con valores reales y en función de la longitud de onda, el radio del haz colimado será:

$$r_{HAZcolimado} \approx f \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot r_{FIBRA}} = 85 \text{ mm} \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot 4.5 \mu\text{m}} \quad (5.6)$$

El parámetro necesario para incorporar a la ecuación general del LiDAR es el área del haz ( $A$ ) por lo que, utilizando el cálculo del área de un círculo delimitado por una circunferencia, se obtiene, en función de la longitud de onda, la siguiente ecuación:

$$A = \pi \cdot r_{HAZcolimado}^2 = \pi \cdot \left( 85 \text{ mm} \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot 4.5 \mu\text{m}} \right)^2 \quad (5.7)$$

La lente colimadora también influye en las pérdidas generales del sistema, ya que las caras de la lente reflejan un poco la luz que les llega o transmiten. Estas pérdidas se obtienen de la información del recubrimiento anti-reflectante de la lente. En la ilustración 5.8 se observan los diferentes tipos de recubrimientos que existen [32]. Se utilizará el tipo C ya que se encuentra dentro del rango de trabajo de los láseres que se utilizarán.

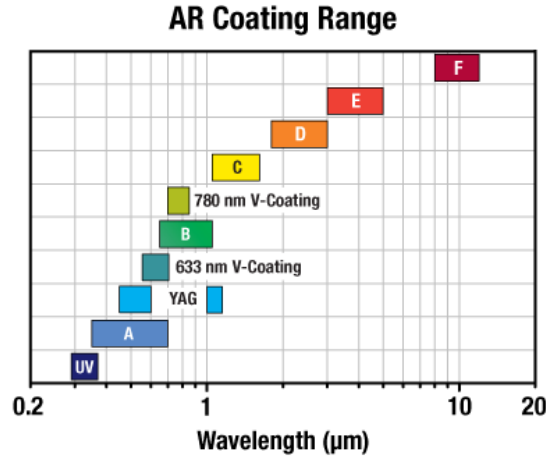


Ilustración 5. 8: Tipos de recubrimiento anti-reflectante de la lente.

En sus especificaciones se indica que la reflectividad del recubrimiento es de menos del 0.5% y aunque sea casi despreciable, se incluirá en los cálculos de la ecuación. Al usarse la lente para transformar la luz de salida del láser en un haz colimado y para concentrar la luz reflejada colimada en el receptor, se pasa dos veces por la lente, por lo que la reflectividad total es del 1%. En la ecuación general, esto se tiene en cuenta en el parámetro  $\eta$ , que es la eficiencia del sistema. En este caso, en lugar de la reflectividad, es necesario colocar la transmitancia, esto es, el porcentaje de luz que pasa y no el que se pierde, por lo que será 99%.








AR Coating Specifications				
Coating Code	Wavelength Range	Average Reflectivity <sup>a</sup>	Performance Plot <sup>b</sup>	Coating Variation <sup>c</sup>
UV	290 - 370 nm	<0.5%	 <a href="#">Raw Data</a>	Unavailable
A	350 - 700 nm	<0.5%	 <a href="#">Raw Data</a>	
B	650 - 1050 nm	<0.5%	 <a href="#">Raw Data</a>	
C	1050 - 1700 nm <sup>d</sup>	<0.5%	 <a href="#">Raw Data</a>	

Ilustración 5. 9: Especificaciones del recubrimiento anti-reflectante.

#### 5.4. Elección de un filtro comercial.

Mencionado el problema del ruido de fondo en la sección 4 del trabajo, existen dos tipos de filtro que pueden disminuir esta cuestión: Un filtro paso banda y un filtro Fabry-Perot. Se utilizará este último tipo ya que es más estrecho y deja pasar menos ruido que el paso banda.

El filtro se colocará detrás de la lente, para intentar que sólo deje pasar el rango de longitudes de onda con el que trabaja el láser. Este ruido de fondo no se puede eliminar completamente, ya que está repartido en todas las longitudes de onda (depende de la luz del sol, que es blanca), por lo que al filtrar, se dejarán pasar las longitudes de onda con las que se trabajan (y las del ruido también), que harán que la intensidad total del ruido siga existiendo.

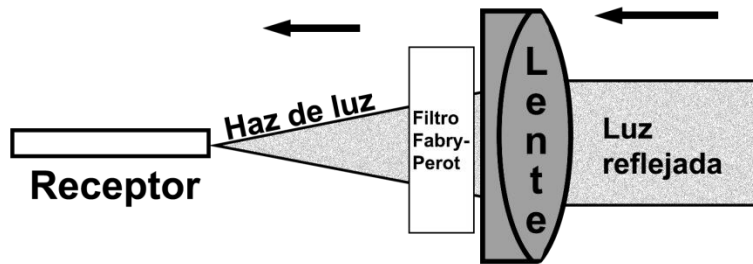


Ilustración 5. 10: Colocación del filtro en el sistema LiDAR.

El filtro Fabry-Perot elegido es el FFP-TF2, de *MicronOptics* [33] ya que es sintonizable a cualquier longitud de onda, por lo que es adecuado para el sistema a estudiar. Aparece en su hoja de características el parámetro FSR (Free Spectral Range), que es la separación entre dos picos consecutivos de transmisión. El ancho de banda está medido como el cociente FSR/Finesse, donde cuanto mayor sea la Finesse, mayor será la selectividad del filtro. Como se puede elegir prácticamente el valor adecuado para cada caso, se configurará para que se encuentre dentro del rango de longitudes de onda (ON y OFF) del gas a detectar. Esto es, el FSR para el caso del CO<sub>2</sub> es de 1 nm y para el caso del CO de 8 nm (véase ilustración 5.11). Tiene unas pérdidas de inserción de 1.5 dB, que es la potencia óptica que se pierde al atravesar el filtro, incluso a la longitud de onda a la que debería dejar pasar todo. Es decir, 1.5 dB significa que la potencia después del filtro se reduce en un factor  $10^{\frac{1.5 \text{ dB}}{10}} = 1.4125$  (en lineal) respecto a la que incide.

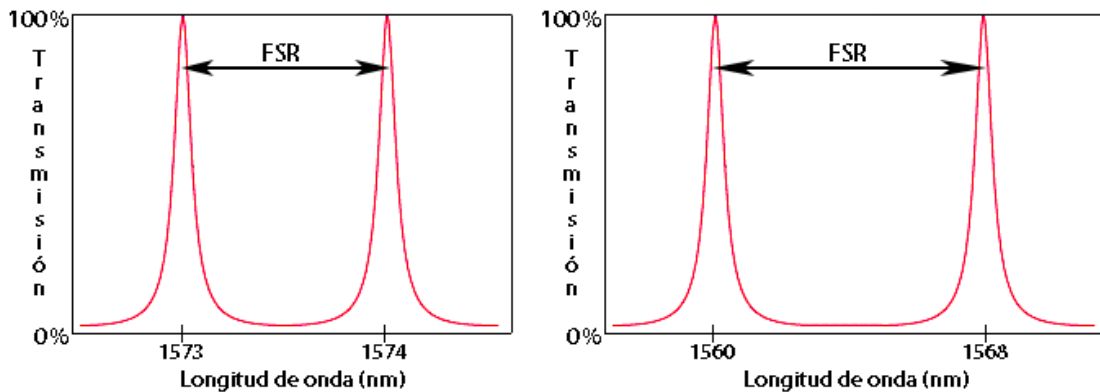


Ilustración 5. 11: Transmisión en un filtro Fabry-Perot ideal para el caso del CO<sub>2</sub> (izqda.) y para el caso del CO (dcha.).

### 5.5. Elección de un receptor comercial.

En el receptor del sistema LiDAR se tendrá en cuenta el parámetro NEP (*Noise equivalent power*), que mide la sensibilidad del sistema detector. Se define como la potencia de señal que da una relación señal a ruido de uno en un ancho de banda de salida de un hertzio.

Este parámetro no se incorporará en la ecuación general, sino que se utilizará para comprobar la cantidad de potencia recibida en el receptor y para obtener la distancia  $R$  máxima de trabajo, esto es, la distancia a la cual la potencia recibida coincide con el NEP.

El receptor comercial elegido es el IAG350H2 de la compañía *Laser components* [34], ya que trabaja dentro del rango de longitudes de onda de los láseres que se van a utilizar. Su NEP es de  $0.40 \frac{pW}{\sqrt{Hz}}$ , valor que depende del ancho de banda (bandwidth), que es  $100 MHz$ .

Part Number	IAG350H2	IAG350H3	IAG350H4	IAG350H5	Units
InGaAs-APD	IAG350	IAG350	IAG350	IAG350	
Diameter	350	350	350	350	$\mu m$
Wavelength Range	900 - 1700	900 - 1700	900 - 1700	900 - 1700	nm
Peak Sensitivity	1550	1550	1550	1550	nm
Bandwidth	10 k - 100 M	10 k - 240 M	20 k - 470 M	20 k - 700 M	Hz
Supply Voltage-Vcc	3.3	5.0	3.3 or 5.0	3.3	Volt
Supply Current	25	30	30	25	mA
Responsivity 1550 nm	0.50	0.19	0.075	0.042	MV/W
NEP 1550 nm	0.40	0.70	1.00	1.80	pW/rtHz

Ilustración 5. 12: Fragmento de la hoja de características del componente IAG350H2

Por lo que el valor de NEP que se comparará con la potencia recibida en el programa de Matlab será:

$$NEP = 0.40 \frac{pW}{\sqrt{Hz}} \cdot \sqrt{100 MHz} = 4000 pW = 4 nW \quad (5.8)$$

## 5.6. Simulación en Matlab.

La simulación real de la ecuación en Matlab se llevará a cabo en función de la distancia entre el LiDAR y el objetivo, para dar una evolución de la potencia óptica con la distancia. En el apéndice A del presente trabajo se encuentra el programa completo utilizado para obtener los resultados de esta sección.

Mediante línea de comandos, el programa solicitará al usuario el gas que desea medir, siendo las opciones CO<sub>2</sub>, CO o NO.

```
fx Seleccione el gas a detectar [CO2, CO o NO]:
```

Ilustración 5. 13: Línea de comandos en Matlab solicitando el gas a detectar.

Si se elige el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como gas a detectar, se obtiene la siguiente gráfica de la evolución de la potencia óptica (en dBm) con la distancia (en metros) en escala logarítmica para una distancia máxima introducida de 1000 metros:

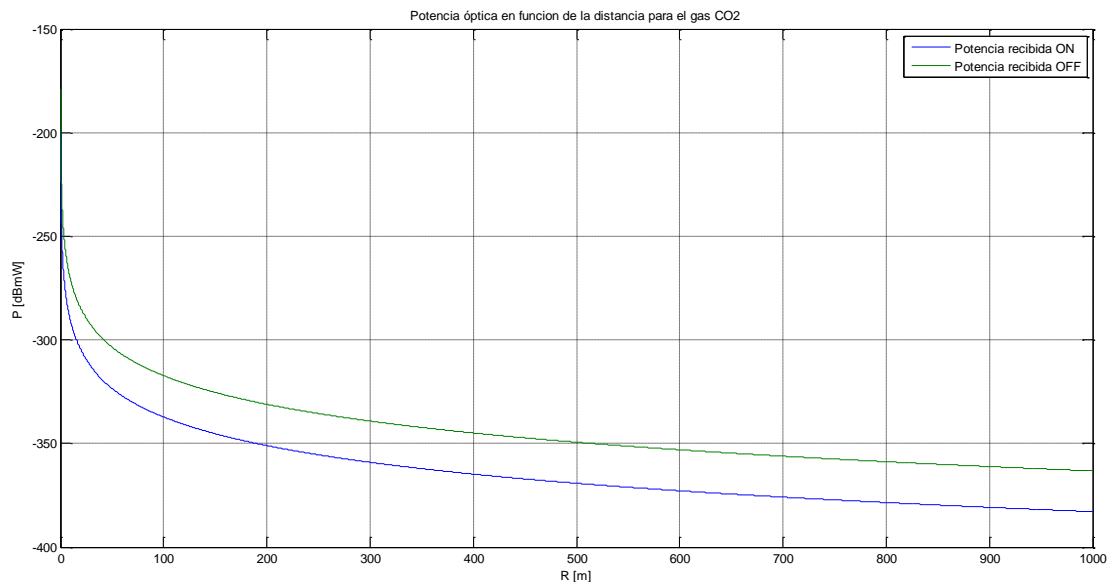
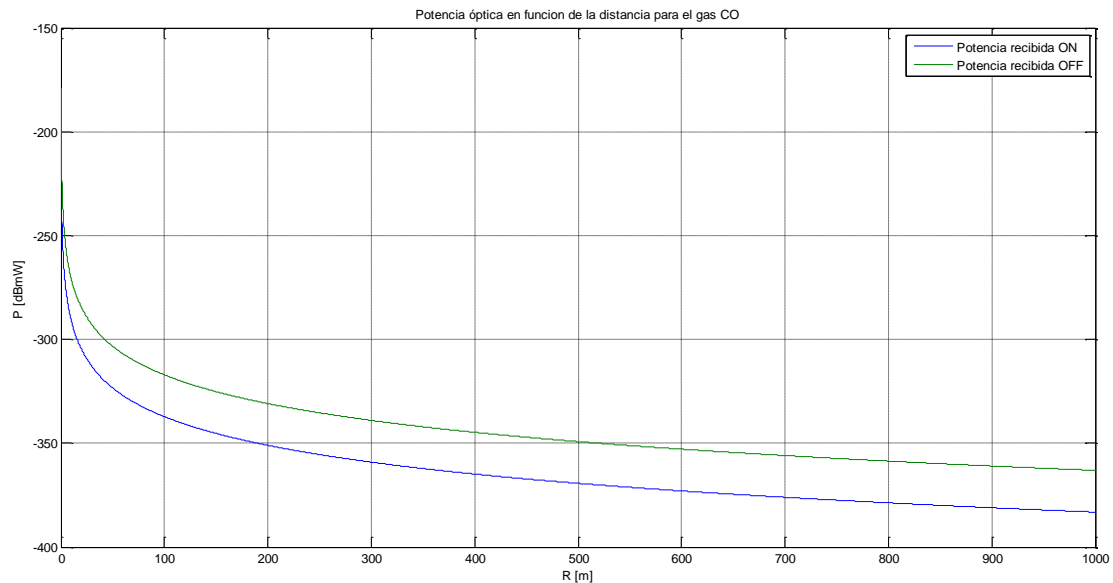


Ilustración 5. 14: Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO<sub>2</sub>.

Si se elige el monóxido de carbono (CO) como gas a detectar, se obtiene la siguiente gráfica de la evolución de la potencia óptica con la distancia.



**Ilustración 5. 15:** Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO.

Como se puede apreciar en las dos figuras anteriores, la potencia recibida ON siempre es menor que la potencia recibida OFF ya que la primera es la potencia a la longitud de onda en la que el contaminante absorbe la luz, mientras que en la segunda, el contaminante no absorbe.

Por último, si el gas elegido es el monóxido de nitrógeno (NO), el programa muestra en pantalla un mensaje de error. Esto es debido a que el NO, no es posible medirlo mediante el programa planteado porque, como se comentó en la sección 5.1 del trabajo, este gas absorbe en unas longitudes de onda que se encuentran fuera del rango de trabajo de los láseres utilizados.

```

Seleccione el gas a detectar [CO2, CO o NO]: NO
El gas elegido no puede ser detectado por el LiDAR simulado.
fx >>

```

**Ilustración 5. 16:** Mensaje de error al escoger el gas NO.

En las dos simulaciones correctas (para el  $\text{CO}_2$  y para el  $\text{CO}$ ), el valor de  $\beta(\lambda, \theta, R)$  en la ecuación 4.4 del documento es muy bajo porque la dependencia con la longitud de onda elevado a la cuarta hace que, al aumentar la longitud de onda, baje mucho el valor de este término. Los LiDAR convencionales funcionan típicamente en el rango de onda visible, por ejemplo, 532 nm, mientras que el estudiado en el presente trabajo lo hace en torno a 1570 nm, lo que hace que la señal retroesparcida sea bastante menor. Esta situación provoca que la potencia recibida sea menor que el NEP, haciendo imposible calcular una distancia máxima (esta distancia máxima se calcula cuando el NEP es igual a la potencia recibida). Si se disminuye el paso de R en el programa, se obtiene lo siguiente:

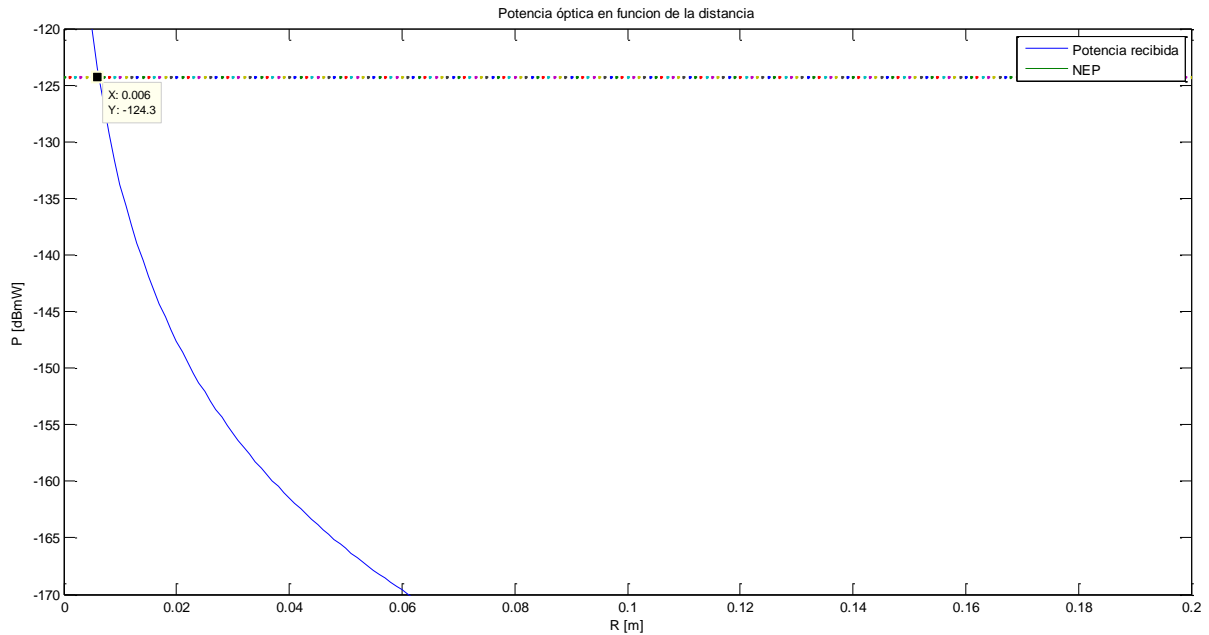


Ilustración 5. 17: Comparación de la NEP con la potencia recibida.

Es decir, la potencia recibida y el NEP coinciden a una distancia de 0.006 metros, un valor inviable e inútil para una distancia de trabajo de un sistema LiDAR. Esto significa que el diseño planteado no es el adecuado. Para alcanzar el diseño correcto, se plantean en la sección siguiente diferentes mejoras.

### 5.6.1. Mejoras al diseño planteado.

A continuación, se plantearán diferentes cambios en el diseño planteado para tener un sistema LiDAR adecuado.

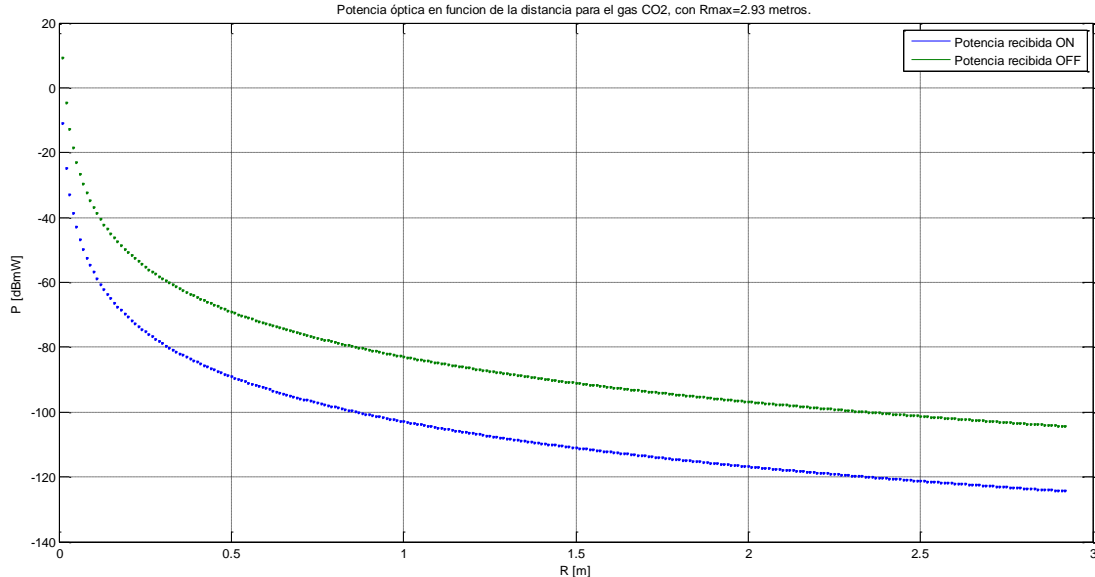
#### *Usar un láser pulsado.*

El láser de fibra propuesto en el primer diseño es de emisión continua, que se enciende y apaga para generar el pulso. Se puede colocar un láser pulsado con picos de potencia extremadamente altos utilizando la técnica del Q-switching (los picos son tan altos que se utilizan a menudo para tratar de eliminar tatuajes o manchas de la piel).

Se elegirá el láser de fibra comercial NuTx, de *Nufern* [35]. Aunque está en desarrollo, para los propósitos del trabajo es válido ya que trabaja en el rango de longitudes de onda que se necesitan y tiene una potencia de pico de 4 kW.

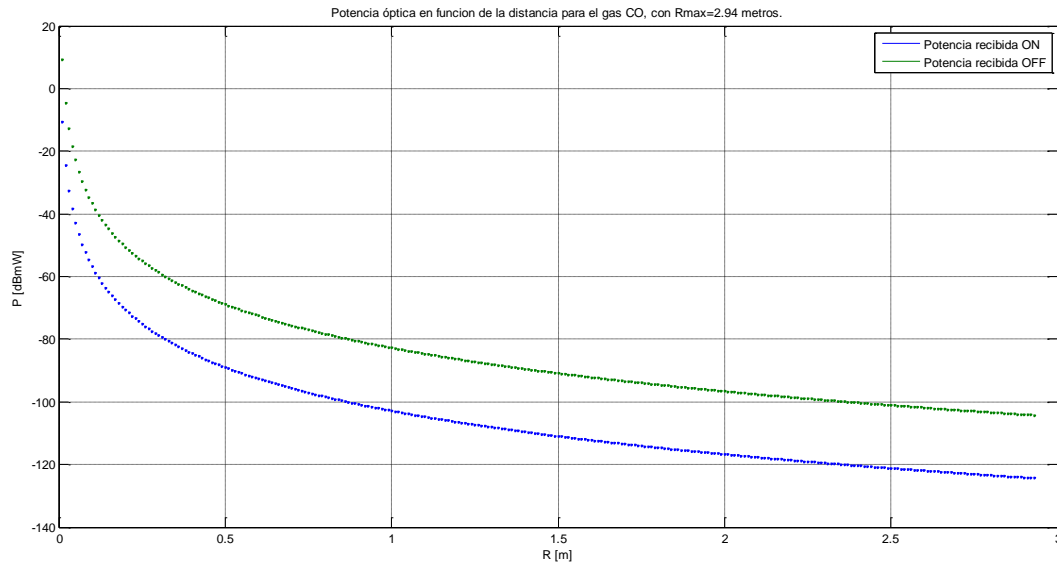
Por lo que, sustituyendo la potencia del láser planteada en primer lugar (10 mW) por la del láser mediante la técnica Q-switching (4 kW), se realizará una simulación en Matlab. En el apéndice B se encuentra el programa completo de Matlab utilizado para obtener los resultados de esta simulación.

Para el caso del CO<sub>2</sub>, se obtiene la siguiente evolución de la potencia óptica con la distancia, obteniendo una distancia máxima de trabajo de 2.93 m.



**Ilustración 5. 18:** Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO<sub>2</sub>, con distancia máxima de trabajo.

Para el caso del CO, se obtiene la siguiente evolución de la potencia óptica con la distancia, obteniendo una distancia máxima de trabajo de 2.94 m.

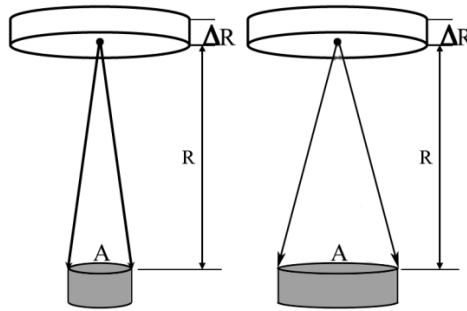


**Ilustración 5. 19:** Potencia óptica en dBmW en función de la distancia  $R$  (metros) para el CO, con distancia máxima de trabajo.

Analizando los resultados obtenidos, se puede observar que, utilizando el láser con la técnica Q-switching, mejora la potencia recibida del sistema, ya que, al aumentar en un factor de  $10^6$  la potencia del láser, la potencia de la luz capturada es mayor que en la del primer caso y existe una distancia de trabajo del sistema máxima, con unos valores más viables con respecto a los que aparecerían en el primer diseño, aunque un sistema LiDAR con una distancia de trabajo máxima de trabajo de aproximadamente 3 metros sigue siendo un valor ineficaz. Por este motivo, en el siguiente punto del trabajo se trabajará una nueva mejora del diseño.

Aumentar el área emisora y recolectora de la luz.

Mediante la colocación de un telescopio, se puede simular cómo aumentar la potencia recibida con el diámetro de la lente, como en muchos LiDAR comerciales. El telescopio es un instrumento óptico con espejos en el lugar de la lente planteada en el primer diseño, que tiene la característica de poder ser muy grande, con diámetros de 300 mm o 400 mm. Aumentando mucho el área y por tanto, aumentando el término  $\frac{A}{R^2}$  de la ecuación general, se consigue capturar más luz en el receptor. Al sustituir la lente por ese otro dispositivo, a la hora de simular en Matlab en lugar de la transmitancia de la lente, se colocará la reflectividad de los espejos, que es lo mismo a efectos de la ecuación.

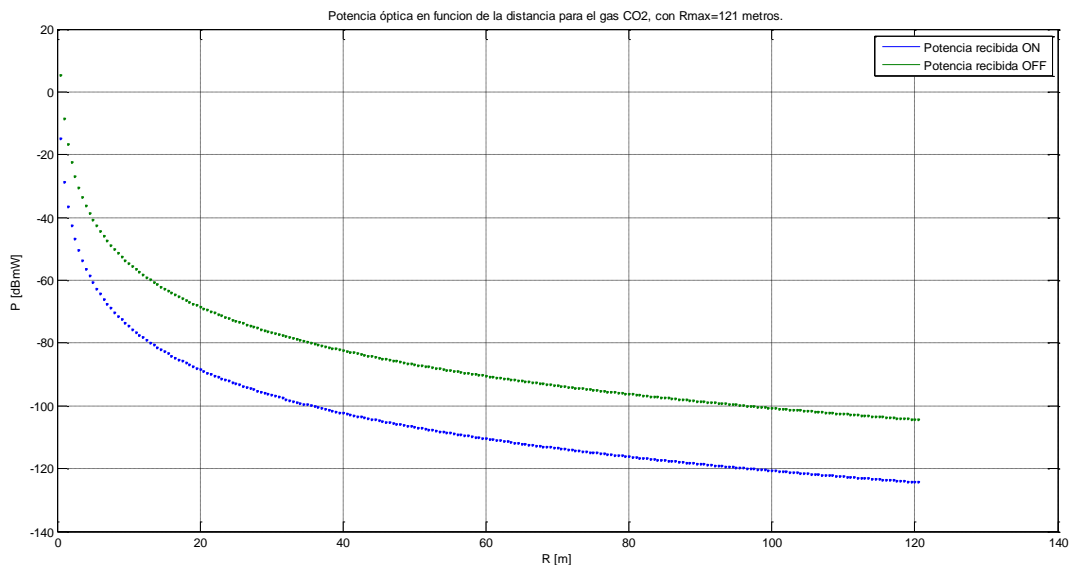


**Ilustración 5. 20:** Área detectada sin telescopio (izqda.) y área detectada con telescopio (dcha.).

El telescopio comercial elegido es el ODK12, de *Orion Optics UK* [36], que tiene un diámetro de 300 mm y una distancia focal de 2040 mm. Tiene tres espejos con recubrimiento de alta reflectividad Hilux, con una reflectividad del 97% [37]. De esta forma, sustituyendo la distancia focal en la ecuación general para calcular el área recolectora de la luz en función de la longitud de onda, se obtiene:

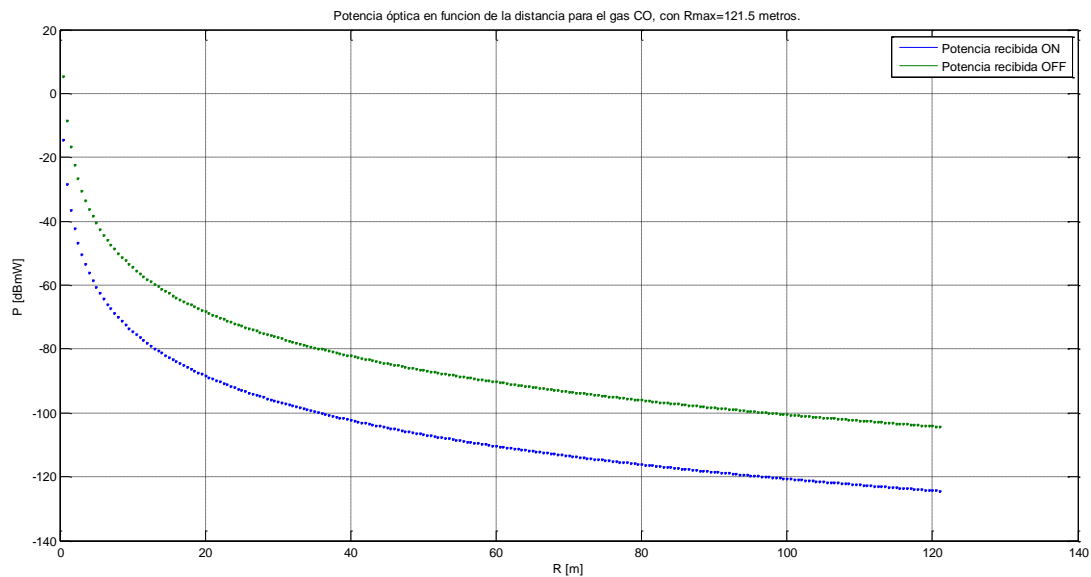
$$A = \pi \cdot r_{HAZcolimado}^2 = \pi \cdot \left( f \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot 4.5 \mu m} \right)^2 = \pi \cdot \left( 2040 mm \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot 4.5 \mu m} \right)^2 \quad (5.9)$$

En el apéndice C se encuentra el programa completo de Matlab utilizado para obtener los resultados de esta simulación, utilizando el láser con la técnica Q-switching de la sección anterior. Así, al simular para el gas CO<sub>2</sub>, se obtiene la siguiente figura con una distancia máxima de trabajo 121 metros:



**Ilustración 5. 21:** Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO<sub>2</sub>, con distancia máxima de trabajo.

Al simular el gas CO, se obtiene la siguiente figura con una distancia máxima de trabajo 121.5 metros:



**Ilustración 5. 22:** Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO, con distancia máxima de trabajo.

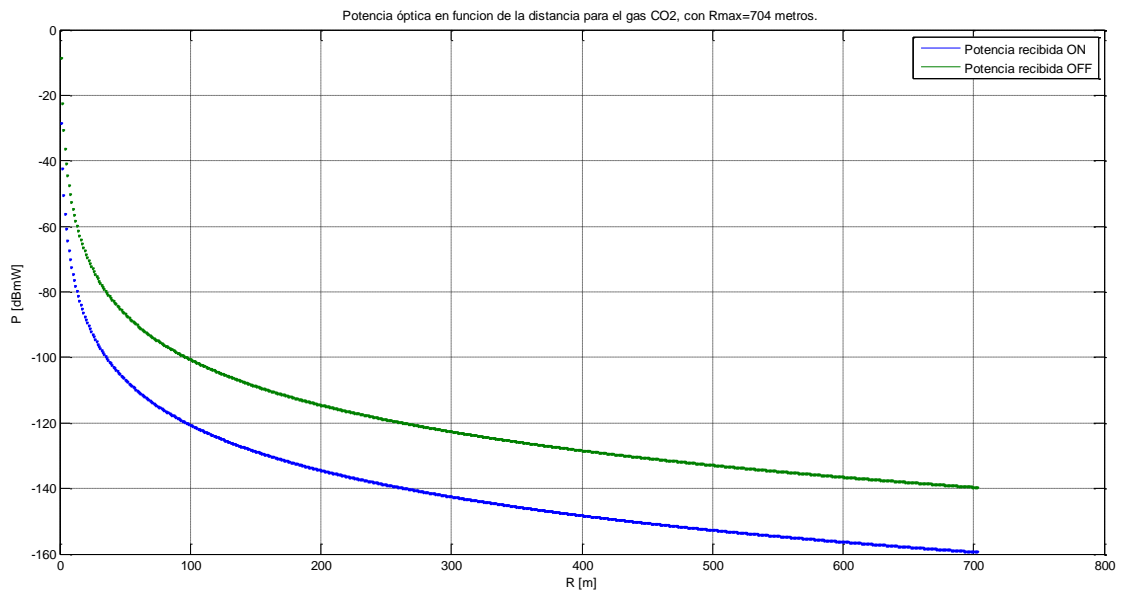
Si analizamos los resultados obtenidos en ambas ecuaciones, se observa, que la distancia de trabajo obtenida es más grande con respecto a la anterior mejora. Esto es debido a que al colocar el telescopio en el sistema, el área receptora de la luz ha aumentado en un factor de  $10^2$ , provocando que el factor  $\frac{A}{R^2}$  de la ecuación general para calcular la potencia recibida, aumente también. A pesar de haber aumentado la distancia de trabajo, se planteará una última mejora al diseño en el siguiente punto del trabajo.

*Elegir un receptor comercial con un NEP menor que el escogido.*

Si se quiere disminuir el NEP del receptor no es necesario cambiar el receptor comercial, si no colocar un filtro de paso bajo que disminuya el ancho de banda del sistema hasta, por ejemplo, 10 kHz. El filtro elegido es un paso bajo de *Thorlabs* [38], con una transmisión del 80%. De esta forma, el NEP con el que habrá que comparar la potencia recibida será:

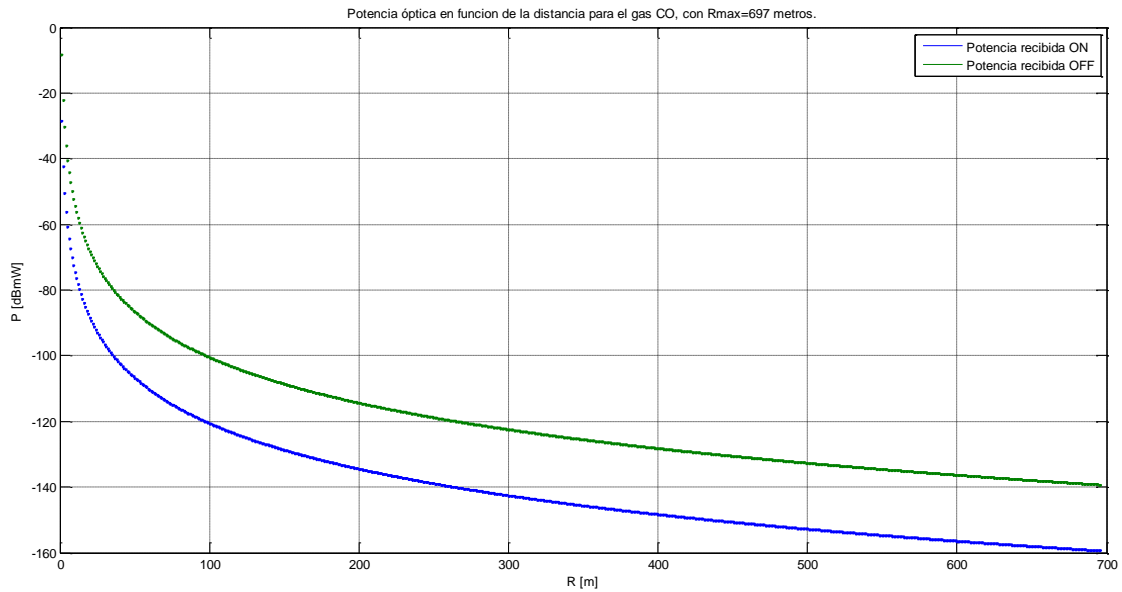
$$NEP = 0.40 \frac{pW}{\sqrt{Hz}} \cdot \sqrt{100 kHz} = 126.49 pW = 0.126 nW \quad (5.10)$$

En el apéndice D se encuentra el programa completo de Matlab utilizado para obtener los resultados de esta simulación, utilizando el telescopio y el láser con la técnica Q-switching de las secciones anteriores. Para el caso del gas CO<sub>2</sub>, se obtiene la siguiente figura con una distancia máxima de trabajo 704 metros:



**Ilustración 5. 23:** Potencia óptica en dBmW en función de la distancia R (metros) para el CO<sub>2</sub>, con distancia máxima de trabajo.

Para el caso del gas CO, se obtiene la siguiente figura con una distancia máxima de trabajo 697 metros:



**Ilustración 5. 24:** Potencia óptica en dBmW en función de la distancia  $R$  (metros) para el CO, con distancia máxima de trabajo.

Como se puede observar, la distancia de trabajo del sistema LiDAR ha aumentado considerablemente respecto a los primeros diseños. Esto es debido a que, aunque la potencia recibida no haya variado, el valor del NEP ha disminuido, por lo que la distancia máxima a la que la potencia y el NEP son iguales, es menor.

## 6. Conclusión.

En el presente trabajo de fin de grado se ha comenzado analizando los fundamentos del sistema LiDAR, con los diferentes dispositivos que componen el sistema, continuando con la clasificación de los diferentes tipos de sistema LiDAR, para finalizar estudiando y simulando la ecuación general mediante el programa Matlab para un sistema LiDAR utilizando la técnica DIAL.

En la primera simulación de la ecuación llevada a cabo mediante el programa Matlab, se descubrió que el diseño planteado no era el adecuado, ya que, aunque la potencia recibida ON era menor que la potencia recibida OFF, no era posible detectar una distancia máxima de trabajo, por lo que se plantearon diversas mejoras.

La primera mejora fue utilizar un láser de fibra con la técnica Q-switching en lugar del láser de fibra de emisión continua propuesto en el primer diseño. Se obtuvo una distancia de trabajo máxima, pero todavía no aceptable referido a un sistema LiDAR real.

La segunda mejora fue utilizar un telescopio para capturar una mayor cantidad de luz en el receptor, aumentando en un factor de 40 la distancia de trabajo máxima. Esta mejora se acerca más a la distancia aceptable en un sistema LiDAR pero es una solución no siempre práctica por el tamaño del sistema óptico.

La última mejora tuvo que ver con el NEP (*Noise equivalent power*) del receptor. Se disminuyó el NEP, reduciendo el ancho de banda del sistema. El resultado obtenido fue una distancia de trabajo máxima para el sistema válida para un sistema LiDAR real, mayor que las distancias anteriores obtenidas. Una contra de esta mejora es que, al reducir el ancho de banda, los cambios rápidos en el sistema se pierden y, por tanto, ya no se resuelve espacialmente la concentración con tanta resolución. A pesar de este problema, el sistema seguiría funcionando, lo que hace a esta mejora la solución más económica y funcional de las tres planteadas, ya que el precio del filtro del sistema para reducir el ancho de banda es bastante menor comparado con el del telescopio.

Una vez resueltos los problemas de diseño de una forma satisfactoria, una posible línea futura sería implementar y mejorar en el laboratorio del GIF un sistema como el planteado (siempre que los componentes y materiales lo permitan), analizando su viabilidad y prestaciones.

Una aplicación real de un sistema LiDAR que, de hecho se está desarrollando actualmente por el Grupo de Medición Ambiental y el Centro de Medición de Carbono en el Laboratorio Nacional de Física de Reino Unido [39], es la instalación de un sistema LiDAR utilizando la técnica DIAL en un laboratorio móvil, que puede ser enviado o conducido a donde se necesite, para obtener mediciones exactas de las emisiones en el aire. Se ha estado utilizado para obtener un seguimiento de las emisiones de gas y petróleo en Noruega, emisiones de benceno en el puerto de Rotterdam o fugas de metano de algunos vertederos del Reino Unido.

Otra aplicación real de un sistema LiDAR, pero esta vez sin utilizar la técnica DIAL, es la planteada por General Motors y Opel: una tecnología de conducción autónoma. Proponen un coche equipado con sensores LiDAR colocados en el parachoques, que están constantemente escaneando en busca de objetos alrededor, para así permitir que el vehículo conduzca de forma autónoma tanto en condiciones a baja velocidad, como puede suceder en la ciudad o bien a altas velocidades, como puede ocurrir en una autopista.

## 6.Conclusión.

Desde hace varios años, un objetivo de la Dirección General de Tráfico en España [40], es sustituir los actuales radares por radares láser de pistola. Estos nuevos radares son un sistema LiDAR utilizando la técnica Doppler. Tienen la ventaja de ser rápidos, precisos, selectivos (se pueden utilizar incluso con tráfico denso e identificar la velocidad de un solo vehículo) y pueden controlar tres carriles al mismo tiempo.

En resumen, la técnica LiDAR es una técnica muy poderosa, selectiva, en pleno auge, cuya principal desventaja, en el caso que se desee una distancia muy grande de trabajo, es su coste. Presenta ventajas frente a otras técnicas de monitorización de la atmósfera o detección de velocidad y es por eso que existe un justificado creciente interés y esfuerzo continuo de mejora de los sistemas basados en ella. De esta forma, hoy en día, la técnica LiDAR se ha convertido en una herramienta importante que permite estudiar diferentes campos, como medición de contaminantes, transporte a gran distancia, medición de aerosoles originados en erupciones volcánicas, monitoreo de partículas de aerosol o monitoreo de la calidad del aire.

## 7. Bibliografía

- [1] Otakar Wilfert y Ales Prokes, «Laser radar cross section in 850 nm region,» FEEC VUT, Brno.
- [2] JELALIAN, A. V., Laser radar systems, London: Artech House, 1992.
- [3] Differences between LED and laser, <http://www.physicsforums.com/showthread.php?t=182755>.
- [4] Differences between LED and laser, <http://www.durofy.com/technology/differences-between-led-laser/>.
- [5] LED diode, <http://micro.rohm.com/en/products/lighting/led/index.html>.
- [6] LED diode, <http://searchcio-midmarket.techtarget.com/definition/light-emitting-diode>.
- [7] Laser diode, <http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/laser/fundamentals.htm>.
- [8] Laser diode, <http://www.howstuffworks.com/laser7.htm>.
- [9] Spontaneous and stimulated emission process,  
<http://www.sp.phy.cam.ac.uk/~SiGe/Stimulated%20Emission.html>.
- [10] Fuentes de luz y el transmisor óptico,  
[http://grupos.unican.es/gif/co5/CO5\\_0809\\_T2\\_transmisor\\_1tpp.pdf](http://grupos.unican.es/gif/co5/CO5_0809_T2_transmisor_1tpp.pdf).
- [11] Fabry-Perot laser, [http://www.invocom.et.put.poznan.pl/~invocom/C/P1-9/swiatlowody\\_en/p1-1\\_6\\_5.htm](http://www.invocom.et.put.poznan.pl/~invocom/C/P1-9/swiatlowody_en/p1-1_6_5.htm).
- [12] VCSEL laser, <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/fiber-optic-test-equipment/>.
- [13] «El modulador óptico,» de *Apuntes de sistemas de comunicaciones ópticas*, Universidad de Cantabria, 2011.
- [14] PIN photodiode, [http://www.imedeia.uib.es/~salvador/coms\\_optiques/addicional/ibm/ch04/04-02.html](http://www.imedeia.uib.es/~salvador/coms_optiques/addicional/ibm/ch04/04-02.html).
- [15] Conceptos sobre Lentes, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/geoopt/lenscon.html#c1>.
- [16] PIN fotodiodo, [http://nemesia.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2\\_5\\_3.htm](http://nemesia.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_5_3.htm).
- [17] Fotodiodo APD, [http://www.imedeia.uib.es/~salvador/coms\\_optiques/addicional/ibm/ch04/04-05.html](http://www.imedeia.uib.es/~salvador/coms_optiques/addicional/ibm/ch04/04-05.html).
- [18] Sistemas ópticos coherentes y no coherentes,  
[http://www2.elo.utism.cl/~elo357/Presentaciones\\_2009/Sistemas\\_Opticos\\_Coherentes\\_2011.pdf](http://www2.elo.utism.cl/~elo357/Presentaciones_2009/Sistemas_Opticos_Coherentes_2011.pdf).
- [19] CLAUS WEITKAMP, LIDAR Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, 2005.
- [20] Configuration for DIAL, <http://clu-in.org/programs/21m2/openpath/lidar/>.
- [21] Ph.D. Maj. Roberto Sabatini y Dr. Mark A. Richardson, Airborne Laser Systems Testing and Analysis, Abril 2010.
- [22] Xinzhaoh Chu, Universidad de Colorado, Curso "Lidar Remote Sensing".
- [23] Radiación solar y fotosíntesis, <https://naturalmenteciencias.wordpress.com/tag/radiacion-solar/>.
- [24] TAKASHI FUJII y TETSUO FUKUCHI, Laser Remote Sensing, 2005.
- [25] HITRAN, <http://hitran.iao.ru/molecule/bands/mol/2>.
- [26] MIT Technology Review, «Las ppm atmosféricas de CO2 han aumentado un 42% desde 1750,»  
[http://www.technologyreview.es/read\\_article.aspx?id=46054](http://www.technologyreview.es/read_article.aspx?id=46054), 2014.
- [27] Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio y Urbanismo del Gobierno de Cantabria,  
<http://www.airecantabria.com/index.php>.
- [28] Ana María Cubillas de Cos, Tesis Doctoral "Contribuciones a la detección y medida de gases mediante técnicas ópticas espectroscópicas en fibras de cristal fotónico", Universidad de Cantabria, 2009.
- [29] Sergio Rota-Rodrigo, Luis Rodríguez-Cobo, María Ángeles Quintela, José Miguel López-Higuera y Manuel López-Amo, «Dual-Wavelength Single-Longitudinal Mode Fiber,» *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, VOL. 20, NO. 5, Septiembre/Octubre 2014.
- [30] RP Photonics Encyclopedia, [http://www.rp-photonics.com/fiber\\_collimators.html](http://www.rp-photonics.com/fiber_collimators.html).

- [31] Lente LA1740-C de Thorlabs, <http://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=LA1740-C>.
- [32] Recubrimientos ópticos de Thorlabs, [http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=5840](http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5840).
- [33] Filtro Fabry-Perot,  
[http://www.micronoptics.com/uploads/library/documents/datasheets/tunable\\_filters/Micron\\_Optics\\_FFP-TF2.pdf](http://www.micronoptics.com/uploads/library/documents/datasheets/tunable_filters/Micron_Optics_FFP-TF2.pdf).
- [34] Laser components, <http://www.lasercomponents.com/de-en/>.
- [35] Láser de fibra NuTx de Nufern, [http://www.nufern.com/filestorage/families/file\\_flyer\\_10.pdf](http://www.nufern.com/filestorage/families/file_flyer_10.pdf).
- [36] Telescopio ODK12, <http://www.orionoptics.co.uk/ODK/odk12.html>.
- [37] Recubrimiento de los espejos del telescopio,  
<http://www.orionoptics.co.uk/OPTICS/opticalcoatingsh.html>.
- [38] Filtro paso bajo, de Thorlabs, <http://www.thorlabs.de/catalogpages/V21/813.PDF>.
- [39] New laser lab on wheels to reduce emissions, <http://www.npl.co.uk/news/new-laser-lab-on-wheels-to-reduce-emissions>.
- [40] «BOE» núm. 191, <https://www.boe.es/boe/dias/2014/08/07/pdfs/BOE-B-2014-28794.pdf>, Ministerio del Interior, 7 de agosto de 2014.

## Apéndice A.

---

Programa de Matlab utilizado en la sección 5.6 del documento:

```
clc;
clear all;
close all;

syms CO2 co2 CO co NO no;
gas=input('Seleccione el gas a detectar [CO2, CO o NO]: ');

if (gas=='CO2' || gas=='co2')
    lambdaON=1573e-9; %Metros
    lambdaOFF=1574e-9; %Metros
    absorcion=1.8e-23; %cm-1*mol-1*cm2
    concentracion=396e-6; %Fraccion molar
elseif (gas=='CO' || gas=='co')
    lambdaON=1568e-9; %Metros
    lambdaOFF=1560e-9; %Metros
    absorcion=2.2e-23; %cm-1*mol-1*cm2
    concentracion=0.175e-9; %Fraccion molar
elseif (gas=='NO' || gas=='no')
    disp(' El gas elegido no puede ser detectado por el LiDAR simulado.')
    break;
end

%% General
NEP=4e-9;
deltaR=4.5;
Plaser=10e-3; %Potencia del laser
tlente=0.99; %Transmision de la lente
tfiltro=1/(10^(1.5/10)); %Perdidas de inserccion del filtro
transmiTotal=tlente*tfiltro; %Transmision total (eficiencia)

%General caso ON
betaON=9.9206e-32*inv(lambdaON^4.0117);
radioON=85e-3*(lambdaON/(pi*4.5e-6));
Aon=pi*(radioON^2); %Area receptora de la luz para beta ON

%General caso OFF
betaOFF=9.9206e-32*inv(lambdaOFF^4.0117);
radioOFF=85e-3*(lambdaOFF/(pi*4.5e-6));
Aoff=pi*(radioOFF^2); %Area receptora de la luz para beta OFF

%% Bucle ecuacion
R=0:0.1:1000; %R en metros
alfa=(absorcion*7.34e21/300)*1*(concentracion)*(100*R);
alfa=1-alfa;
PrecON=10*log((Plaser*(betaON*deltaR)*(Aon./(R.^2)).*(exp(1).^(-2*alfa)))*(transmiTotal*1))/1e-3);
PrecOFF=10*log((Plaser*(betaOFF*deltaR)*(Aoff./(R.^2))*(transmiTotal*1))/1e-3);
figure(1)
plot(R,PrecON, R, PrecOFF)
hold on; grid on; xlabel('R [m]');ylabel('P [dBmW]');
gas=char(gas);
title(['Potencia óptica en funcion de la distancia para el gas ', gas]);
legend('Potencia recibida ON','Potencia recibida OFF');
```

## Apéndice B.

---

Programa de Matlab utilizado en la sección 5.6.1 del documento, empleando un láser mediante la técnica Q-switching:

```
clc;
clear all;
close all;

syms CO2 co2 CO co NO no;
gas=input('Seleccione el gas a detectar [CO2, CO o NO]: ');

if (gas=='CO2' || gas=='co2')
    lambdaON=1573e-9; %Metros
    lambdaOFF=1574e-9; %Metros
    absorcion=1.8e-23; %cm-1*mol-1*cm2
    concentracion=396e-6; %Fraccion molar
elseif (gas=='CO' || gas=='co')
    lambdaON=1568e-9; %Metros
    lambdaOFF=1560e-9; %Metros
    absorcion=2.2e-23; %cm-1*mol-1*cm2
    concentracion=0.175e-9; %Fraccion molar
elseif (gas=='NO' || gas=='no')
    disp(' El gas elegido no puede ser detectado por el LiDAR simulado.')
    break;
end

%% General
NEP=4e-9;
deltaR=4.5;
Plaser=15e3; %Potencia del laser
tlente=0.99; %Transmision de la lente
tfiltro=1/(10^(1.5/10)); %Perdidas de inserccion del filtro
transmiTotal=tlente*tfiltro; %Transmision total (eficiencia)

%General caso ON
betaON=9.9206e-32*inv(lambdaON^4.0117);
radioON=85e-3*(lambdaON/(pi*4.5e-6));
Aon=pi*(radioON^2); %Area receptora de la luz para beta ON

%General caso OFF
betaOFF=9.9206e-32*inv(lambdaOFF^4.0117);
radioOFF=85e-3*(lambdaOFF/(pi*4.5e-6));
Aoff=pi*(radioOFF^2); %Area receptora de la luz para beta OFF

%% Bucle ecuacion
flag=true;
R=0; %R en metros
while flag
    R
    alfa=(absorcion*7.34e21/300)*1*(concentracion)*(100*R);
    alfa=1-alfa;
    PrecON=10*log((Plaser*(betaON*deltaR)*(Aon./(R.^2)).*(exp(1).^(-
2*alfa)))*(transmiTotal*1))/1e-3);

    PrecOFF=10*log((Plaser*(betaOFF*deltaR)*(Aoff./(R.^2))*(transmiTotal*1))/1
e-3);
```

```

figure(1)
plot(R,PrecON, R, PrecOFF)
hold on
grid on;
xlabel('R [m]');ylabel('P [dBmW]');
if PrecON<10*log(NEP/1e-3)
    flag=false;
end
R=R+0.01;
end
R=num2str(R);
gas=char(gas);
title(['Potencia óptica en funcion de la distancia para el gas ', gas, ',
con Rmax=', R, ' metros.']);
legend('Potencia recibida ON','Potencia recibida OFF');

```

## Apéndice C.

---

Programa de Matlab utilizado en la sección 5.6.1 del documento, empleando un láser mediante la técnica Q-switching y un telescopio:

```
clc;
clear all;
close all;

syms CO2 co2 CO co NO no;
gas=input('Seleccione el gas a detectar [CO2, CO o NO]: ');

if (gas=='CO2' || gas=='co2')
    lambdaON=1573e-9; %Metros
    lambdaOFF=1574e-9; %Metros
    absorcion=1.8e-23; %cm-1*mol-1*cm2
    concentracion=396e-6; %Fraccion molar
elseif (gas=='CO' || gas=='co')
    lambdaON=1568e-9; %Metros
    lambdaOFF=1560e-9; %Metros
    absorcion=2.2e-23; %cm-1*mol-1*cm2
    concentracion=0.175e-9; %Fraccion molar
elseif (gas=='NO' || gas=='no')
    disp(' El gas elegido no puede ser detectado por el LiDAR simulado.')
    break;
end

%% General
NEP=4e-9;
deltaR=4.5;
Plaser=15e3;
tEspejo=0.97;
tfiltro=1/(10^(1.5/10)); %Perdidas de inserccion del filtro
transmiTotal=(3*tEspejo)*tfiltro; %Transmision total (eficiencia)

%General caso ON
betaON=9.9206e-32*inv(lambdaON^4.0117);
dFocal=2040e-3;
radioON=dFocal*(lambdaON/(pi*4.5e-6));
Aon=pi*(radioON^2);

%General caso OFF
betaOFF=9.9206e-32*inv(lambdaOFF^4.0117);
dFocal=2040e-3;
radioOFF=dFocal*(lambdaOFF/(pi*4.5e-6));
Aoff=pi*(radioOFF^2);

%% Bucle ecuacion
flag=true;
R=0; %R en metros
while flag
    R
    alfa=(absorcion*7.34e21/300)*1*(concentracion)*(100*R);
    alfa=1-alfa;
    PrecON=10*log((Plaser*(betaON*deltaR)*(Aon./(R.^2))*(exp(1)^(-
2*alfa)))*(transmiTotal*1))/1e-3)

    PrecOFF=10*log((Plaser*(betaOFF*deltaR)*(Aoff./(R.^2))*(transmiTotal*1))/1
e-3)
```

```

figure(1)
plot(R,PrecON, R, PrecOFF)
hold on
grid on;
xlabel('R [m]');ylabel('P [dBmW]');
if PrecON<10*log(NEP/1e-3)
    flag=false;
end
R=R+0.5;
end
R=num2str(R);
gas=char(gas);
title(['Potencia óptica en funcion de la distancia para el gas ', gas, ',
con Rmax=', R, ' metros.']);
legend('Potencia recibida ON','Potencia recibida OFF');

```

## Apéndice D.

---

Programa de Matlab utilizado en la sección 5.6.1 del documento, empleando un láser mediante la técnica Q-switching, un telescopio y reduciendo el NEP del receptor:

```
clc;
clear all;
close all;

syms CO2 co2 CO co NO no;
gas=input('Seleccione el gas a detectar [CO2, CO o NO]: ');

if (gas=='CO2' || gas=='co2')
    lambdaON=1573e-9; %Metros
    lambdaOFF=1574e-9; %Metros
    absorcion=1.8e-23; %cm-1*mol-1*cm2
    concentracion=396e-6; %Fraccion molar
elseif (gas=='CO' || gas=='co')
    lambdaON=1568e-9; %Metros
    lambdaOFF=1560e-9; %Metros
    absorcion=2.2e-23; %cm-1*mol-1*cm2
    concentracion=0.175e-9; %Fraccion molar
elseif (gas=='NO' || gas=='no')
    disp(' El gas elegido no puede ser detectado por el LiDAR simulado.')
    break;
end

%% General
NEP=0.12e-9;
deltaR=4.5;
Plaser=15e3;
tEspejo=0.97;
tfiltro=1/(10^(1.5/10)); %Perdidas de inserccion del filtro
transmiTotal=(3*tEspejo)*tfiltro; %Transmision total (eficiencia)

%General caso ON
betaON=9.9206e-32*inv(lambdaON^4.0117);
dFocal=2040e-3;
radioON=dFocal*(lambdaON/(pi*4.5e-6));
Aon=pi*(radioON^2);

%General caso OFF
betaOFF=9.9206e-32*inv(lambdaOFF^4.0117);
dFocal=2040e-3;
radioOFF=dFocal*(lambdaOFF/(pi*4.5e-6));
Aoff=pi*(radioOFF^2);

%% Bucle ecuacion
flag=true;
R=0; %R en metros
while flag
    R
    alfa=(absorcion*7.34e21/300)*1*(concentracion)*(100*R);
    alfa=1-alfa;
    PrecON=10*log((Plaser*(betaON*deltaR)*(Aon./(R.^2))*(exp(1)^(-
2*alfa)))*(transmiTotal*1))/1e-3)

    PrecOFF=10*log((Plaser*(betaOFF*deltaR)*(Aoff./(R.^2))*(transmiTotal*1))/1
e-3)
```

```

divi=PrecON/PrecOFF
figure(1)
plot(R,PrecON, R, PrecOFF)
hold on
grid on;
xlabel('R [m]');ylabel('P [dBmW]');
if PrecON<10*log(NEP/1e-3)
    flag=false;
end
R=R+1;
end
R=num2str(R);
gas=char(gas);
title(['Potencia óptica en funcion de la distancia para el gas ', gas, ',
con Rmax=', R, ' metros.']);
legend('Potencia recibida ON','Potencia recibida OFF');

```