

---

---

# Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

*Desarrollo de un sistema LIDAR de laboratorio con  
detección sensible a fase.*

---

---

Tesis que presenta:

NANCY MONTALVO MONTALVO

Para obtener el grado de Licenciatura en Electrónica.



Facultad de Ciencias de la Electrónica.  
BUAP

Director de tesis: José Antonio Dávila Pintle.  
Asesores: Edmundo Reynoso Lara e Iván Gómez  
Arista.

ENERO 2020



## RESUMEN

**E**n esta tesis se realiza un análisis sobre el funcionamiento de un sistema LIDAR, también se muestra el monitoreo (medición y registro) de medios gaseosos para estudiar el comportamiento de la señal retrodispersada que es medida mediante una técnica no convencional y poco conocida: técnica de detección sensible a fase. Misma que da lugar a un capítulo completo donde se explica cuales son las ventajas y características que ofrece este importante método, su funcionamiento y que papel juega dentro de la medición y comprobación de la hipótesis planteada para este importante trabajo de investigación, a través de una señal de referencia; el cual permite analizar la señal capturada en el dominio de la frecuencia; misma que hace posible el análisis sobre la señal estudiada.

Así mismo se hace la descripción de la implementación de todos los elementos que conforman cada una de las etapas del sistema, tanto de los parámetros de especificación, funcionamiento y la interfaz de comunicación empleada para su correcto funcionamiento. Al final se muestran las conclusiones de implementar ésta técnica de medición, y verificar de forma física y experimental las ventajas que ésta nos ofrece.



## DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios en primer lugar por haberme permitido culminar una etapa más en mi vida, gracias padre celestial por ser mi fortaleza en todo momento. A mi familia porque todos y cada uno de ustedes me alentaron para continuar y apoyaron cuando más lo necesité, gracias a mis padres: Silvia y Cornelio por ser como son, sin su enseñanza y carácter jamás lo hubiese logrado, gracias madre por tu carácter tan fuerte y admirable, gracias padre por tus consejos y enseñanzas que me hicieron madurar y ser mejor cada día; a mis hermanas: María de Jesús, gracias por apoyarme en todos los aspectos y creer en mi siempre, Dulce gracias por enseñarme; a pesar de ser mi hermana menor, que la vida se puede vivir como uno decida, y finalmente a ti Yedid mi cómplice y compañera, gracias por apoyarme y aguantar mis facetas, aveces buenas, aveces malas, pero siempre dándome ánimos para no rendirme, gracias mi hermosa y gran familia, mi gran tesoro, al que no cambiaría por nada en este mundo. Gracias a mis amigos que estuvieron apoyandome siempre, en especial a Alejandro Rubín, gracias por ser mi amigo y cómplice de clases, gracias por tu gran colaboración en esta Tesis, sin tu conocimiento y artimañas de programación, jamás hubiese terminado.

Finalmente agradezco a mis asesores de Tesis, grandes personas de ciencia a las que siempre veo con gran admiración y respeto por su gran trabajo como investigadores, en especial a mi Director de tesis: Dr. José Antonio Dávila Pintle por invitarme a colaborar en este proyecto, por su paciencia, acompañamiento y asesoramiento a lo largo de todo este proceso.

Al Dr Edmundo Reynoso y al Dr. Iván Gómez Arista por su gran apoyo y ayuda en mis dudas más básicas, gracias por ser tan pacientes y tolerantes con migo.

Finalmente pero no menos importantes a mis sinudales de tesis, gracias a todos ustedes porque gracias a sus observaciones y cuestionamientos, he logrado crecer como estudiante, gracias Doctora Yolanda por sus minuciosas observaciones, por su apoyo y consejos.



## DECLARACIÓN DEL AUTOR

**D**eclaro que esta disertación fue escrita de acuerdo a los requerimientos y acuerdos de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla bajo el acompañamiento y asesoría de el Dr. José Antonio Dávila Pintle, Dr. Edmundo Reynoso Lara y el Dr. Iván Gómez Arista, pertenecientes al cuerpo académico de Optoelectrónica de la Facultad de Ciencias de la Electrónica, de la BUAP.

FIRMA: ..... FECHA: .....



# ÍNDICE

|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| <b>Índice de tablas</b>                                 | <b>ix</b>     |
| <b>Índice de figuras</b>                                | <b>xi</b>     |
| <b>I Introducción</b>                                   | <b>1</b>      |
| 1.1 Estado del arte . . . . .                           | 1             |
| 1.1.1 Justificación . . . . .                           | 2             |
| 1.2 Objetivos . . . . .                                 | 3             |
| 1.2.1 Objetivo general . . . . .                        | 3             |
| 1.2.2 Objetivos específicos . . . . .                   | 3             |
| 1.3 Alcances y limitaciones . . . . .                   | 4             |
| 1.4 Organización del trabajo . . . . .                  | 4             |
| <b>II Sistema LIDAR</b>                                 | <b>7</b>      |
| 2.1 Introducción . . . . .                              | 7             |
| 2.2 Antecedentes históricos . . . . .                   | 8             |
| 2.3 Principio de funcionamiento . . . . .               | 9             |
| 2.3.1 El Emisor . . . . .                               | 10            |
| 2.3.2 El receptor . . . . .                             | 12            |
| 2.4 Técnicas LIDAR . . . . .                            | 13            |
| 2.5 Ecuación del Lidar Monoestático . . . . .           | 14            |
| <b>III Técnica de detección sensible a fase</b>         | <b>19</b>     |
| 3.1 Lock-in y principio de funcionamiento. . . . .      | 19            |
| 3.2 Detector sensible a fase . . . . .                  | 21            |
| 3.3 Demodulación de Fase Dual . . . . .                 | 23            |
| 3.4 Serie de Fourier y la señal de referencia . . . . . | 24            |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>IV Implementación del sistema</b>  | <b>27</b> |
| 4.1 Arreglos experimentales físicos del OSLRF-01 . . . . .                  | 27        |
| 4.2 Acondicionamiento de la señal . . . . .                                 | 31        |
| 4.3 Protocolos de comunicación . . . . .                                    | 32        |
| 4.4 Sistema de adquisición y control . . . . .                              | 34        |
| 4.5 Medición de un sólido . . . . .   | 38        |
| 4.6 Medición de gases . . . . .   | 40        |
| 4.6.1 Medición de niebla e incienso . . . . .                               | 40        |
| <b>V Análisis y resultados</b>  | <b>53</b> |
| 5.1 Análisis Teórico . . . . .  | 53        |
| 5.1.1 Cálculo analítico . . . . .   | 59        |
| 5.1.2 Comparación y análisis de los coeficientes . . . . .                  | 62        |
| <b>VI Conclusiones</b>  | <b>67</b> |
| 6.0.1 Sobre el sistema . . . . .  | 67        |
| 6.0.2 Sobre la caracterización . . . . .                                    | 68        |
| 6.0.3 Sobre los resultados . . . . .  | 69        |
| <b>Bibliografía</b>   | <b>71</b> |
| <b>A Apéndice A: OSLRF-01</b>   | <b>73</b> |
| <b>B Apéndice B: SR-530</b>   | <b>77</b> |
| <b>C Apéndice C: Convertidor RS-232 a USB</b>                               | <b>81</b> |
| <b>D Apéndice D: Manual de usuario del Sistema de adquisición y control</b> | <b>85</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

| <b>TABLAS</b>  | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| II.1 Tabla resumen de comparación entre Diodos LED y láser [8]. . . . .  | 11            |
| IV.1 Resumen de conexión del OSLRF-01 . . . . .  | 29            |
| IV.2 Descripción de parámetros OSLRF-01 . . . . .  | 30            |
| IV.3 Resumen de conexión de RS-232 . . . . .   | 33            |
| IV.4 Tabla de especificaciones generales que explican la configuración del Interruptor 2 . . . . .   | 34            |
| IV.5 Tabla donde se especifican los parámetros que se deben asignar a la interfaz para establecer la comunicación hacia el Lock-in. . . . .                      | 35            |
| IV.6 Tabla de especificaciones generales donde se describen los comandos de captura y control de la interfaz principal. . . . .                                  | 37            |
| IV.7 Obtención de los datos de un sólido a diferentes distancias. . . . .  | 39            |
| IV.8 Se muestra la relación que existe entre las diferentes longitudes de la cámara de niebla y sus respectivos coeficientes de Fourier para la neblina. . . . . | 45            |
| IV.9 Se muestra la relación que existe entre las diferentes longitudes de la cámara de gas y sus respectivos coeficientes de Fourier, para el incienso. . . . .  | 48            |
| V.1 Se muestran los valores de los parámetros definidos para cada una de las cuatro Gaussianas utilizadas para el ajuste de la función retrodispersada. . .      | 59            |
| V.2 Se muestran los resultados teóricos calculados para la neblina. . . . .  | 60            |
| V.3 Se muestran los resultados teóricos calculados para el incienso. . . . .   | 61            |
| V.4 Tabla comparativa de los valores experimentales y calculados de la neblina. .  | 63            |
| V.5 Tabla comparativa de los valores experimentales y calculados de la neblina. .  | 64            |
| V.6 Tabla comparativa de los valores experimentales y calculados del incienso. . .   | 64            |
| V.7 Análisis estadístico de las razones de Fourier. . . . .  | 64            |
| VI.1 Tabla de especificaciones del LIDAR de laboratorio. . . . .   | 68            |

ÍNDICE DE TABLAS

---

A.1 Tabla sobre la información de la radiación del láser. . . . . 75

## ÍNDICE DE FIGURAS

| <b>FIGURAS</b>   | <b>Página</b> |
|--|---------------|
| II.1 Prototipo LIDAR, modelo OSLRF-01, disponible en el laboratorio de optoelectrónica de la Facultad de Ciencias de la Electrónica. . . . .   | 8             |
| II.2 Diagrama que muestra el funcionamiento del LIDAR. . . . .   | 10            |
| II.3 Figura que muestra el principio de operación de un láser. . . . .   | 11            |
| II.4 Figura que muestra el funcionamiento de un fotodiodo en su configuración fotovoltaica. . . . .  | 12            |
| II.5 Fotodiodo convierte la energía óptica en corriente eléctrica. . . . .   | 12            |
| II.6 Tres puntos de medición son combinados para formar un vector con la finalidad de determinar la dirección y velocidad del viento. . . . .  | 14            |
| II.7 Geometría de un LIDAR convencional[3]. . . . .  | 16            |
| III.1 En la figura se muestra un amplificador Lock-in, modelo SR530 Stanford Research Systems. . . . .   | 20            |
| III.2 Diagrama que muestra las fases que forman parte del Lock-in para mostrar de forma gráfica cual es el proceso que pasa una señal contaminada de ruido. . . . .  | 20            |
| III.3 Clásico modo de operación de un Detector Sensible a Fase, clave de funcionamiento de un amplificador Lock-in . . . . .   | 22            |
| III.4 Transformación de la señal al ser procesada mediante el Lock-in. . . . .   | 22            |
| III.5 Formas de onda en un detector sensible a fase, para diferentes condiciones de fase: a) $\phi = 180^\circ$ , b) $\phi = 90^\circ$ y c) fase arbitraria. . . . .   | 23            |
| III.6 Diagrama que muestra el producto de la señal de entrada con la señal de referencia, una copia es desplazada a $90^\circ$ , para la obtención de las salidas X e Y, y finalmente convertidas a coordenadas polares. . . . . | 24            |
| III.7 Diagrama de un multiplicador ideal, con señales síncronas a la entrada. . . . .  | 25            |
| III.8 Diagrama de un multiplicador ideal, con señales asíncronas a la entrada. . . . .   | 26            |
| IV.1 Diagrama general del montaje del sistema. . . . .   | 28            |

|  |    |
|--|----|
| IV.2 Pines de salida del OSLRF-01. . . . .   | 28 |
| IV.3 Cable de conexión que muestra las salidas principales para su correcta conexión. . . . .  | 29 |
| IV.4 Diagrama general de conexión del sistema, para la extracción de datos. . . . .  | 32 |
| IV.5 Dirección del flujo de datos a través del Lock-in hacia el elemento receptor, a través del protocolo de comunicación RS-232 . . . . .                               | 33 |
| IV.6 Configuración de las terminales del interruptor 2, para establecer que el Lock-in trabaje bajo el protocolo RS-232 . . . . .  | 34 |
| IV.7 Interfaz de configuración principal para establecer la comunicación entre el software de la computadora receptora. . . . .  | 35 |
| IV.8 Interfaz de captura de datos en tiempo real, donde también existen controles para manipular al Lock-in de forma remota. . . . .                                     | 36 |
| IV.9 Ventana de configuración de almacenamiento de los datos, según requiera el experimentador. . . . .  | 37 |
| IV.10 Imagen que muestra a través del sensor de tarjeta infraroja, la posición del haz láser. . . . .  | 38 |
| IV.11 Gráfica que muestra como varían los valores de los coeficientes de un sólido en comparación con la longitud de alejamiento. . . . .                                | 39 |
| IV.12 Gráfica que muestra como varían los valores de las razones de los coeficientes de un sólido en comparación con la longitud de alejamiento. . . . .                 | 40 |
| IV.13 Gráfico que muestra la configuración de los elementos para el correcto envío y recepción de la señal para el llenado de la neblina. . . . .                        | 42 |
| IV.14 Gráfica que muestra la similitud que existe en las señales, cuando las mediciones se toman en distintas direcciones. . . . .                                       | 43 |
| IV.15 Gráfica que muestra la evolución temporal de los primeros coeficientes mientras el pulso es retrodispersado a través de la neblina. . . . .                        | 44 |
| IV.16 Fotografía del experimento en ejecución, cuando el tubo está saturado de neblina. . . . .  | 44 |
| IV.17 Gráfica que muestra los coeficientes de neblina, con respecto a la variación de la longitud de la cámara de neblina. . . . .                                       | 46 |
| IV.18 Gráfica que muestra el comportamiento de las razones de los dos primeros coeficientes de neblina, con respecto a la variación de la longitud de la cámara. . . . . | 46 |
| IV.19 Ejecución del experimento de la neblina . . . . .  | 47 |
| IV.20 Fotografía que muestra la forma de las señales, la señal LIDAR se muestra en amarillo y la de retorno en azul, después de ser reflejada por la niebla. . . . .     | 47 |

|  |    |
|--|----|
| IV.21 Gráfica que muestra el comportamiento de los coeficientes de acuerdo a la variación de la longitud de la cámara de humo. . . . .   | 49 |
| IV.22 Gráfica que muestra el comportamiento de las razones de los dos primeros coeficientes de incienso, con respecto a la variación de la longitud de la cámara. . . . .        | 50 |
| IV.23 Quema de incienso, dirigido hacia la cámara. . . . .   | 51 |
| IV.24 Fotografía que muestra la forma de las señales, la señal LIDAR se muestra en amarillo y la de retorno en azul, después de ser reflejada por el incienso. . . . .           | 51 |
|  |    |
| V.1 Señal original (amarillo) y señal retrodispersada (azul), vista desde el osciloscopio. . . . .   | 54 |
| V.2 Extracción de la señal original, graficada desde Origin Lab. . . . .   | 54 |
| V.3 Representación de la función Gaussiana en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia[10]. . . . .  | 55 |
| V.4 Extracción y procesamiento de la señal en Origin Lab . . . . .   | 56 |
| V.5 Visualización de las razones con respecto a la longitud de la cámara de niebla, nótese que los valores oscilan alrededor de 1.49, con independencia de la longitud. . . . .  | 61 |
| V.6 Visualización de las razones con respecto a la longitud de la cámara de incienso, nótese que los valores oscilan alrededor de 1.6, con independencia de la longitud. . . . . | 62 |
| V.7 Visualización de las razones experimentales y teóricas de la neblina. . . . .  | 63 |
| V.8 Visualización de las razones del incienso experimentales y teóricas. . . . .   | 65 |
|  |    |
| A.1 Identificación del producto y etiquetas de seguridad. . . . .  | 74 |
| A.2 Diagrama a bloques del OSRF-01. . . . .  | 75 |
| A.3 Dibujo de las dimensiones con unidades en milímetros. . . . .  | 76 |
|  |    |
| B.1 Diagrama a bloques del Amplificador Lock-in SR-530 [13]. . . . .   | 77 |
|  |    |
| C.1 Se muestra el diagrama de conversión RS-232 a USB. . . . .   | 82 |
| C.2 Pines de salida enumeradas del conector DB9. . . . .   | 82 |
|  |    |
| D.1 Pantalla principal del software desarrollado para adquisición de datos. . . . .  | 86 |
| D.2 Ventana de inicialización de Matlab. . . . .   | 87 |
| D.3 Plataforma inicial de Matlab. . . . .  | 87 |
| D.4 Selecciona lidar.m . . . . .   | 88 |
| D.5 Inicia la ejecución del programa. . . . .  | 88 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| D.6  | Sistema de adquisición y control. . . . .  | 89 |
| D.7  | Iniciando la comunicación entre la computadora y el SR530. . . . .   | 89 |
| D.8  | Parámetros de configuración para establecer la comunicación entre el software<br>y el hardware. . . . .                          | 90 |
| D.9  | Ventana principal del sistema de adquisición, donde se muestran habilitados<br>los comandos de control. . . . .                  | 90 |
| D.10 | Monitoreo de los coeficientes . . . . .  | 91 |
| D.11 | Ventana de almacenamiento de la información. . . . .   | 92 |
| D.12 | En esta ventana se muestran tres diferentes tipos de extensiones(.xls, .m y<br>.mat)para el archivo almacenado "prueba". . . . . | 92 |



## INTRODUCCIÓN

Los sistemas LIDAR son instrumentos de sensado remoto óptico con capacidades únicas para la obtención de características atmosféricas. Se pueden perfilar una gran variedad de variables tales como densidad de sustancias, velocidad del viento, temperatura atmosférica, etc., usando diferentes tipos de LIDAR.

Ésta tecnología, permite determinar la distancia desde un emisor láser centelleante a un objeto o superficie, la distancia a este objeto se determina mediante la medición del tiempo de retraso entre la emisión del centelleo y la detección de su reflejo. Gracias a las tecnologías de detección de gases mediante ondas electromagnéticas (ya sea mediante radar o LIDAR) es posible detectar gases a concentraciones bajas a distancia.

Una aplicación muy importante y la que nos interesa estudiar, es la posibilidad de detectar y medir la presencia de elementos contaminantes presentes en la atmósfera terrestre [1]. La aplicación mencionada anteriormente para este sistema, se ha desarrollado en diversos países, principalmente en Estados Unidos, España, Holanda, Alemania, Canadá, Colombia, Argentina, Cuba y Brasil.

En nuestro país en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) se reportó el primer LIDAR [9], y desde el año 2008 se ha estado desarrollando el primer sistema LIDAR en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla [9].

### 1.1 Estado del arte

Los últimos avances en sistemas LIDAR especializados han hecho posible diversas investigaciones que han demostrado infinidad de aplicaciones, diversos dispositivos y

métodos de medición. Actualmente, existe una amplia gama de aplicaciones tales como la tecnología de teledetección basada en dispositivos láser, que se han levantado como una tecnología de alta fiabilidad en nuestros días con el objetivo de realizar sensado remoto de la atmósfera para la detección de diversos parámetros, tales como la humedad, presión, velocidad del viento y la concentración de algunos aerosoles.

Aplicación novedosa y de gran interés para el desarrollo de éste proyecto, es sin duda la medición de los coeficientes de retrodispersión atmosférica. Experimentos efectuados por el Instituto de Física Atmosférica demostraron que es posible obtener información sobre las variaciones del tiempo y espacio de algunos aerosoles con ayuda de un Sistema Digital Interactivo de Análisis de Imágenes de Baviera a través de trayectorias de vuelo [1].

Gracias a éste tipo de sistemas también se han logrado obtener patrones de distribución de polvo, sulfato y partículas de aerosoles de gran tamaño con el Sistema de Pronóstico Meteorológico Químico.

Durante la última década, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) en México, integró desde hace 4 años subsistemas tales como: el GPS, Unidad de Medición Inercial y sensores láser para la recolección de datos con ayuda de plataformas aéreas para la generación de modelos digitales de elevaciones de terreno. Este tipo de información obtenida ayudan a la generación de mapas, prevención de desastres, zonas propensas a inundaciones, estudios hidráulicos y demás, siendo las anteriormente mencionadas casos de estudios de mucha importancia para la seguridad de la población. La cantidad de publicaciones referentes a la obtención de características atmosféricas en éstos últimos años ha sido impresionantes, justificando así la importancia del estudio de los sistemas LIDAR para el análisis y perfilado de la atmósfera.

La tecnología de teledetección basada en dispositivos láser se ha levantado como una tecnología de alta fiabilidad en la actualidad para el sensado remoto en la atmósfera y sus parámetros, tales como la humedad, presión y la concentración de algunos aerosoles.

### **1.1.1 Justificación**

La contaminación atmosférica es un problema delicado de importancia a nivel mundial, especialmente en México D.F. y sus principales metrópolis. Actualmente, factores tales como la sobre-población, industrias, medios de transporte, quema de combustibles fósiles la han incrementado de manera alarmante, provocando una gran concentración de gases efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y clorofluorocarbonos) en

la atmósfera, a tal grado que se han creado planes de contingencia ambiental, a través de la Secretaría del Medio Ambiente SEDEMA que establece medidas para limitar la circulación de los vehículos automotores en los municipios conurbados del Estado de México de la Zona Metropolitana del Valle de México (hoy no circula) para controlar y reducir la contaminación atmosférica y contingencias ambientales. Debido a esto se ha tenido la necesidad de un constante monitoreo de la calidad del aire de diferentes ciudades. Con el desarrollo de este proyecto se avanzará hacia la culminación de un sistema con aplicaciones de monitoreo ambiental muy sensible en la BUAP.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Medir los dos primeros coeficientes de Fourier de la señal retodispersada LIDAR proveniente de una cámara de neblina, usando un amplificador Lock-in.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar un sistema LIDAR de laboratorio coaxial biestático
- Construir una cámara de niebla de longitud variable
- Mejorar el sistema de detección tradicional de los sistemas LIDAR
- Desarrollar un programa de computadora que permita comunicar el Lock-in con una computadora y que la computadora presente la razón de los coeficientes de Fourier de la señal retro-dispersada.
- Caracterizar la razón de los dos coeficientes de Fourier para neblina, un objeto sólido y humo, comparar la razón experimental con lo esperado teóricamente.
- Obtener una relación entre la razón de los coeficientes de Fourier y la longitud del gas donde se propagará.
- Escritura y defensa de la tesis.

## 1.3 Alcances y limitaciones

### ALCANCES

- 1.- El presente proyecto estudiará la teoría de detección sensible a fase y su incorporación al sistema LIDAR.
- 2.- La investigación abarca el tratamiento de algunos gases como neblina e incienso para la comprobación y estudio del sistema LIDAR.
- 3.- Se modificará un parámetro a nivel laboratorio, a saber, la longitud de la nube dispersora.

### LIMITACIONES

- 1.- El presente proyecto describe algunas limitaciones tales como la captura de datos para el caso del incienso, ya que la difusión del gas no se puede controlar de manera uniforme.

## 1.4 Organización del trabajo

Este trabajo está estructurado en 6 capítulos: Introducción, Sistema lidar, Técnica de detección sensible a fase, Implementación del sistema LIDAR, Análisis y resultados, conclusiones y trabajos a futuro, anexos que proveen información técnica sobre los instrumentos utilizados, y la bibliografía.

Capítulo 1. Hace una introducción que describe el contexto del trabajo seguido por la justificación, objetivos del mismo y finaliza con la organización del trabajo.

Capítulo 2. En este capítulo se presenta la teoría de LIDAR, se expone la definición de la ecuación del sistema LIDAR monoestático, además se hace un breve repaso de los conceptos necesarios para entender el funcionamiento del sistema, así como los parámetros más importantes que se involucran. También se incluye algunos conceptos generales sobre la propagación de la luz en medios turbios, su comportamiento y por ende la retrodispersión de la luz cuyo tema es relevante para el funcionamiento de nuestro sistema.

Capítulo 3. En este capítulo se aborda la teoría acerca de la técnica de Detección Sensible a Fase, el principio de funcionamiento y algunos parámetros de configuración básicos para su funcionamiento tales como: la señal de referencia, la magnitud y fase de la señal retrodispersada, así como algunas de las especificaciones generales para la implementación de esta técnica como un elemento clave del sistema de detección LIDAR.

Capítulo 4. En éste capítulo se presenta la implementación del sistema LIDAR de laboratorio, el acondicionamiento de la señal y la configuración de los protocolos de comunicación para la adquisición y captura de datos, así como la descripción de las mediciones y su posterior procesamiento para la interpretación teórica realizando los cálculos matemáticos necesarios para la obtención de los primeros coeficientes de Fourier.

Capítulo 5. En ésta parte del proyecto se hace un análisis de los resultados de los datos procesados haciendo una confrontación teórica-práctica comprobando así el funcionamiento del sistema LIDAR implementado en este proyecto.

Capítulo 6. En el capítulo final de la tesis se escriben las conclusiones que se obtienen con la realización de esta tesis.





## SISTEMA LIDAR

### 2.1 Introducción

LIDAR (del acrónimo en inglés *Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*), cuya traducción al español sería: "Detección, Clasificación y/o Medición a través de Luz"; es una técnica de teledetección a base de luz, que utiliza tecnología óptica con detección remota para medir las propiedades de la dispersión y propagación de la luz a través de distintos medios o superficies con el objetivo de estudiar algunas propiedades, como distancia, velocidad, densidad, etc. Los sistemas LIDAR utilizan un principio de funcionamiento similar a los sistemas de Radar (Radio Detection and Ranging), con la diferencia de hacer uso de pulsos de luz en lugar de ondas de radiofrecuencia, utilizando típicamente longitudes de onda muy pequeñas que oscilan entre el rango del ultravioleta hasta el infrarrojo cercano y que dependen directamente con la clase de medida que se requiera realizar. Los sistemas LIDAR que se utilizan más frecuentemente son aquellos sistemas que sirven para detectar la distancias de un objeto o superficie que se determina midiendo el retardo de la transmisión del pulso desde un emisor de luz centellante (láser) y la detección de la luz reflejada a través de un detector por el elemento a medir, véase la figura II.1, donde se muestra un LIDAR con éstas características.

Debido a la alta precisión y capacidad del emisor para emitir los pulsos de luz, las mediciones con el uso de las técnicas lidar requieren un equipo adecuado de

componentes de alta fiabilidad para la detección y adquisición de los datos de la señal.

LIDAR provee grandes ventajas frente a otros procesos de captura de teledetección tales como la alta resolución espacial y temporal de las mediciones en condiciones ambientales para la medición de fenómenos meteorológicos, el estudio del agotamiento del ozono, y demás efectos climáticos por diversos contaminantes.



Figura II.1: Prototipo LIDAR, modelo OSLRF-01, disponible en el laboratorio de optoelectrónica de la Facultad de Ciencias de la Electrónica.

## 2.2 Antecedentes históricos

La introducción de los sistemas LIDAR se remontan a tiempos previos de la invención del laser.

- En 1904 se reportó la primera forma de RADAR (Radio Detection and Ranging) por Cristiano Huelsmeyer "La Telemobiloscope" [2](pág. 12).
- En 1930 se realizaron los primeras pruebas para medir la densidad del aire en la atmósfera mediante la dispersión de haces de luz [3], (pp. 22-23).
- En 1938 se utilizaron por primera vez emisiones de pulsos de luz para medir la altura de las nubes [3], (pp. 22-23)..
- En 1953 fue introducido por primera vez el acrónimo LIDAR por Middleton y Spilhaus [3], (pp. 22-23).
- En 1960 Townes y Arthur Leonard Schawlow inventores del láser, patentaron su invención [4].

- Entre los años 1962 a 1963 fueron reportados los primeros resultados significativos sobre la teledetección [5].
- En 1963 Fiocco y Smullin publicaron observaciones atmosféricas utilizando un láser de rubí [3].
- En la década de los 70 la NASA trabaja con prototipos aerotransportados para la detección de parámetros de la atmósfera y bosques [2].
- En 1976 se publica por primera vez un libro sobre los sistemas LIDAR bajo la edición de E.D.Hinckey [3].
- En la década de los 80 la universidad de Stuttgart demostró la alta confiabilidad en cuanto a la precisión de los láseres [2].
- A principios de los años 1990 se introdujo el primer láser de escaneo, que incluían buscadores de rango para la obtención de franjas [4].
- En México en el año 2008 se inició con el desarrollo del primer sistema LIDAR integrando un sistema de detección sensible a fase bajo la dirección del Dr. Edmundo Reynoso Lara perteneciente al Cuerpo Académico de Optoelectrónica BUAP CA-23 [9].

Desde entonces, el campo de investigación se ha expandido rápidamente. En los últimos treinta años, la tecnología LIDAR ha evolucionado considerablemente gracias a los avances en informática, física de láseres , óptica y electrónica.

### **2.3 Principio de funcionamiento**

La configuración de un sistema LIDAR está conformado básicamente por un emisor y un receptor; el proceso es iniciado en la parte del emisor, la radiación coherente de alta intensidad en forma de pulsos cortos de luz, emitida por un láser con una potencia y longitud de onda específicos es dirigida hacia un primer componente divisor de haz 1, donde la señal es dividida en dos partes, la primera es enviada hacia un segundo componente divisor de haz 2 del receptor, la cual será utilizada como señal de referencia; y la otra parte de la señal es enviada a la atmósfera, ya en ésta zona la señal es dispersada en todos los sentidos debido a las propiedades físicas del medio y una parte de la señal es regresada (señal retrodispersada) y captada por el receptor donde la señal óptica es nuevamente dirigida hacia el divisor 2 del detector que une la señal recibida con la señal de referencia del transmisor, toda aquella señal que no esté a la misma frecuencia que la de la señal

de referencia es deshechada, tomando en cuenta solo aquella señal que nos interesa para finalmente enviarla al detector óptico y así poder convertirla en una señal eléctrica para su posterior captura y procesamiento, veáse Figura II.2.

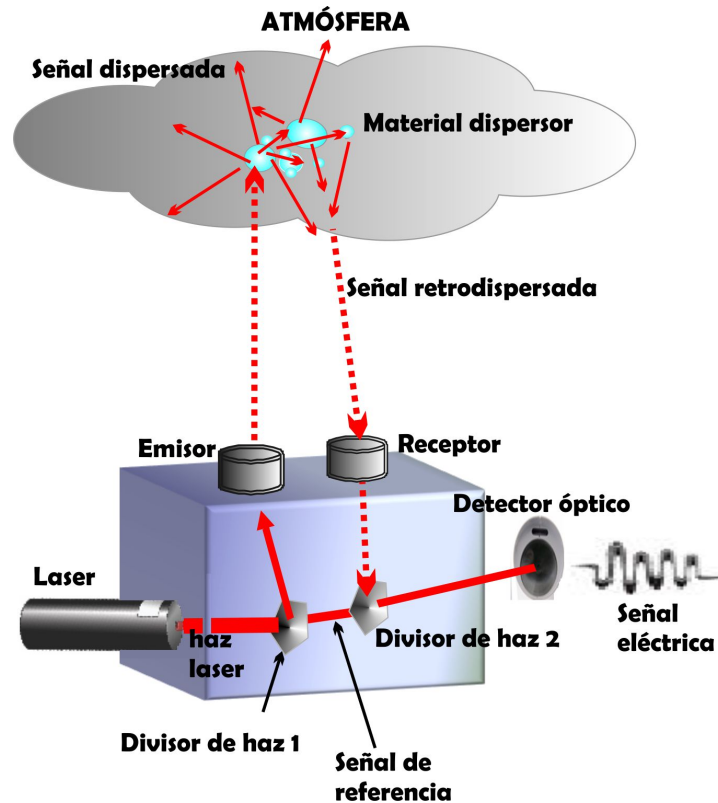


Figura II.2: Diagrama que muestra el funcionamiento del LIDAR.

### 2.3.1 El Emisor

El principal componente del emisor en un sistema LIDAR es el transmisor óptico; existen dos tipos de transmisores, los diodos LED y los diodos láser, la ventaja de los diodos láser es que éstos proveen luz coherente con magnitud y fase fija, aunque ambos se utilizan como un diodo PN, polarizados directamente; el diodo láser esta determinado por la emisión de luz estimulada.

A continuación se muestra la Tabla II.1, donde se puede apreciar algunas de las diferencias más notables entre los diodos LED y Laser.

| Parámetro              | LED         | LASER      |
|------------------------|-------------|------------|
| 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             | Mhz         | Ghz        |

Tabla II.1: Tabla resumen de comparación entre Diodos LED y láser [8].

El principio de emisión estimulada se da cuando un fotón obliga a un electrón en estado excitado a pasar a su estado de reposo, proceso que produce otro fotón con propiedades similares a las del fotón original, es decir con la misma fase, longitud de onda, frecuencia y dirección.

Para que pueda existir una mayor población de fotones producidos en comparación con los fotones invertidos, debe de existir un medio activo, un sistema de bombeo y una cavidad resonante.

El medio activo está conformado por una carga de átomos (en estado, sólido, líquido o gas) conformado por electrones a estimular al rededor de su núcleo. El sistema de bombeo está encargado de generar la energía para que los electrones se mantengan en un estado de excitación; la última parte está compuesta por paredes reflejantes que logra producir un gran flujo de fotones dirigidos en la misma dirección, manteniendo una amplia población, tal y como se muestra en la Figura II.3.

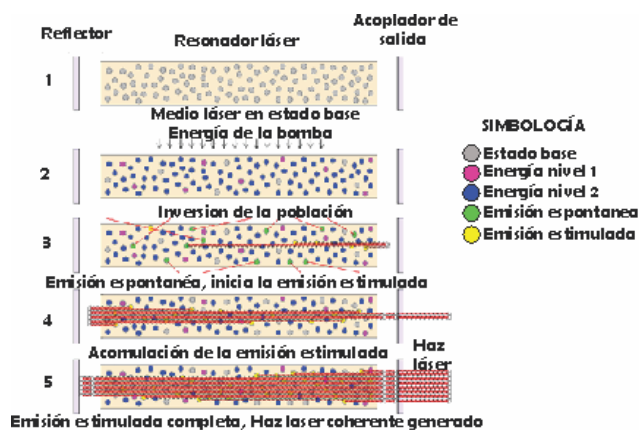


Figura II.3: Figura que muestra el principio de operación de un láser.

### 2.3.2 El receptor

Éste elemento es el encargado de recolectar la señal retrodispersada proveniente de la zona atmosférica, para dirigirlo hacia el detector óptico.

El detector es el elemento más importante del receptor, en un sistema LIDAR; prácticamente un fotodiodo utiliza un efecto fotoeléctrico para convertir la luz recibida en una señal eléctrica, veáse la Figura II.4. Los fotodiodos en su definición más básica, son uniones PN diseñados especialmente para la detección de luz, su funcionamiento es muy sencillo, un fotón crea un par hueco-electrón en la unión PN, y la corriente eléctrica es capaz de fluir si ambas uniones son conectadas (Figura II.5) por ende son posibles dos formas de funcionamiento:

Operación Fotoconducativa y Fotovoltaica, siendo ésta última la utilizada dentro del receptor para un sistema LIDAR.

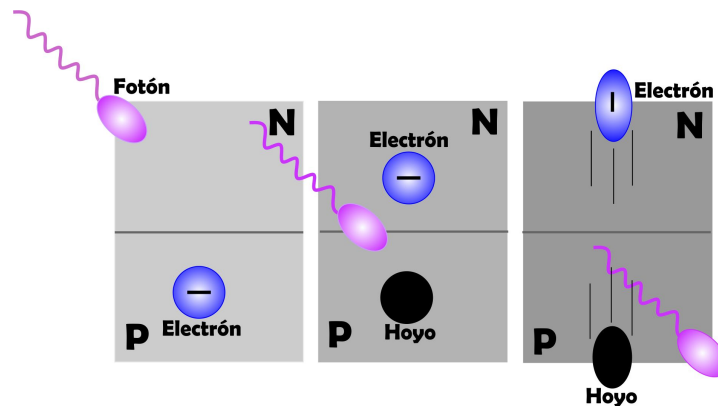


Figura II.4: Figura que muestra el funcionamiento de un fotodiodo en su configuración fotovoltaica.

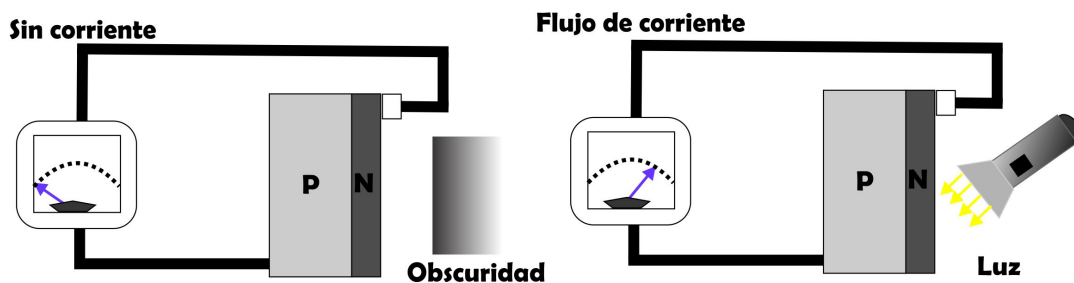


Figura II.5: Fotodiodo convierte la energía óptica en corriente eléctrica.

De ésta manera, la etapa de recepción del sistema logra captar la señal de interés, para así poder procesarla posteriormente, es decir, en esta parte la señal tiene

características propias tales como: frecuencia, longitud de onda y una magnitud medible de voltaje específicos.

## 2.4 Técnicas LIDAR

La clasificación de los sistemas LIDAR es muy extensa, enlistando desde los tipos de láseres incluidos en el sistema, la forma de escaneado, por el tipo de adquisición y por la técnica de detección utilizada, donde se hablará de éste último más detalladamente en esta sección debido a que son técnicas utilizadas para la teledetección atmosférica

- Retrodispersión elástica
- Absorción diferencial
- Ramman
- Fluorescencia
- Doppler

El sistema LIDAR de retrodispersión elástica es uno de los más usuales, su principio de funcionamiento se basa en la emisión de un haz de luz en una longitud de onda específica y un detector es encargado de recibir la señal elásticamente retrodispersada, es decir con la misma longitud proveniente de la atmósfera.

La técnica de Absorción diferencial también llamada DIAL por su acrónimo en inglés (*Differential Absorption Lidar*) es una de las técnicas con alta sensibilidad, esto gracias a la utilización de dos longitudes de onda, donde una es absorbida más que la otra que ayuda a obtener un coeficiente diferencial molecular; DIAL es una de las técnicas con gran interés en la observación de las partículas de vapor de agua.

Ramman es otra técnica que utilizan los LIDAR, esta técnica funciona bajo el principio de la teoría de dispersión Ramman, es decir un proceso en el que existe un proceso inelástico de dispersión que implica el cambio de energía de la molécula.

LIDAR de Fluorescencia o también conocido como LIDAR de resonancia hace uso de un láser sintonizado dirigido hacia el objeto o superficie a estudiar y posteriormente se observa el índice de fluorescencia radiada por la molécula mientras

regresa a su estado base.

Los sistemas Doppler son un tipo de LIDAR capaces de medir la velocidad de objetos en movimiento, observar el movimiento de aerosoles, partículas de polvo y otras partículas en el aire; lo anteriormente mencionado funciona gracias a la recepción de la luz retrodispersada por las partículas de aerosoles, en otras palabras el sistema Doppler transmite pulsos de luz repetidamente mientras escanea la luz retrodispersada de los aerosoles, el rango y la dirección de las partículas se pueden medir simultáneamente, veáse la figura II.6.

Posteriormente a ello se pueden analizar las propiedades atmosféricas. Las señales de los objetos analizados tienen un desplazamiento proporcional a su velocidad; por ende ésto también permite conocer la velocidad y dirección que sigue el viento.

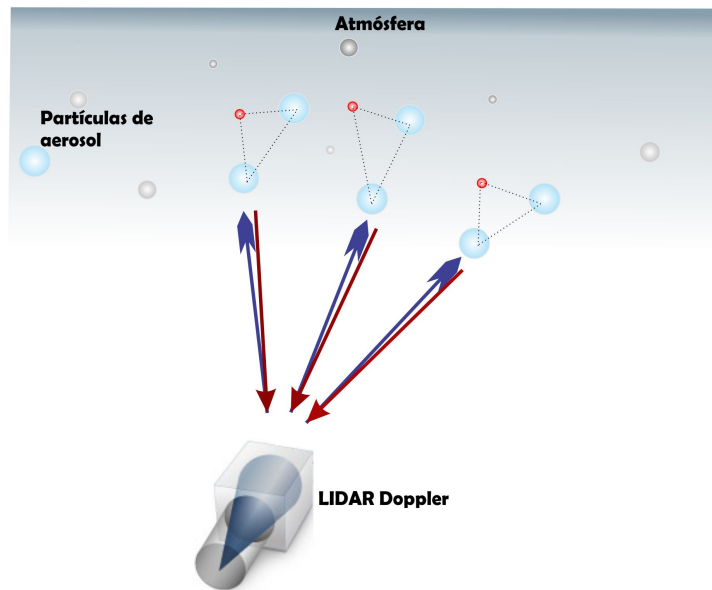


Figura II.6: Tres puntos de medición son combinados para formar un vector con la finalidad de determinar la dirección y velocidad del viento.

## 2.5 Ecuación del Lidar Monoestático

En un sistema LIDAR monoestático, es decir donde tanto el emisor como el receptor están ubicados en un mismo lugar, la ecuación que describe el rendimiento del sistema en su forma más simple, puede verse matemáticamente como a continuación se describe:

$$(2.1) \quad P_R = KG(R)\beta(R)T(R)$$

Donde  $P_R$  es la Potencia recibida del sistema a una cierta distancia  $R$ ;  $K$  define el rendimiento del LIDAR que puede expresarse como el producto de la potencia inicial  $P_0$  por la longitud del volumen desde que se disperso la luz que se recibe en un instante de tiempo, denominado longitud del pulso efectivo espacial.  $\frac{c\tau}{2}$  por la eficiencia del sistema de forma mas detallada, como sigue:

$$(2.2) \quad K = P_0 \frac{c\tau}{2} A\eta$$

El segundo elemento  $G(R)$  describe la medición del rango geométrico y puede entenderse como el cociente de la superposición del campo de visión del receptor sobre la disminución cuadrática de la señal.

$$(2.3) \quad G(R) = \frac{O(R)}{R^2}$$

Los parámetros anteriormente mencionados están sujetos a la configuración del LIDAR; por ende pueden ser manipulados por el experimentador.

El tercer elemento  $\beta(R)$  es el coeficiente de retrodispersión especificado a una distancia  $R$ ; cualitativamente puede entenderse como la sumatoria de todos los dispersores que se encuentran durante toda la trayectoria de la atmósfera hasta el detector; es decir provee información sobre la señal dispersada que viene de regreso desde la zona atmosférica.

$$(2.4) \quad \beta = \sum_j = N_j(R) \frac{d\sigma_{j,sca}}{d\omega}(\pi, \lambda)$$

El elemento  $T_R$  es el término de transmisión, representa el índice de pérdida de la luz desde el emisor hasta una distancia  $R$  y de regreso; es una forma específica de la ley de Lambert Beer-Bouger para el sistema LIDAR; donde la integral considera la ruta desde el emisor hasta un punto fijo con una distancia  $R$  y el factor que es representado por la constante 2, representa la ruta de transmisión bidireccional del recorrido del haz.

$$(2.5) \quad T(R) = \exp[-2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr]$$

Entonces la ecuación anterior puede resumirse como la suma de todas las pérdidas de transmisión, la cual se denomina extinción de la luz y  $\alpha(r, \lambda)$  es el coeficiente de extinción. Los anteriormente mencionados son términos desconocidos y por tanto no controlados por el investigador.

Una vez explicados y desarrollados los elementos por separado, ahora es posible ver a la ecuación del sistema LIDAR, de forma más completa como a continuación se muestra:

$$(2.6) \quad P(R, \lambda) = P_0 \frac{c\tau}{2} A\eta \frac{O(R)}{R^2} \beta(R, \lambda) \exp\left[-2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr\right]$$

Donde puede entenderse más claramente de forma gráfica, con el siguiente diagrama, en el que se muestra todos y cada uno de los parámetros anteriormente descritos, véase la figura II.7.

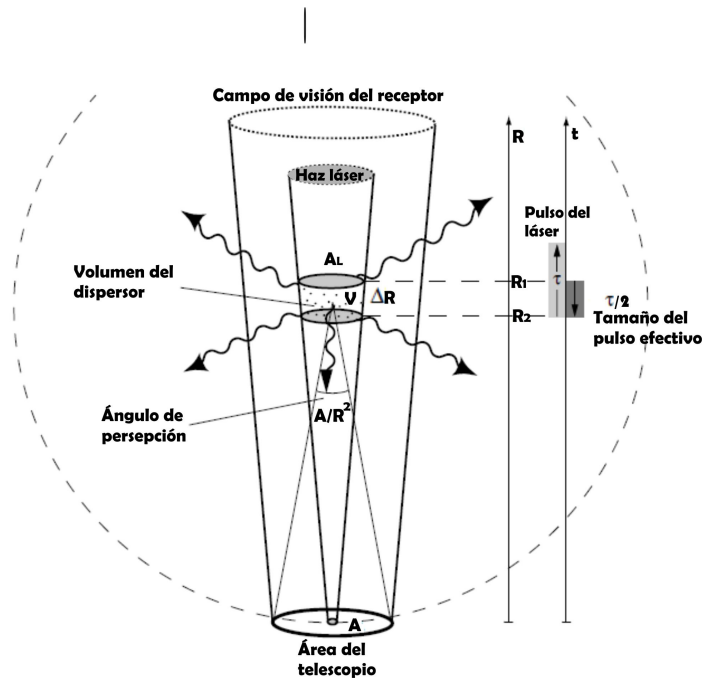


Figura II.7: Geometría de un LIDAR convencional[3].

La figura II.7 muestra de forma gráfica el funcionamiento de un LIDAR convencional, para poder explicar de forma visual la ecuación 2.6, donde claramente puede observarse que la potencia del sistema esta en función de la señal retrodispersada y el recorrido del haz hasta la fuente dispersora que se encuentra a una distancia  $R$ . Analizando la ecuación se puede deducir que la medición del rango geométrico en función de la potencia es inversamente proporcional a la distancia cuadrática;

en otras palabras la potencia recolectada a través del receptor es muy pequeña, además, está propensa a pérdidas de fotones debido a la interferencia durante su recorrido, adicionalmente la contaminación de señales indeseadas (ruido) afectan la señal hasta su regreso, pudiendo distorsionarla información, entonces podemos concluir que la señal a tratar es en efecto muy pequeña. Debido a lo anteriormente descrito sobre las características del LIDAR, es muy probable de la señal recolectada, necesite de técnicas de medición adecuadas para su correcto manejo e interpretación.





## TÉCNICA DE DETECCIÓN SENSIBLE A FASE

La Detección Sensible a Fase es una de las técnicas más prometedoras que provee grandes ventajas a la hora de medir señales muy pequeñas, incluso opacadas por el ruido; ésto es posible gracias a la señal de referencia que utilizan los amplificadores Lock-in, aparato electrónico que es capaz de extraer una señal con una onda portadora conocida de un entorno extremadamente ruidoso. Dependiendo de la reserva dinámica del instrumento, las señales hasta 1 millón de veces más pequeñas que los componentes de ruido, potencialmente bastante cerca en frecuencia, aún pueden detectarse de manera confiable.

### 3.1 Lock-in y principio de funcionamiento.

El amplificador Lock-in se puede entender como un voltímetro especializado de AC. Su principio de operación se basa en la teoría del procesamiento de señales y su función primordial es la de extraer señales débiles inmersas en un ambiente ruidoso.

Los amplificadores Lock-in están caracterizados por tener un ancho rango dinámico que proveen la capacidad de detectar señales con altos niveles de ruido o interferencia [7]. Esto es posible gracias a que utilizan una señal de referencia y una técnica conocida como detección sensible a la fase. Las señales de ruido y las de otras frecuencias que no sean la de referencia se rechazan y no afectan la medida, permitiendo así que el instrumento tenga una enorme sensibilidad, ejemplo de ello es el modelo SR530, veáse figura III.1.

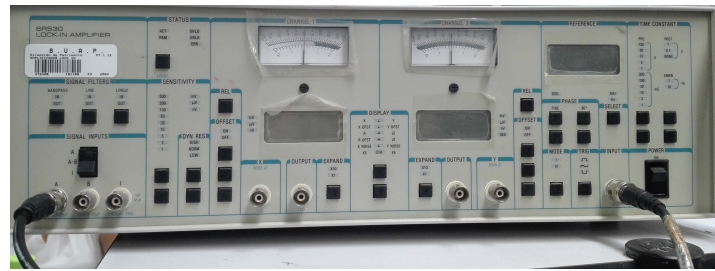


Figura III.1: En la figura se muestra un amplificador Lock-in, modelo SR530 Stanford Research Systems.

El principio de funcionamiento del amplificador argumenta su teoría en base a el teorema de Fourier, que plantea básicamente que cualquier señal periódica puede ser representada como una sumatoria de componentes armónicos sinusoidales a diferentes frecuencias, fases y amplitudes como una representación en el dominio de la frecuencia; sin embargo las señales captadas a través de un osciloscopio muestra la representación en el dominio del tiempo, por ende ésta forma de captura, provee información muy escasa acerca de las frecuencias que componen la señal. Un amplificador Lock-in amplifica la señal que recibe y posteriormente la multiplica por la señal de referencia, veáse Figura III.2.

El diagrama a bloques de un Lock-in consta de 5 etapas:

- 1) Amplificador de CA
- 2) Un oscilador controlado por voltaje
- 3) Un multiplicador llamado Detector Sensible a Fase (DSP)
- 4) Un filtro Pasa Bajas
- 5) Un amplificador de CC.

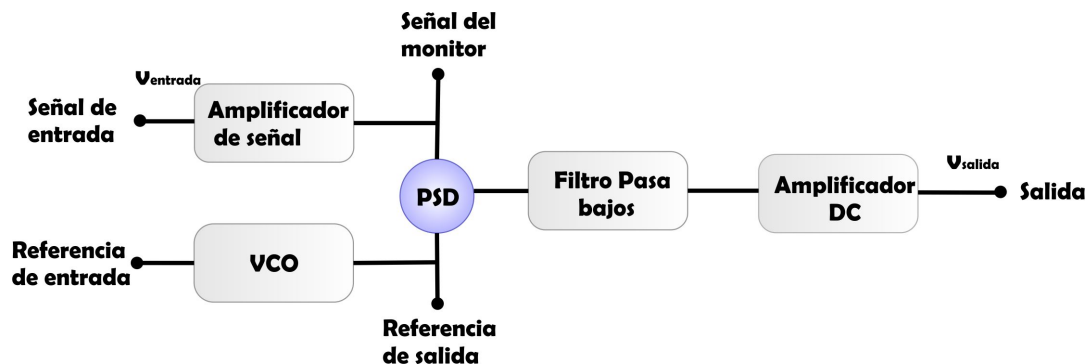


Figura III.2: Diagrama que muestra las fases que forman parte del Lock-in para mostrar de forma gráfica cual es el proceso que pasa una señal contaminada de ruido.

Una señal de corriente alterna regularmente caracterizada por ser muy pequeña, incluso en el orden de los nanovolts, con altos índices de ruido es recibida a través de una de las entradas del Lock-in, una vez dentro, ésta pasa por una etapa de amplificación.

A continuación la segunda etapa está conformada por un oscilador que tiene la capacidad de sincronizarse con la señal externa de referencia, en fase como en frecuencia.

Enseguida una de las partes más importantes del diagrama es el DPS por sus siglas en inglés *Detection Sensitive Phase*, circuito multiplicador especializado que necesita de dos voltages de entrada, es decir aquí es justo donde la señal de entrada es multiplicada por una señal sinusoidal pura, aunque podría tener otras formas a una frecuencia de referencia específica que puede ser generada internamente por el Lock-in o tomada desde una fuente externa. Esta etapa produce una salida que es producto de las dos señales.

El resultado de ésta multiplicación proporciona una señal de salida en CC, cuya frecuencia es igual que la señal de referencia. El filtro de tipo pasabajos RC que sigue al multiplicador DPS, provee el promedio que separa los productos de la referencia de los componentes de todas las demás frecuencias.

Finalmente la última etapa es un amplificador de corriente continua (CC) de baja frecuencia, que como su nombre lo indica, no está diseñado para funcionar por encima de frecuencias arriba de 10 KHz.

A todo éste método descrito anteriormente se le denomina demodulación o detección sensible a fase, que básicamente aísla la señal en la frecuencia determinada por la de referencia de interés de todos los demás componentes.

Un amplificador Lock-in mide la componente simple de la señal de Fourier (seno) a la frecuencia de referencia, porque multiplica la señal con una onda seno pura.

## 3.2 Detector sensible a fase

La clave del principio de operación del Detector Sensible a Fase es el interruptor de dos estados (Figura III.3), que se encarga de controlar electrónicamente desde un voltaje de referencia, y que tiene la posibilidad de cambiar entre dos posiciones, llamados punto A y punto B como referencia de cambio de polaridad.

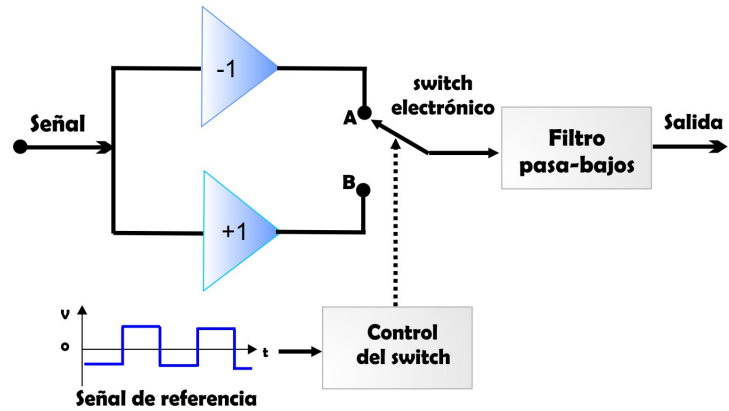


Figura III.3: Clásico modo de operación de un Detector Sensible a Fase, clave de funcionamiento de un amplificador Lock-in .

Esta conmutación provee un cambio sistemático de ganancia entre 1 positivo y 1 negativo, si consideramos el modo de operación típico de un detector sensible a fase, en donde se evalúa una forma de onda sinusoidal y una señal de referencia donde ambas se encuentran en la misma fase, la referencia cambia de polaridad de forma simétrica al ritmo de la señal, provocando una rectificación de onda completa de la señal en la salida del interruptor, que como se menciona anteriormente, ésta es llevada hacia un filtro pasa bajas, que rectifica o suaviza el componente primario obteniendo así un promedio de la señal, representado por un valor de voltaje en cd, cuya característica principal es que es proporcional a la amplitud de la señal, veáse la Figura III.4.

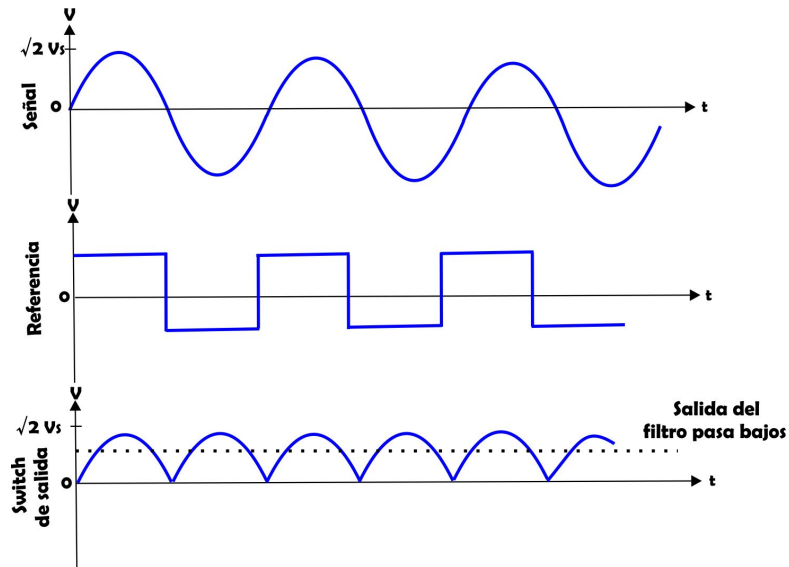


Figura III.4: Transformación de la señal al ser procesada mediante el Lock-in.

En la mayoría de los casos no siempre se espera un exacto acoplamiento en fase de las señales, tanto la señal de referencia como la señal a procesar a la entrada del detector, por lo tanto en la Figura III.5 se muestra el efecto de tres situaciones diferentes, en el primer caso tenemos una señal y su referencia con fase invertida, que tiene como resultado un valor en dc negativo; el segundo caso muestra un desplazamiento de  $90^\circ$  en fase, con un promedio en DC igual a 0 en la salida; y finalmente el tercer caso muestra una señal con algún valor intermedio, en la que se obtiene valores de  $\phi = 0$  y  $180^\circ$ .

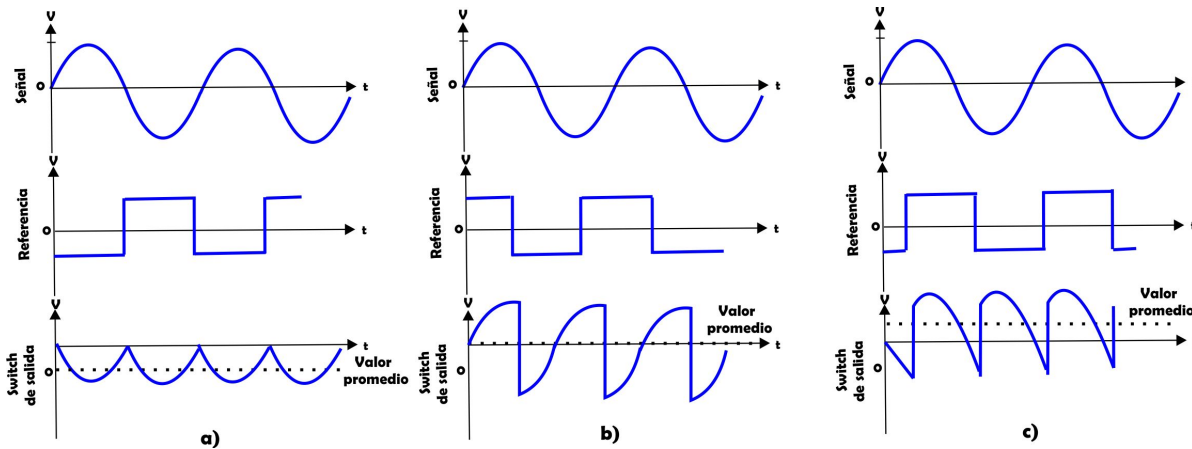


Figura III.5: Formas de onda en un detector sensible a fase, para diferentes condiciones de fase: a)  $\phi = 180^\circ$ , b)  $\phi = 90^\circ$  y c) fase arbitraria.

### 3.3 Demodulación de Fase Dual

El demodulador de fase doble es un circuito que permite determinar la amplitud  $R$  y la fase  $\phi$  a la salida del Lock-in como respuesta de la señal de entrada  $V_s(t)$ , así como la señal de referencia  $V_R(t)$ , obtenido del multiplicador, es decir la señal a procesar se divide, la primera parte se multiplica por separado con la señal de referencia, y la segunda parte es desplazada en fase a  $90^\circ$ ; las salidas pasan a través de una etapa de filtrado configurado a bajas frecuencias, dando como resultado dos salidas denominadas X e Y, también llamadas componentes en fase y cuadratura, veáse la Figura III.6.

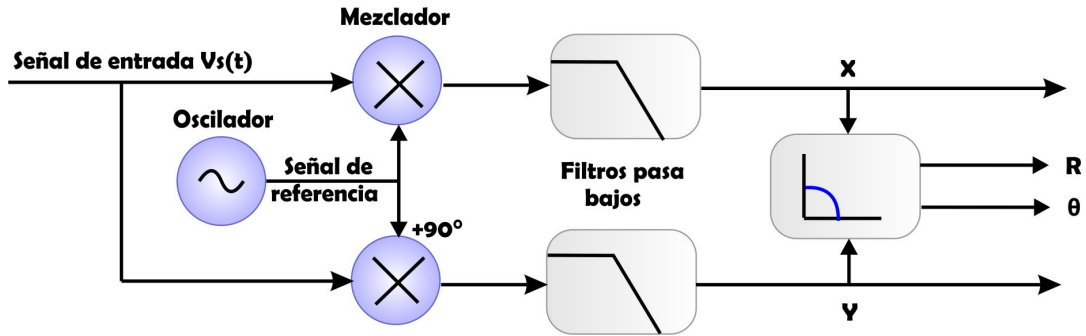


Figura III.6: Diagrama que muestra el producto de la señal de entrada con la señal de referencia, una copia es desplazada a  $90^\circ$ , para la obtención de las salidas X e Y, y finalmente convertidas a coordenadas polares.

Tanto la amplitud y fase se pueden obtener fácilmente de las salidas X e Y, haciendo una conversión de coordenadas cartesianas a polares, utilizando las fórmulas siguientes.

$$(3.1) \quad R = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$(3.2) \quad \theta = \arctan(Y/X)$$

### 3.4 Serie de Fourier y la señal de referencia

Para determinar que relación existe entre la señal a procesar y la señal de referencia, se puede determinar a la operación de conmutación de forma equivalente al producto de la señal con una señal de onda cuadrada con valores de entre 1 positivo y 1 negativo; por ende se puede entender como un multiplicador ideal, donde la forma de onda de referencia puede verse como la representación de la serie de Fourier.

$$(3.3) \quad r(t) = \frac{4}{\pi} [\cos(\omega_R t + \phi_R) - \frac{1}{3} \cos 3(\omega_R t + \phi_R) + \frac{1}{5} \cos 5(\omega_R t + \phi_R) - \dots]$$

Gráficamente teniendo ambas señales asíncronas, la salida resultante del multiplexeo puede visualizarse como una señal con un valor promedio igual a 0, y matemáticamente este resultado puede obtenerse al realizar el siguiente producto.

$$(3.4) \quad v_p(t) = r(t)s(t)$$

Dónde

$$(3.5) \quad s(t) = \sqrt{2} V_s \cos(\omega_s t + \phi_s)$$

Realizando la multiplicación y factorizando la ecuación resultante quedaría como sigue

(3.6)

$$V_p(t) = \frac{2\sqrt{2}V_s}{\pi} [\cos(\omega_R t \pm \omega_s t + \phi_R \pm \phi_s) - \frac{1}{3} \cos(3\omega_R t \pm \omega_s t + 3\phi_R \pm \phi_s) + \frac{1}{5} \cos(5\omega_R t \pm \omega_s t + 5\phi_R \pm \phi_s) - \dots]$$

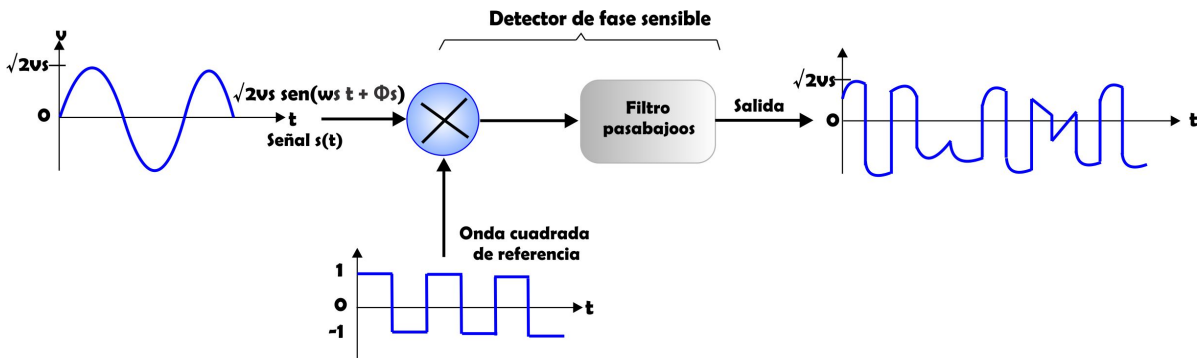


Figura III.7: Diagrama de un multiplicador ideal, con señales sincronas a la entrada.

Para obtener una operación síncrona se asume que  $\omega_s = \omega_R$  y como en el caso del detector síncrono la señal es cortada a bajas frecuencias por un filtro pasabajos, éste proceso multiplicativo elimina los productos a frecuencias pares, es decir  $2\omega_R, 4\omega_R,$  etc., entonces la salida final se ve afectada conteniendo solo los componentes en dc de la fase sensitiva, y que matemáticamente puede ser representada como

$$(3.7) \quad V_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s A_L(0) \cos(\phi_R - \phi_s)$$

Donde  $A_L(0)$  es la respuesta en magnitud del filtro a una frecuencia igual a cero.

Se puede ver que la respuesta de un detector sensible a fase de una señal síncrona es igual a la respuesta de un detector multiplicador ideal que maneja una señal de referencia de tipo sinusoidal en frecuencias de  $1/3, 1/5, 1/7,$  etc., que casualmente son las magnitudes correspondientes a los componentes de la serie de Fourier de la señal de referencia, tal como se muestra en la Figura III.7

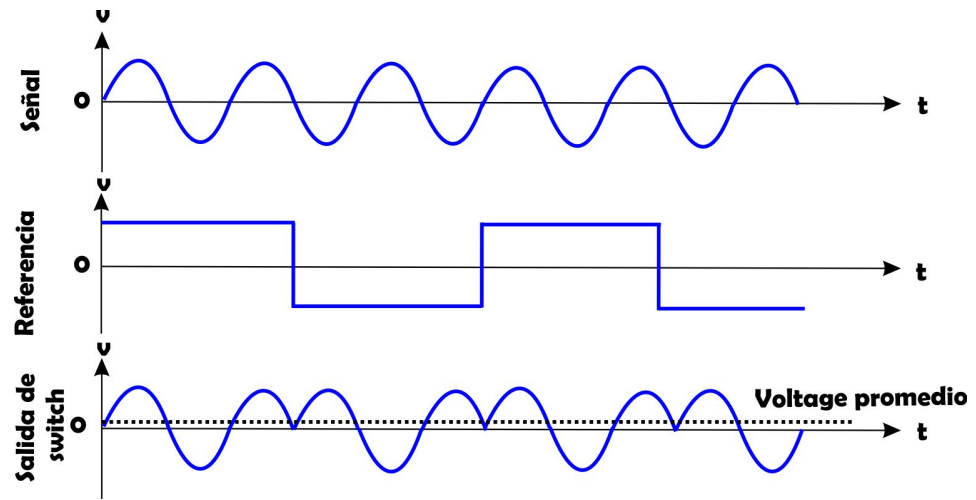


Figura III.8: Diagrama de un multiplicador ideal, con señales asíncronas a la entrada.

## IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

En éste capítulo se describe de forma detallada la implementación física del sistema LIDAR, así como las especificaciones necesarias de cada uno de los elementos que componen el sistema para su correcto funcionamiento, describiendo también las condiciones que se toman en cuenta debido a que la implementación es a nivel laboratorio.

### **4.1 Arreglos experimentales físicos del OSLRF-01**

En primer lugar es de vital importancia conocer el diagrama general del sistema completo, para ubicar e identificar cada elemento, veáse la Figura IV.1, donde los elementos que lo conforman son enumerados para identificar cada fase del sistema a manera de diagrama, el sistema LIDAR implementado a nivel laboratorio.

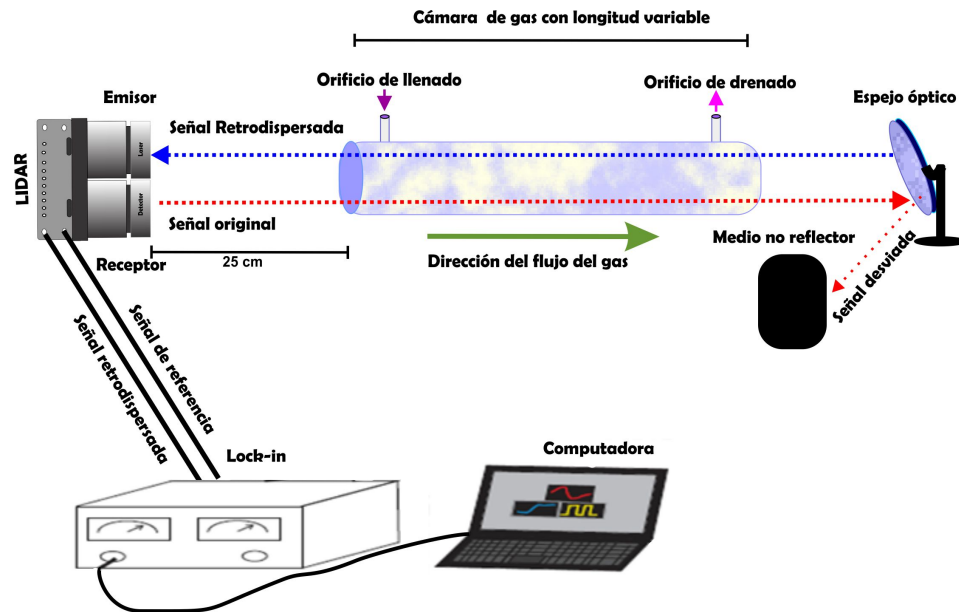


Figura IV.1: Diagrama general del montaje del sistema.

En ésta primera parte se habla de la configuración física del sistema LIDAR, inicialmente se procede a realizar el montaje de los elementos ópticos del sistema, para este caso, se trabaja con un laser de NY comercial (OSLRF-01), es un sensor de tiempo de vuelo y largo alcance, que cuenta con tecnología de estado sólido, la forma de operar es sumamente sencilla, basta con aplicarle una fuente de alimentación con un valor equivalente a 12v para alimentar el circuito, regulada con una capacidad de corriente de 100mA y de esta manera pueda operar de forma autónoma, generando pulsos de luz en el espectro electromagnético del infrarojo a una longitud de onda equivalente 850nm, en la Figura IV.2 se muestra de forma grafica las principales características del OSLRF-01, veáse el Anexo A, para más información técnica.

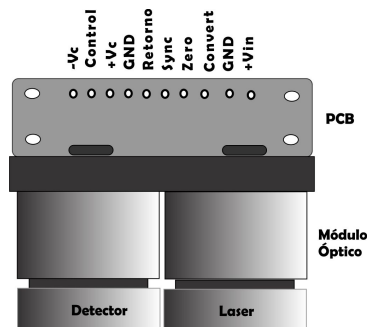


Figura IV.2: Pines de salida del OSLRF-01.

El *OSLRF-01* tiene varias conexiones de potencia y señal, algunas o todas pueden usarse para conectarse a un controlador de *host*, como se muestra en la Figura IV.3. Hay dos salidas de sincronización digital (0-3.3V) que se puede usar para administrar conversiones ADC y bucles de software, así como dos salidas analógicas, una que muestra el pulso de láser saliente y el otro la señal de retorno. Finalmente, hay una entrada de control analógica junto con referencias positivas y negativas que se pueden usar para ajustar la tasa de actualización y la resolución del OSLRF-01 (Tabla IV.1).

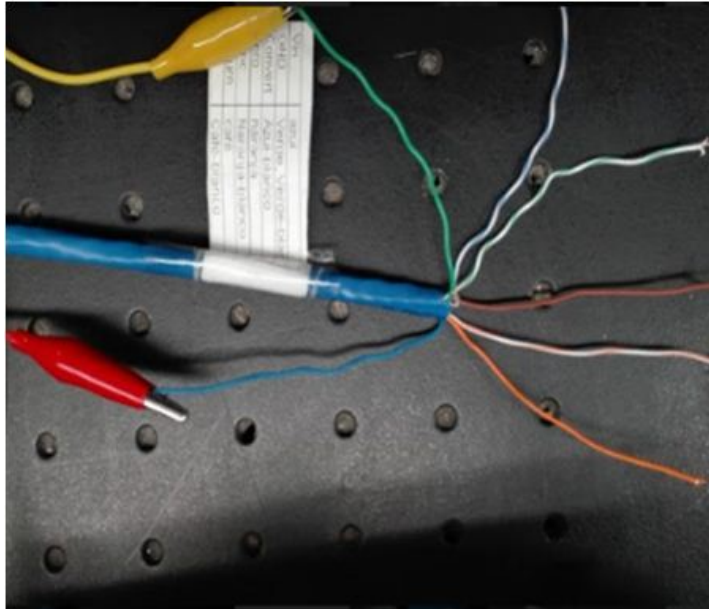


Figura IV.3: Cable de conexión que muestra las salidas principales para su correcta conexión.

| Señales del lidar | Color del cable asignado |
|-------------------|--------------------------|
| Vin               | Azul                     |
| GND               | Verde/Verde blanco       |
| Convert           | Azul blanco              |
| Zero              | Naranja                  |
| Sync              | Naranja blanco           |
| Return            | Café                     |
| s/c               | Café blanco              |

Tabla IV.1: Resumen de conexión del OSLRF-01

## CAPÍTULO IV. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

---

| Pin     | Tipo    | Protocolo           | Detalles                            |
|---------|---------|---------------------|-------------------------------------|
| +Vin    | Entrada | +12v DC             | Use 12 VCC capaz de entregar 100 mA |
| GND     | Comun   | 0v DC               | Tierra común                        |
| Convert | Salida  | 3.3v Digital        | Onda cuadrada de 31,72 kHz (ADC)    |
| Zero    | Salida  | 0-2.5V Análogo      | Pulso de láser saliente             |
| Sync    | Salida  | 3.3V Digital        | Señal de referencia                 |
| Return  | Salida  | 0-2.5V Análogo      | Señal de retorno                    |
| GND     | Comun   | 0V DC               | fuelle de alimentación y señales    |
| VC+     | Salida  | Referencia positiva | Referencia positiva                 |
| control | Entrada | 0-3.3V              | Voltage de entrada para control     |
| VC-     | Salida  | Referencia negativa | Referencia negativa                 |

Tabla IV.2: Descripción de parámetros OSLRF-01

Donde:

**Vin+:** Es la entrada de la alimentación del circuito, éste pin debe de ser alimentado con una fuente de alimentación de 12V, a 100mA de corriente directa para encender el LIDAR.

**GND:** Es la línea que representa la tierra comun para la fuente de alimentación, o también se utiliza para referenciar las señales de control y salida.

**Convert:** Provee una señal de tipo cuadrada con una frecuencia de 37.72 KHz que puede ser utilizada como una señal de disparo en conversiones analógicas digitales.

**Zero:** Representa la salida lógica del emisor del LIDAR, que contiene la forma del pulso original, es utilizada para realizar comparaciones y así poder deducir parametros importantes del experimento, tales como la distancia, densidad, concentración de substancias etc.

**Sync:** Salida del pulso que indica el tiempo en el que se encuentra la señal original, la frecuencia contenida puede ser utilizada para referenciar el instrumento de medición.

**Return:** Es la señal que es recolectada a través del receptor (Fotodiodo), ésta señal es una porción de la señal original retrodispersada.

VC±: Pines dedicados a voltajes positivos y negativos que son utilizados como referencia para establecer el control del sistema LIDAR.

Control: Este pin puede ser asignado una señal de referencia para controlar el pulso análogo de salida del LIDAR.

Una vez definidos e identificados los pines de conexión en la Tabla IV.2, se procede a uno de los procesos más complicados y de suma importancia para el montaje del sistema, que es la alineación del haz láser, ya que como se mencionó anteriormente, el láser utilizado trabaja en la región del infrarojo, por tanto es invisible para la vista, así que para eso se hace uso de un visor infrarojo para poder localizar el haz. Para ésto es de vital importancia determinar la longitud de la altura a la que se trabajará, es decir, definir y posicionar el OSRF-01 a la misma altura del dispersor, previendo que el cilindro que contiene la sustancia a examinar se encuentre en una zona estable, libre de objetos o superficies que puedan alterar la medición, una vez alineados éstos dos elementos, la salida del emisor es dirigido directamente hacia la cámara dispersora, llamada así porque en su interior contiene una sustancia en estado gaseoso que es introducida en tiempo real al recipiente, hasta un estado de saturación, generando un medio turbio, para asemejar el estado impredecible de la zona atmosférica, y que debido a las características antes mencionadas, este medio se convierte en un medio dispersor para el haz que lo atraviesa hasta una distancia  $x$ , a través de toda la cámara; es decir, el haz al recorrer toda la zona y chocar con las partículas del gas, éste es dispersado en todas direcciones, pero nuestro interés se centra solo en la sumatoria de los pequeños haz de la señal que van de regreso (señal retrodispersada) hacia la parte detectora del OSRF-01, que junto con la señal de referencia del mismo, son direccionados hasta el amplificador lock-in SR-530, cuya tarea principal es la de extraer la señal retrodispersada, para amplificarla y posteriormente obtener los coeficientes de Fourier.

## 4.2 Acondicionamiento de la señal

La señal retrodispersada proveniente de la cámara de gas como se mencionó anteriormente es devuelta al lidar, a través del fotodiodo con características determinadas.

El lidar comercial OSLRF-01(LIDAR), posee varias salidas tanto de alimentación y señal, tres de ellas muy importantes, las cuales se conectan bajo una configuración determinada en conjunto con el Lock-in, para que se puedan medir los coeficientes de Fourier. A continuación se muestra a manera de gráfico el cableado específico para la interconexión tanto el Lock-in, osciloscopio y el LIDAR, como se describe en la Figura IV.4. Cada elemento cumple con una tarea específica y todos son de vital importancia para nuestra etapa de medición. En resumidas cuentas el Lidar es el encargado de captar la señal de estudio, el Lock-in es el encargado de medir el primer y segundo coeficiente de la señal respecto a una señal de referencia directamente del lidar (Sync) y finalmente y no menos importante se encuentra el osciloscopio, que además de permitir visualizar ambas señales en tiempo real, tanto la original y la de regreso, mientras el experimento esta en marcha; también nos permite obtener los datos de ambas señales, y como estas fluctúan y varían en el tiempo, a través de su terminal Ethernet.

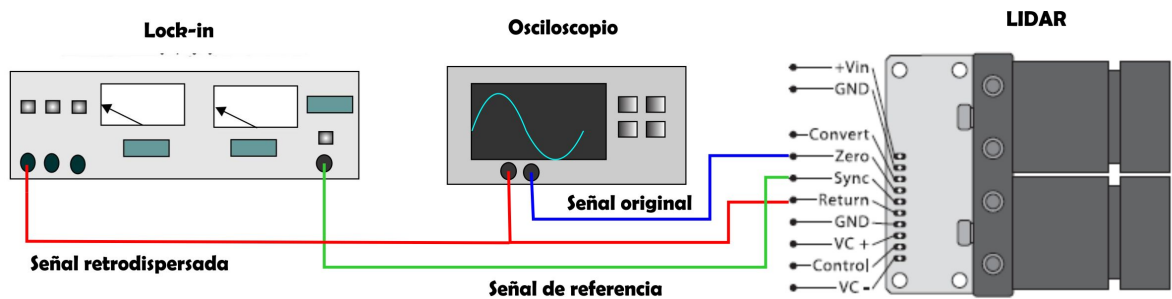


Figura IV.4: Diagrama general de conexión del sistema, para la extracción de datos.

### 4.3 Protocolos de comunicación

El estándar de comunicación para la transmisión de datos hacia un elemento emisor de datos (la computadora) se hace a través de el protocolo EIA RS-232, donde la transmisión de datos digital se hace en serie a través de una línea asimétrica, entre en Lock-in y la pc. A continuación, en la figura IV.5 se muestra la conexión y la trama de bits de datos en serie, donde claramente los elementos involucrados en esta etapa de captura de datos se hace a través del Lock-in, conectado desde su puerto RS-232, hacia el puerto USB del dispositivo terminal, llamese una laptop o una computadora de escritorio, tal y como se observa en la Figura IV.5.

#### 4.3. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

| Señal             | Especificaciones     | Descripción                           |
|-------------------|----------------------|---------------------------------------|
| GND               | Alimentación         | Aisla conector con enlace de terminal |
| SG                | Alimentación         | Establece la tensión de las señales   |
| TxD               | Canal Principal      | Línea de Transmisión de datos         |
| RxD               | Canal Principal      | Línea de Recepción de datos           |
| RTS,CTS,DSR y DCD | Canal Principal      | Señales básicas                       |
| DTR y RI          | Canal Principal      | señales conmutadas                    |
| SQ, CH y CI       | Canal Principal      | Canal Principal                       |
| DA, DD y DB       | Transmisión Síncrona | Exclusivas de sincronía               |
| DCE               |                      | Canal secundario                      |

Tabla IV.3: Resumen de conexión de RS-232

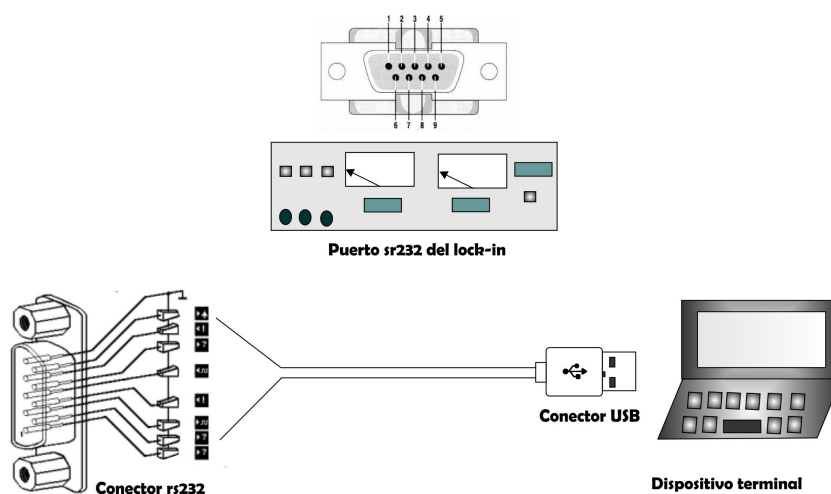


Figura IV.5: Dirección del flujo de datos a través del Lock-in hacia el elemento receptor, a través del protocolo de comunicación RS-232

El SR530 (modelo comercial del Lock-in) tiene una interfaz RS-232 (Tabla IV.3). El conector está configurado como un DCE (Equipo de comunicación de datos). Los parámetros de configuración de datos, tales como la velocidad en baudios, la paridad, los bits de parada y el modo de eco se seleccionan mediante el segundo interruptor (SW2) ubicado a la derecha de la interfaz, en la parte trasera del Lock-in, en resumidas cuentas, el interruptor 2, debe respetar la configuración que a continuación se describe, véase la Figura IV.6 y la Tabla IV.4, donde se describe de forma específica la configuración del interruptor 2. Consulte la página del Anexo B para información más detallada.



Figura IV.6: Configuración de las terminales del interruptor 2, para establecer que el Lock-in trabaje bajo el protocolo RS-232

| Interruptor | Estado | Descripción            |
|-------------|--------|------------------------|
| 1           | Bajo   | velocidad 9600 baudios |
| 2           | Alto   | velocidad 9600 baudios |
| 3           | Alto   | velocidad 9600 baudio  |
| 4           | Bajo   | Paridad par            |
| 5           | Bajo   | Paridad habilitada     |
| 6           | Bajo   | Modo eco habilitado    |
| 7           | Bajo   | 1 bit de parada        |
| 8           | Bajo   | No se utiliza          |

Tabla IV.4: Tabla de especificaciones generales que explican la configuración del Interruptor 2

## 4.4 Sistema de adquisición y control

El sistema de adquisición y control es un software que se crea con dos objetivos específicos, en primer lugar poder establecer la comunicación directa entre el lock-in y la computadora para poder controlar de forma automática, eficaz y según los requerimientos que el experimento requiera. En segundo lugar poder hacer la captación de la señal retrodispersada proveniente de la cámara de gas, que arriban en forma de datos para su procesamiento y posterior interpretación. En esencia el entorno gráfico creado se construye con la única necesidad de interpretar las señales provenientes del LIDAR, y que por ende es un elemento de suma importancia que forma parte del sistema de laboratorio construido. La programación de la plataforma de adquisición y control esta conformada básicamente por tres partes principales, la parte inicial o de configuración de la conexión, la plataforma de la obtención de datos y la plataforma de resguardo de información.

La interface de configuración para la conexión se muestra al usuario de forma gráfica a través de una ventana en la que se pueden visualizar los parámetros de configuración que el usuario necesita para entablar la comunicación, tal y como se muestra en la Figura IV.7. En ésta parte se configuran, elementos constantes y variables, siendo el puerto de comunicación un variable ya que se define según la detección de la pc, el resto de los elementos tienen condiciones preestablecidas que deben de respetarse a la hora de la configuración y poder obtener una conexión exitosa, véase a continuación la siguiente tabla en la que se describen los parámetros requeridos y bajo las especificaciones sugeridas, véase la Tabla IV.5.

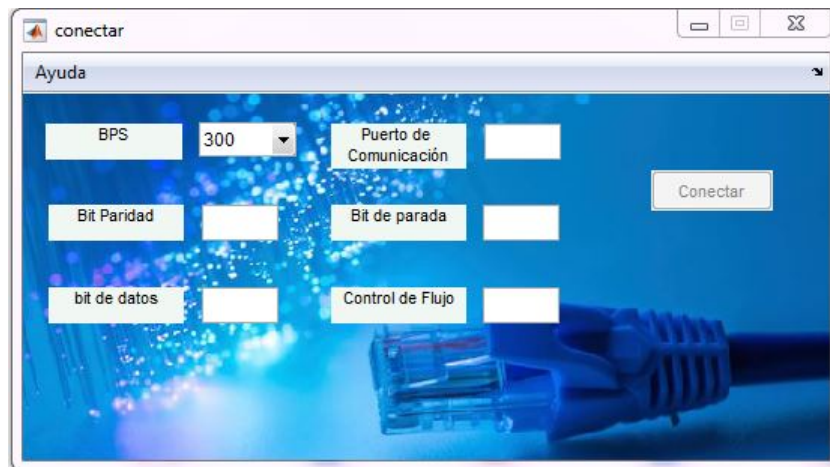


Figura IV.7: Interfaz de configuración principal para establecer la comunicación entre el software de la computadora receptora.

| Parámetro              | Especificación   |
|------------------------|------------------|
| BPS                    | 9600             |
| Bit de paridad         | 2(Even)          |
| Bit de datos           | 8                |
| Puerto de comunicación | Puerto detectado |
| Bit de parada          | 2-3              |
| Control de flujo       | 0(ninguno)       |

Tabla IV.5: Tabla donde se especifican los parámetros que se deben asignar a la interfaz para establecer la comunicación hacia el Lock-in.

La segunda parte del software es la interfaz principal, la cual es la encargada de proporcionar parámetros de control hacia el Lock-in y visualización de los datos que se capturan en tiempo real, tal y como se visualiza en la Figura IV.8.

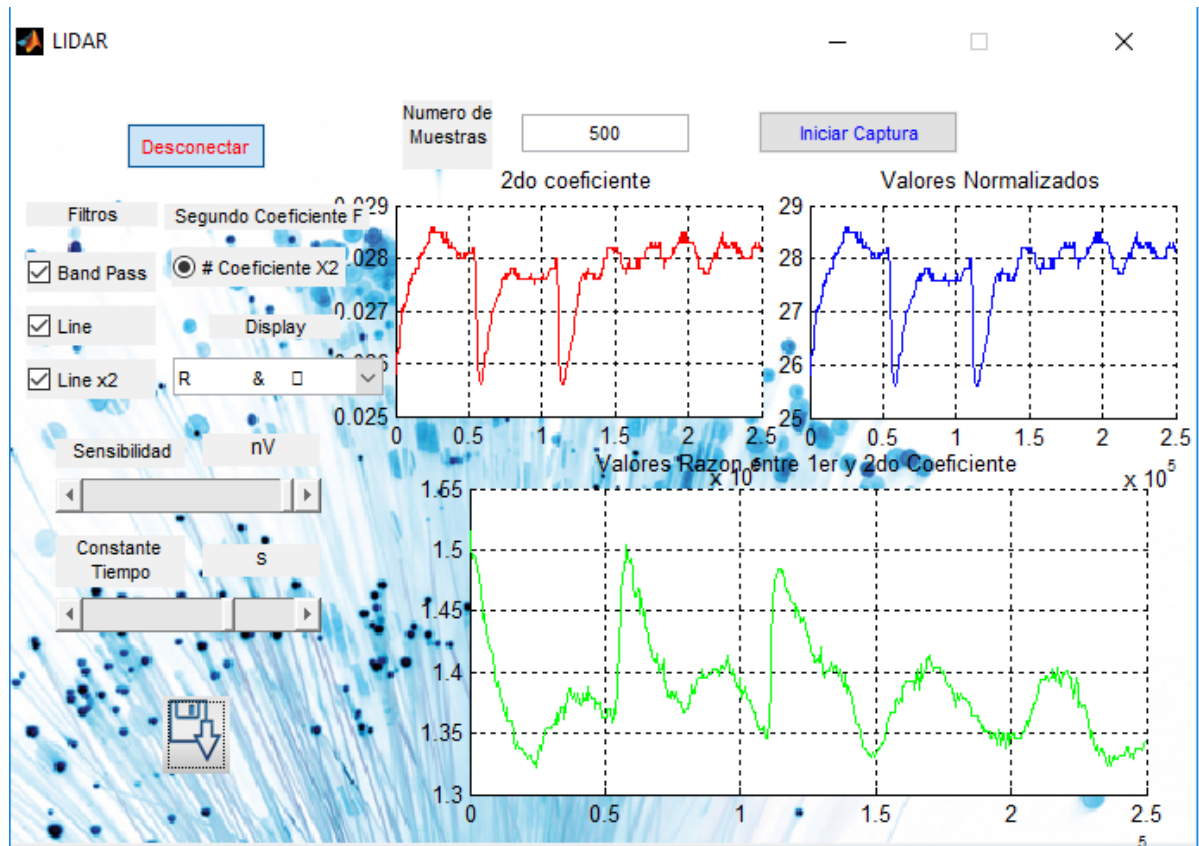


Figura IV.8: Interfaz de captura de datos en tiempo real, donde también existen controles para manipular al Lock-in de forma remota.

Dentro de los parámetros de control que provee esta práctica interfaz, están básicamente los controles de activación de filtros, tipos de coeficientes, variación de la sensibilidad, constantes de tiempo para la captura, y número de muestras a capturar, cuyas especificaciones pueden verse descritas en la Tabla IV.6; para la parte de la visualización, esta ventana nos ofrece poder monitorear el comportamiento de los datos que se obtienen durante el experimento, mediante gráficas que se dibujan en tiempo y forma, pudiendo así, verificar que la captura se realiza de forma adecuada, además de que ofrece información tal como si los coeficientes están decayendo o se mantienen en el instante de tiempo de la captura de los datos. Adicionalmente en una segunda gráfica se visualiza los valores de los coeficientes de forma normalizada, lo cual permite tener dos referencias visuales para poder verificar la captura en tiempo y forma.

| Parámetro           | Especificación                       |
|---------------------|--------------------------------------|
| Filtro pasabajos    | Activado                             |
| Line                | Activado                             |
| Line X2             | Activado                             |
| Coefficientes       | Primero o segundo, según se requiera |
| Display             | Modo magnitud y fase                 |
| Sensibilidad        | 200uV                                |
| Constante de tiempo | 1s                                   |
| Número de muestras  | Según requiera el experimentador     |

Tabla IV.6: Tabla de especificaciones generales donde se describen los comandos de captura y control de la interfaz principal.

En esta parte del software provee dos opciones de captura, bajo las mismas condiciones de captación: la primera es bajo el modo f y la segunda es en modo 2f, es decir controlar el Lock-in para que detecte señales en la frecuencia de entrada de referencia o detectar las señales al doble de la frecuencia de referencia de entrada determinada, permitiendo así, poder obtener los primeros dos coeficientes de Fourier para su posterior análisis.

Finalmente la tercera parte de la interfaz (veáse Figura IV.9) provee opciones para almacenar los datos capturados, en esta parte el experimentador puede guardar los coeficientes según le convenga: primero, segundo, normalizados, e inclusive con el tipo de formato que requiera: Excel(.xls), o en formato contenedor de datos binarios que utiliza el programa MATLAB (.m) o hasta archivos Objective-C.



Figura IV.9: Ventana de configuración de almacenamiento de los datos, según requiera el experimentador.

Una vez concluido el desarrollo del software, el cual cumple con resolver las necesidades de tomar y almacenar la información de las mediciones, se procede a realizar una calibración de la tarjeta de adquisición de datos en los canales en los que se inyectan las señales que envía el sistema LIDAR a la misma. El software tiene la capacidad de recuperar la señal inicial (Zero), para tener referencia de la forma del pulso que es enviado por el láser, y la señal de Return para ser comparada con la señal de Zero, que provienen del sistema LIDAR, controlando el muestreo de señales por la señal de sincronía (Sync).

## 4.5 Medición de un sólido

Una vez establecidas las conexiones necesarias para la comunicación de equipos para la etapa de medición de datos, alineación del lidar y establecimiento de la comunicación entre los dispositivos con la interfaz desarrollada; se procede a la realización de las primeras mediciones, que inicialmente fueron para comprender y analizar la forma de onda de la señal de envío (Zero) y la señal de retorno(Return) del lidar, es decir ésta primera etapa de mediciones puede entenderse como el proceso de caracterización y calibración del LIDAR. Para ello, se coloca un objeto sólido en este caso y como se comenta en la sección lidar, el láser contenido en el lidar tiene un espectro en el intervalo del infrarojo; por ende el sólido utilizado es un sensor infrarojo de tarjeta especial para la detección de haces con longitudes de onda comprendidos entre 0.35-1.775  $\mu\text{m}$ , veáse la Figura IV.10, en la que se puede apreciar un sensor modelo F-IRC1, detectando el haz infrarojo proveniente del LIDAR.

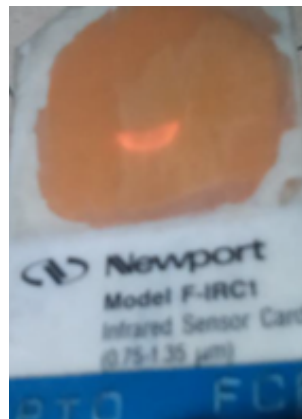


Figura IV.10: Imagen que muestra a través del sensor de tarjeta infraroja, la posición del haz láser.

Perfectamente alineado con el emisor del LIDAR, se inician las mediciones a diferentes distancias controladas, véase Figura IV.1 en donde para cada distancia se recolectan los datos a través de la interfaz, los coeficientes primero y segundo de la serie de Fourier de la señal de retorno y en el osciloscopio los datos que forman la señal retrodispersada. La interfaz desarrollada en Matlab resulta con grandes ventajas para la toma de datos, ya que los comandos del Lock-in son manipulados a través de la misma, por ende, esto provee mayor control mientras se realiza el experimento. Se establecen cuatro distancias estratégicas para la colocación del sólido: 30cm, 120cm, 180cm y 300cm, las cuales se encuentran dentro del rango de la longitud máxima de la cámara de niebla; para cada medición se realizan 500 muestras, obteniendo el promedio de las mismas para realizar las comparaciones adecuadamente, tal y como se muestra en la Tabla IV.7 y adiconamente la Figura IV.11 y la Figura IV.12 para verificar el buen funcionamiento del sistema.

| Distancia (cm) | Coficiente 1 (v) | Coficiente 2 (v) | Razón de coeficientes |
|----------------|------------------|------------------|-----------------------|
| 030            | 0.0163           | 0.0132           | 1.2319                |
| 120            | 0.4460           | 0.2584           | 1.7254                |
| 180            | 0.1402           | 0.0858           | 1.6331                |
| 300            | 0.0120           | 0.0172           | 1.6543                |

Tabla IV.7: Obtención de los datos de un sólido a diferentes distancias.

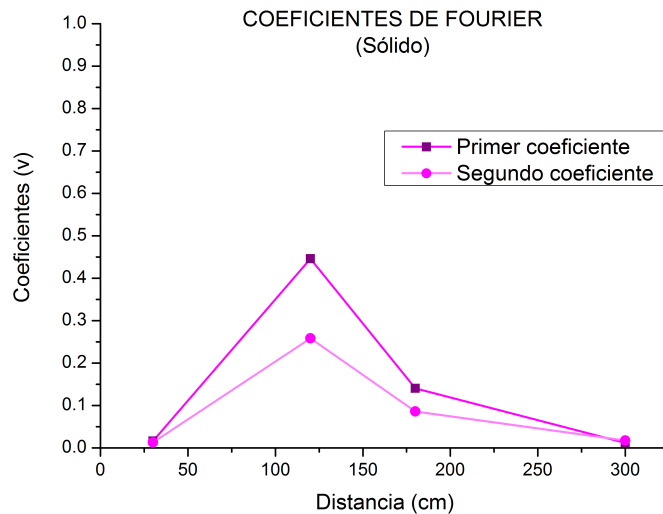


Figura IV.11: Gráfica que muestra como varían los valores de los coeficientes de un sólido en comparación con la longitud de alejamiento.

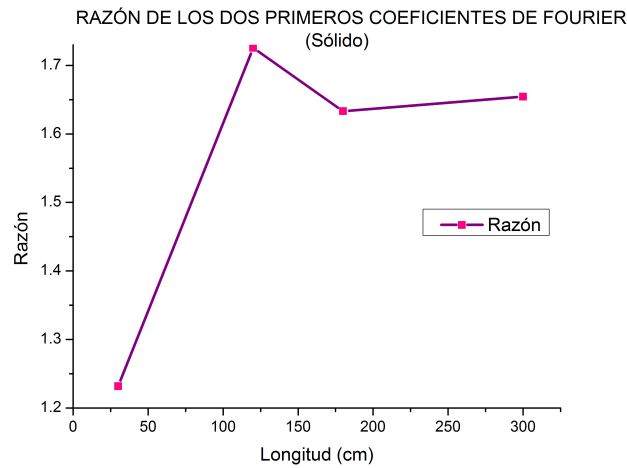


Figura IV.12: Gráfica que muestra como varían los valores de las razones de los coeficientes de un sólido en comparación con la longitud de alejamiento.

## 4.6 Medición de gases

Una de las tareas que forman parte de nuestro objetivo central, es precisamente estudiar un medio turbio, con características similares a la de la atmósfera, y debido a que el experimento se desarrolla bajo condiciones de laboratorio, con parámetros y condiciones controladas, se realiza la medición de gases con diferentes estructuras atómicas en una cámara de acrílico transparente que se ha diseñado con la capacidad de variar su longitud; es decir, con este parámetro, la cámara varía de tamaño según requiera el experimento, permitiendo al mismo tiempo cambiar el volumen y la densidad del gas contenido para caracterizar de forma correcta el cambio de las razones de los coeficientes de Fourier con respecto a la longitud de la cámara.

### 4.6.1 Medición de niebla e incienso

Considerado como la segunda etapa, se trabaja con la caracterización de elementos gaseosos; ya que dentro de los objetivos está implícita la caracterización de un medio turbio, como lo es la atmósfera terrestre, siendo ésta la parte gaseosa del planeta que se conforma por distintos gases; el oxígeno (21%) y el nitrógeno (78%), seguidos del argón (0.9%), el dióxido de carbono (0.03) y el vapor de agua (aproximadamente 1%).

La atmósfera está constituida por cantidades variables de agua, en forma de vapor

de agua, que se encuentra presente mayormente en la zona de la tropósfera, la cual proviene de diversas fuentes terrestres, debido al fenómeno de la vaporización de mares y ríos gracias a la fuente de calor solar. Por ende uno de los primeros gases a analizar es precisamente la niebla en nuestro experimento para caracterizar la cámara de gas y analizar los datos de la señal.

Inicialmente se procura tomar en cuenta las especificaciones de conexión descritas en la sección anterior, una vez establecidas las conexiones que hacen efectiva la comunicación entre los equipos, se procede a montar sobre una superficie totalmente estable la cámara de gas, cuidando que ésta no sufra ninguna perturbación de movimiento en cualquier momento a la hora del experimento, a una distancia de separación aproximada entre el LIDAR y el tubo de 25cm, para no afectar la estabilidad de la cámara, ya que la base era una superficie limitada (mesa de laboratorio donde se encontraba también el LIDAR).

En seguida se mide la longitud de la altura a la que se encuentra el centro de la cámara de gas, para poder alinear el lidar; tomando en cuenta que la cámara debe tener dos canales libres, tanto el de envío como recepción totalmente dentro de la cámara; es decir, cuidar que no solo el emisor tenga su campo de visión dentro de la cámara sino también el receptor, para que se pueda captar de forma correcta la señal retrodispersada sin sufrir alguna perturbación por choques con la superficie sólida del tubo de gas.

Aunado a lo anteriormente mencionado, también es muy importante que el campo de visión del emisor este totalmente despejada de cualquier elemento sólido que pueda interferir con la señal y perturbar el sentido de la medición, por ello en esta parte de la configuración se agrega un espejo óptico que desvíe la señal restante hacia un punto muerto, preferentemente una zona que no pueda reflejar el haz, véase la Figura IV.13 que muestra la configuración de los componentes para la realización adecuada de las mediciones.

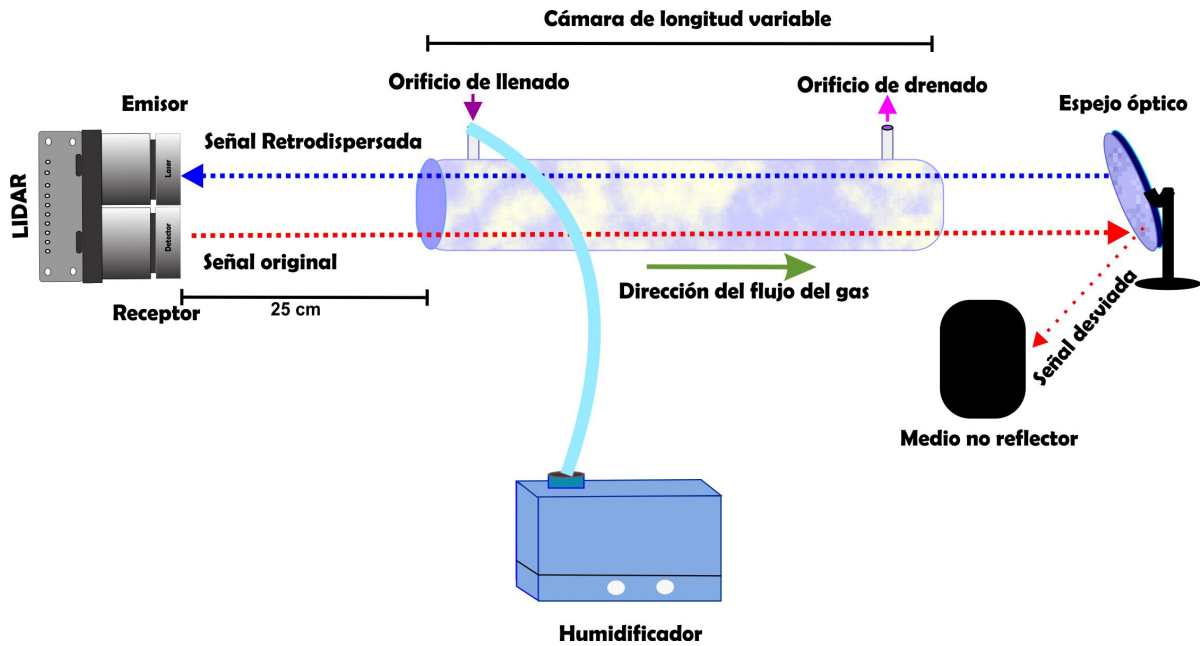


Figura IV.13: Gráfico que muestra la configuración de los elementos para el correcto envío y recepción de la señal para el llenado de la neblina.

A continuación se procede al llenado de la cámara con neblina, por lo que se conecta a la cámara directamente un humidificador ultrasónico, el cual es el encargado de generar niebla, que es inyectada a través del orificio de llenado. A toda potencia inyecta un litro de agua en 5 horas y 7 minutos, lo cual equivale a un caudal de  $0.0487 \frac{ml}{s}$ , generando un flujo de  $0.0156 \frac{ml}{sm^2}$ , a una temperatura de 21.5° Centígrados, con una presión atmosférica de 1015 hPa (presión atmosférica en la ciudad de Puebla), hasta un punto de saturación produciendo un flujo de neblina dentro de la cámara igual a  $2.4999 \frac{ml}{sm^2}$  y una densidad de  $145.4236 \frac{ml}{m^3}$ , fluyendo en la dirección de propagación del haz emitido, desde el orificio de llenado hacia el orificio de drenado (esta configuración se realizó por mera conveniencia en cuanto al acomodo de los elementos tales como el osciloscopio, la fuente y el humidificador, de forma contraria los resultados son similares, salvo por una diferencia de amplitud debido a que cuando la niebla se mueve al encuentro del haz se acerca más al láser provocando un ligero incremento en la amplitud, pero siempre conservando la forma de la señal y por ende la función matemática es siempre la misma, véase la Figura IV.14), ya que los medios dispersores se encuentran en constante movimiento en la atmósfera, el flujo simula este movimiento; por ende características tales como la densidad, temperatura, presión y turbulencias que se generan dentro de la cámara son considerados en el experimento.

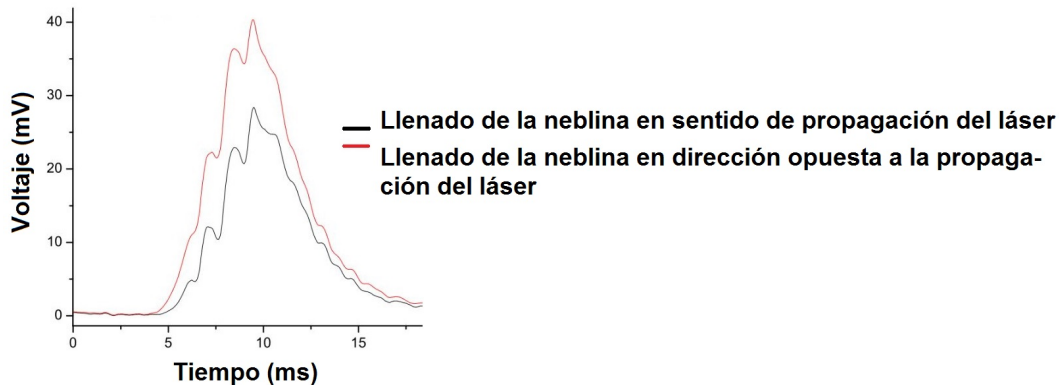


Figura IV.14: Gráfica que muestra la similitud que existe en las señales, cuando las mediciones se toman en distintas direcciones.

Con el fin de analizar el comportamiento de los coeficientes de Fourier con respecto a la densidad de la niebla, la señal retrodispersada fue medida mientras se hacía el proceso de llenado de la cámara. En la Figura IV.15 se muestran el primer y segundo coeficiente de Fourier del pulso retrodispersado por la niebla dentro de la cámara, correspondiente a una longitud de 150cm, claramente se puede apreciar el efecto de la turbulencia, causante de variaciones en la densidad de la nube, donde puede observar la transición de la neblina; la grafica puede dividirse en tres zonas: Zona I (0s-74s): Se muestra el comportamiento del llenado de la cámara hasta su punto de saturación, es decir cuando el humidificador se enciende.

Zona II (64s-129s): La cámara se encuentra completamente llena, veáse que a pesar de las pequeñas variaciones debido a la turbulencia que se genera, ambos coeficientes se mantienen en promedio constantes.

Zona III (129s-215s): Se muestra el vaciado de la cámara cuando el humidificador se apaga.

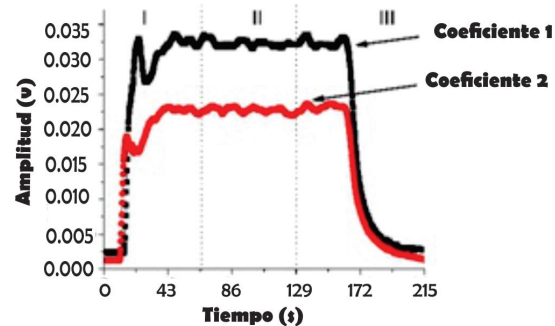


Figura IV.15: Gráfica que muestra la evolución temporal de los primeros coeficientes mientras el pulso es retrodispersado a través de la neblina.

Para asegurar que todas las mediciones se realizaron bajo las mismas condiciones, se trabaja con los mismos parámetros de temperatura, caudal, presión, densidad y flujo en todas y cada una de las longitudes de la cámara, véase la Figura IV.16, donde se puede apreciar la cámara saturada de neblina.

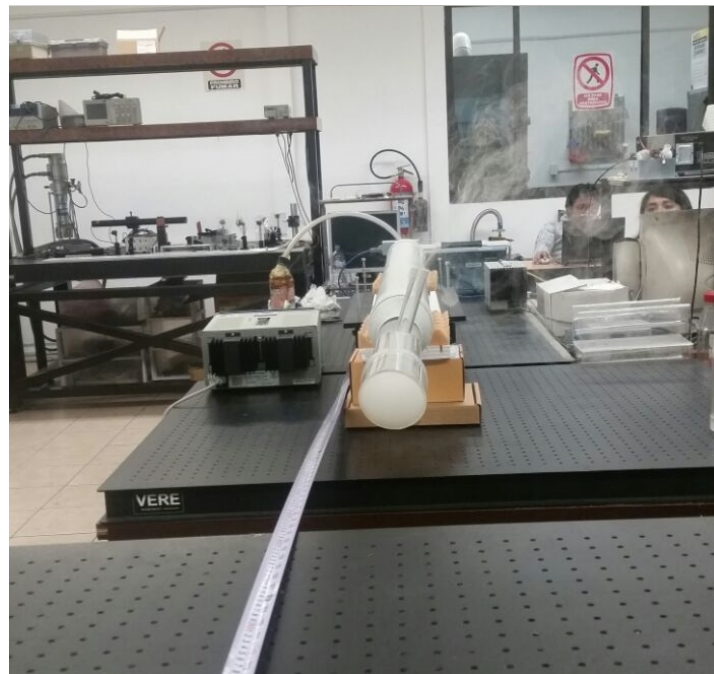


Figura IV.16: Fotografía del experimento en ejecución, cuando el tubo está saturado de neblina.

Una vez realizado el llenado el tubo, se procede al envío del haz del láser a través del gas que se encuentra contenido dentro de la cámara, y enseguida se inicia

la captura de datos del Lock-in (para obtener el primer y segundo coeficiente de Fourier de la señal retrodispersada) a través del software de captura y control, y al mismo tiempo se hace la captura del comportamiento de las señales, tanto la de envío (señal LIDAR) y la de recepción (señal de regreso o retrodispersada) a través de la terminal Ethernet del osciloscopio hacia la computadora.

Para una caracterización minuciosa se establecen longitudes variables de la cámara de gas, desde su longitud inicial equivalente a 225 cm hasta su máxima longitud 290 cm, con un intervalo de variación de 5 cm, tomando 10,000 muestras por cada medición, véase la Tabla IV.8, donde se muestran los promedios de los coeficientes y las razones para cada longitud.

| Longitud(cm) | Coefficiente 1 (v) | Coefficiente 2 (v) | Razón de coeficientes |
|--------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 225          | 0.1377             | 0.0615             | 1.8310                |
| 230          | 0.1494             | 0.0884             | 1.6801                |
| 235          | 0.1328             | 0.0849             | 1.5106                |
| 240          | 0.1229             | 0.0842             | 1.4509                |
| 245          | 0.1025             | 0.0632             | 1.6254                |
| 255          | 0.1395             | 0.0922             | 1.5173                |
| 260          | 0.1227             | 0.0925             | 1.3293                |
| 265          | 0.1115             | 0.0885             | 1.2738                |
| 270          | 0.1109             | 0.0847             | 1.3167                |
| 275          | 0.1227             | 0.0608             | 1.2974                |
| 280          | 0.1227             | 0.0704             | 1.3707                |
| 285          | 0.1324             | 0.0717             | 1.8174                |
| 290          | 0.0961             | 0.0808             | 1.2295                |

Tabla IV.8: Se muestra la relación que existe entre las diferentes longitudes de la cámara de niebla y sus respectivos coeficientes de Fourier para la neblina.

A continuación se muestra en la Figura IV.17, el comportamiento del primer y segundo coeficiente de Fourier de la señal retrodispersada, en comparación con la longitud de la cámara de niebla.

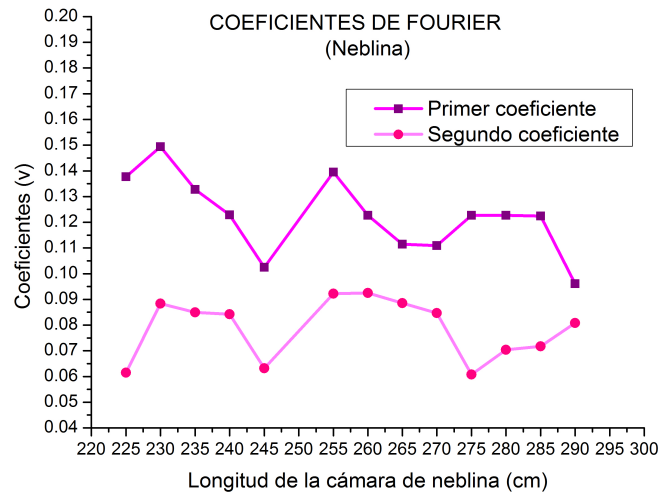


Figura IV.17: Gráfica que muestra los coeficientes de neblina, con respecto a la variación de la longitud de la cámara de neblina.

Enseguida se presenta en la Figura IV.18, el comportamiento de las razones de los dos primeros coeficientes de Fourier, que se define como el cociente del primer coeficiente entre el segundo coeficiente de la serie de Fourier de la señal retrodispersada a causa de la neblina.

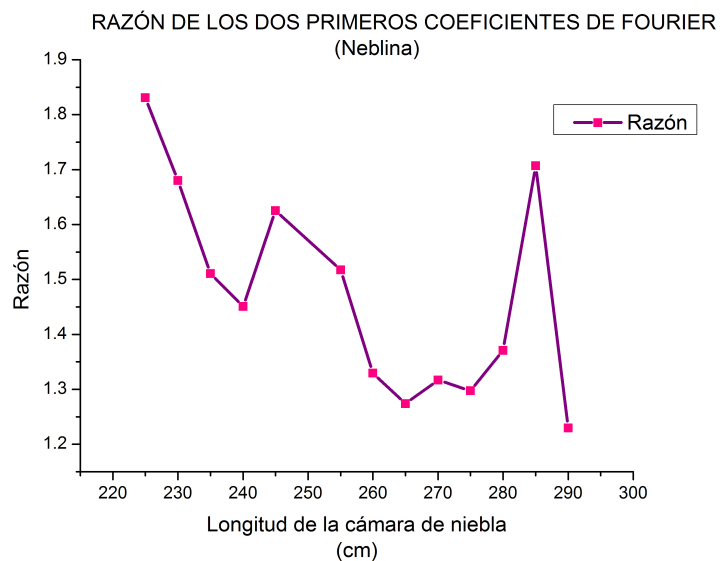


Figura IV.18: Gráfica que muestra el comportamiento de las razones de los dos primeros coeficientes de neblina, con respecto a la variación de la longitud de la cámara.

En la Figura IV.19 se muestra la implementación del sistema LIDAR de laboratorio, donde se puede observar la ejecución del experimento para la neblina, cuya señales, tanto la de envío, como la retrodispersada se pueden observar desde el osciloscopio, veáse la Figura IV.20.



Figura IV.19: Ejecución del experimento de la neblina .

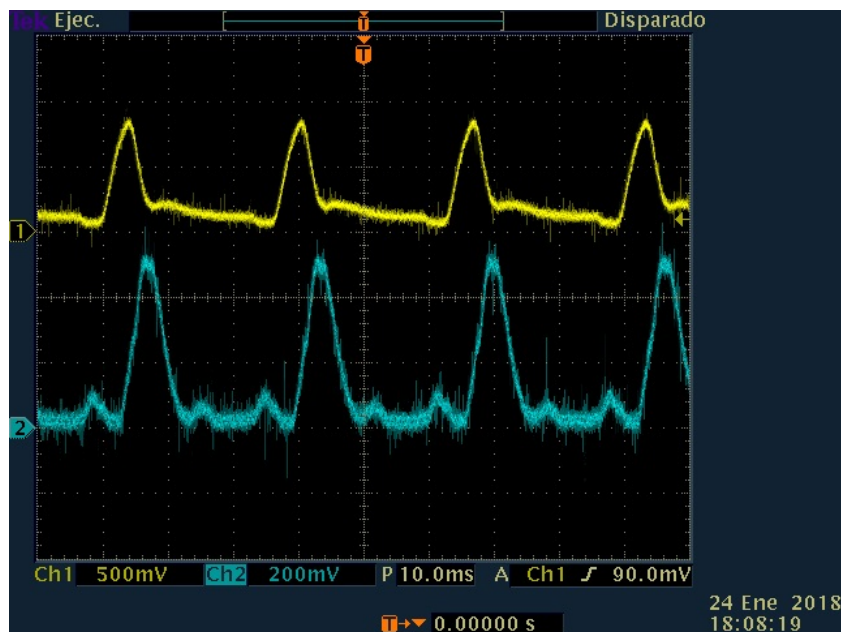


Figura IV.20: Fotografía que muestra la forma de las señales, la señal LIDAR se muestra en amarillo y la de retorno en azul, después de ser reflejada por la niebla.

## CAPÍTULO IV. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

---

Finalmente se concluyen las mediciones con un gas con estructura molecular totalmente diferente a la neblina, ya que el humo proveniente del incienso contiene partículas sólidas más finas, el tamaño de éstas partículas oscilan entre 0.005 y 0.01  $\mu\text{m}$ , en comparación con las partículas del vapor de agua (partículas líquidas con un tamaño aproximado de entre 0.01 a 10  $\mu\text{m}$ ) [9].

Entonces se sigue el mismo procedimiento anteriormente mencionado en la sección de vapor de agua para realizar la captura de datos, con la única diferencia que el llenado de la cámara con humo proviene de un mini generador que empuja el incienso generado por la quema de resina aromática del *Bursera* (conocida comúnmente como copal) hacia la cámara de gas; a diferencia de las mediciones de la niebla; donde un equipo especial (humidificador), proporciona un flujo constante a una potencia determinada, el mini generador de incienso es totalmente manual, así que por cada medición asignada se hace la quema de la sustancia para obtener un punto de saturación visual dentro de la cámara de gas.

Una vez realizado el llenado el tubo, y produciendo un flujo de humo, se procede a iniciar la captura de datos de la señal retrodispersada y los coeficientes de Fourier. Para la caracterización del incienso se establecen longitudes variables de la cámara llena de humo, como se hizo con la niebla, que varían desde una longitud inicial equivalente a 2.25 m hasta su máxima longitud 2.90 m, con un intervalo de variación de 5 cm, tomando al igual que el caso de la niebla 10,000 muestras por cada medición. Véase la Tabla IV.9.

| Longitud (cm) | Coefficiente 1 (v) | Coefficiente 2 (v) | Razón de coeficientes |
|---------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 225           | 0.1223             | 0.0555             | 2.2471                |
| 230           | 0.1263             | 0.0633             | 2.0008                |
| 235           | 0.0257             | 0.0195             | 1.3313                |
| 240           | 0.0945             | 0.0722             | 1.2916                |
| 245           | 0.1023             | 0.0876             | 1.2117                |
| 255           | 0.1414             | 0.0850             | 1.6414                |
| 260           | 0.1093             | 0.0584             | 1.9818                |
| 265           | 0.1549             | 0.0901             | 1.7187                |
| 270           | 0.0695             | 0.0392             | 1.7685                |
| 275           | 0.1553             | 0.0864             | 1.8008                |
| 280           | 0.1019             | 0.0318             | 1.7660                |
| 285           | 0.1395             | 0.1001             | 1.3935                |
| 290           | 0.1342             | 0.0463             | 2.8932                |

Tabla IV.9: Se muestra la relación que existe entre las diferentes longitudes de la cámara de gas y sus respectivos coeficientes de Fourier, para el incienso.

A continuación se muestra en la Figura IV.21, el comportamiento del primer y segundo coeficiente de Fourier de la señal retrodispersada, en comparación con la longitud de la cámara de incienso.

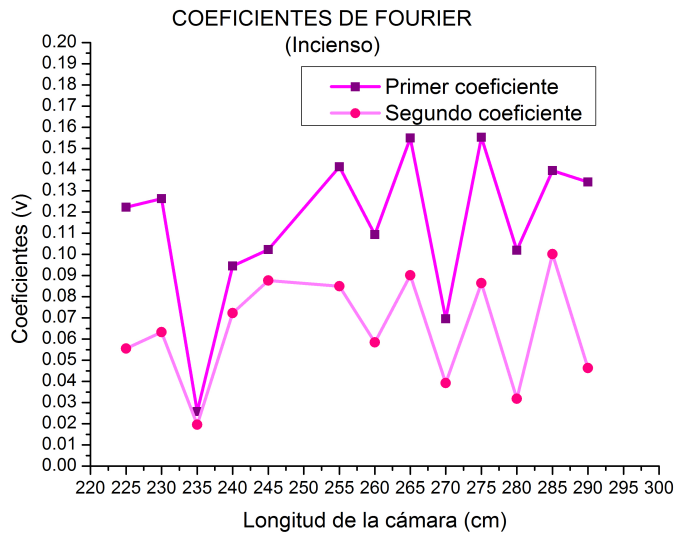


Figura IV.21: Gráfica que muestra el comportamiento de los coeficientes de acuerdo a la variación de la longitud de la cámara de humo.

Enseguida se presenta en la Figura IV.22, el comportamiento de las razones de los dos primeros coeficientes de Fourier de la señal retrodispersada a causa del incienso.

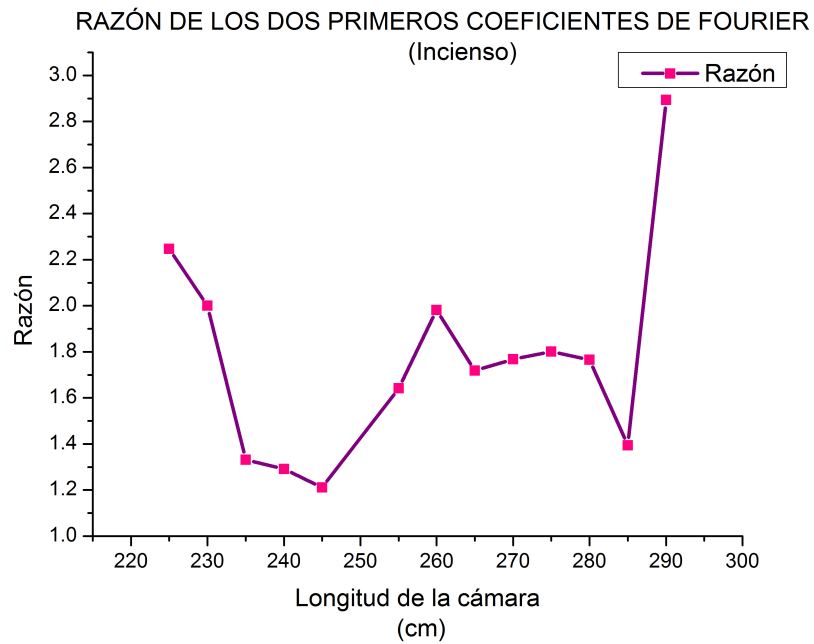


Figura IV.22: Gráfica que muestra el comportamiento de las razones de los dos primeros coeficientes de incienso, con respecto a la variación de la longitud de la cámara.

En la Figura IV:23 se muestra la implementación del sistema LIDAR de laboratorio, donde se puede observar la ejecución del experimento, con la quema directa del incienso, a través del minigenerador de humo que se encarga de dirigir el humo generado del copal hacia el orificio de llenado de la cámara, cuyas señales, tanto la de envío, como la retrodispersada se pueden observar desde el osciloscopio, véase la Figura IV.24.

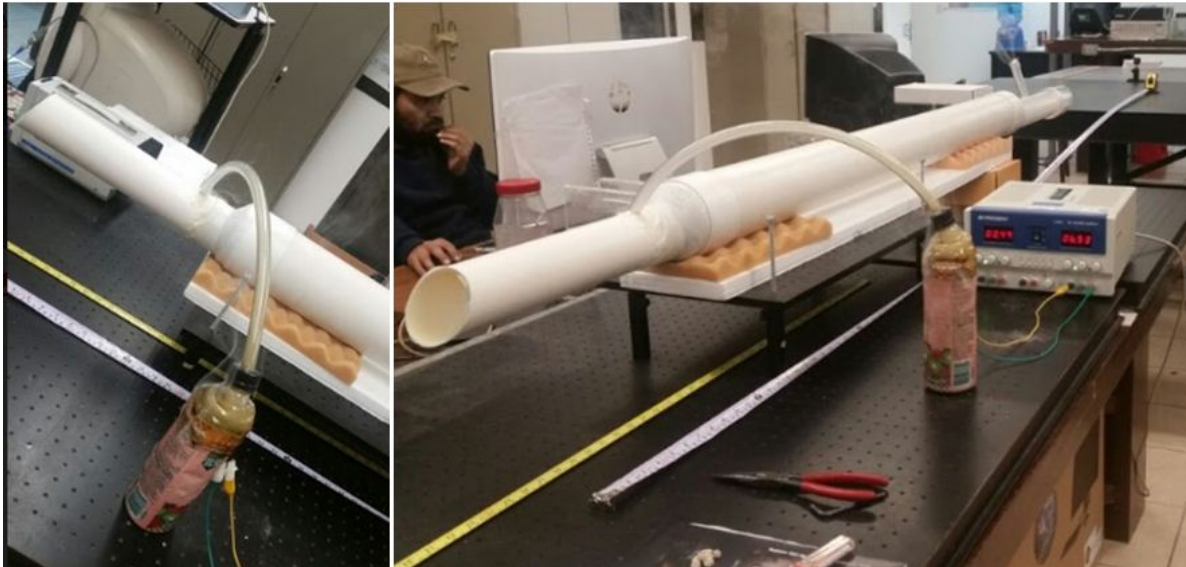


Figura IV.23: Quema de incienso, dirigido hacia la cámara.

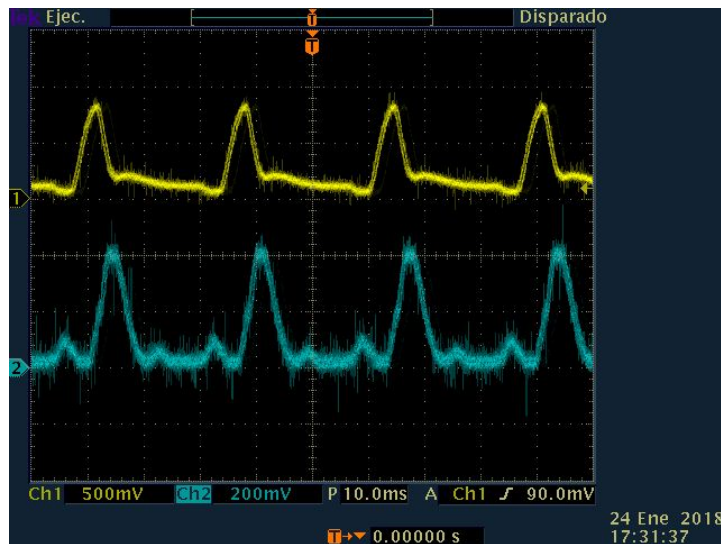


Figura IV.24: Fotografía que muestra la forma de las señales, la señal LIDAR se muestra en amarillo y la de retorno en azul, después de ser reflejada por el incienso.





## ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 5.1 Análisis Teórico

Una vez realizada la medición de los gases, se procede al análisis de la señal retrodispersada, para ello se requieren los datos tomados desde el osciloscopio, que prácticamente es la señal que contiene toda la información sobre la modificación de la señal original después recorrer la cámara bajo parámetros de alta densidad y saturación de sustancias gaseosas, con distintas longitudes de la cámara.

La señal de retorno se recoge desde el osciloscopio a través de una configuración entre una computadora y un instrumento basado en Ethernet para comunicarse mediante un cable cruzado de Ethernet (cable cruzado con terminal RJ-45) que le permite conectar los dos puertos de red directamente sin necesidad de un concentrador de red. Se usó un osciloscopio Tektronix 3054B. La señal obtenida para su análisis se muestra en la Figura V.1, una vez capturada la señal de retorno, se puede visualizar que la señal cumple con un patrón ondulatorio repetitivo; es decir la señal retrodispersada además de ser periódica, visualmente las ondas se comportan similarmente a una función Gaussiana.

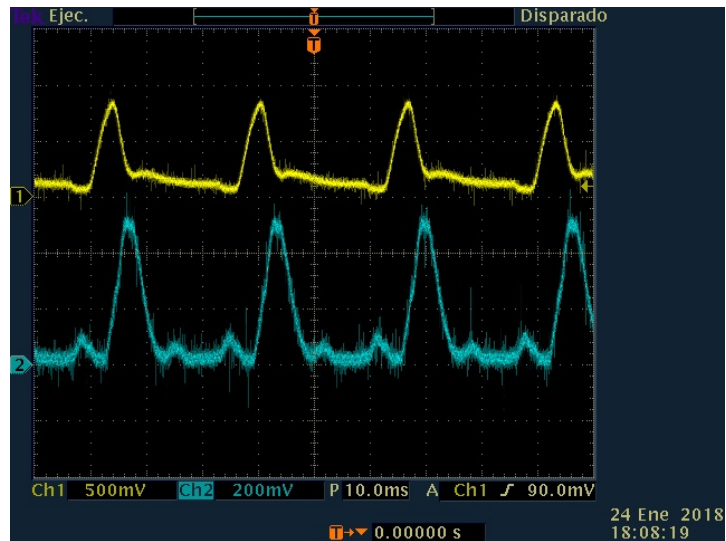


Figura V.1: Señal original (amarillo) y señal retrodispersada (azul), vista desde el osciloscopio.

Una vez obtenida la señal retrodispersada se grafica con ayuda del programa informático enfocado al análisis y graficado científico OriginLab version Pro 8.5.1, cuya gráfica corresponde a la Figura V.2.

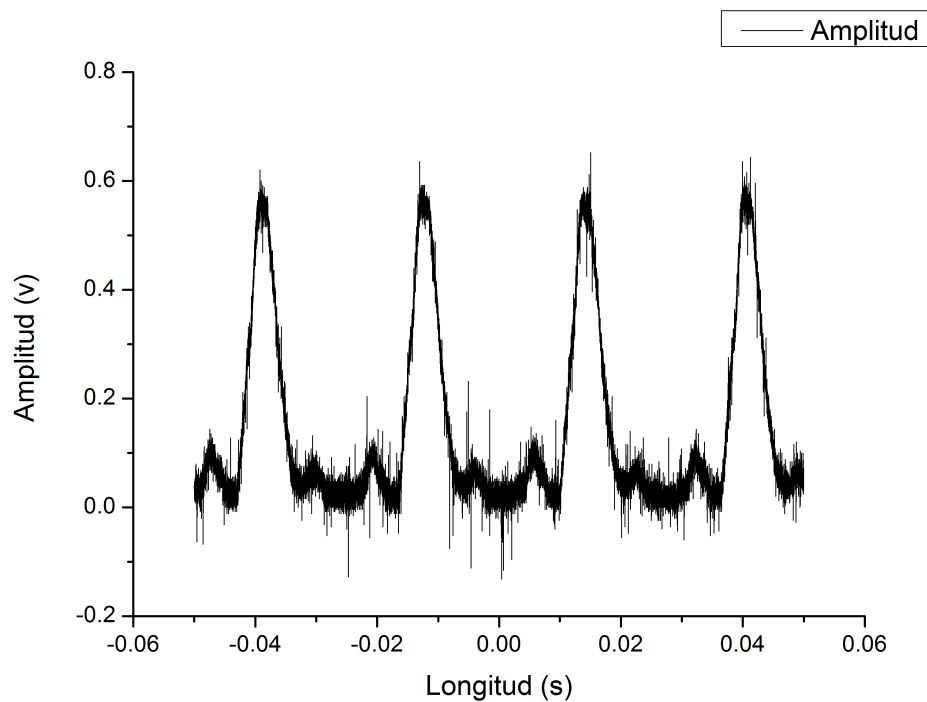


Figura V.2: Extracción de la señal original, graficada desde Origin Lab.

Dada la forma de un pulso; la función Gaussiana se puede definir matemáticamente como sigue:

$$(5.1) \quad f(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)$$

La transformada de Fourier de un pulso Gaussiano, veáse la figura V.3 según Lathi [10], se puede definir como:

$$(5.2) \quad f(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \implies F(\omega) = \sqrt{2\pi}\sigma \exp\left(-\frac{\sigma^2\omega^2}{2}\right)$$

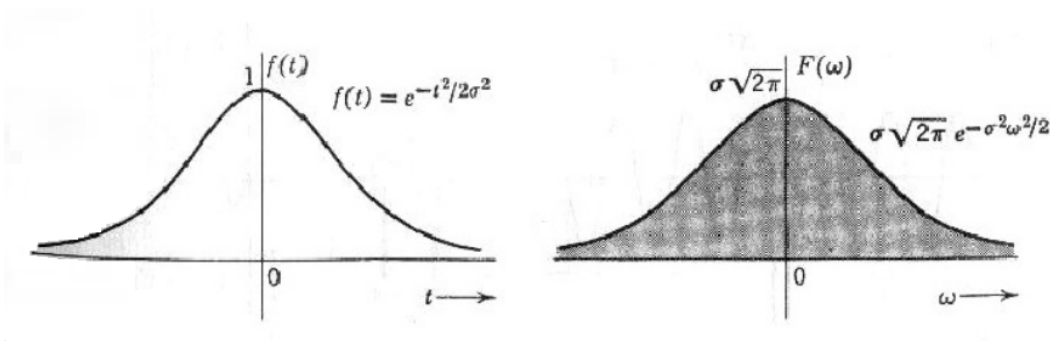


Figura V.3: Representación de la función Gaussiana en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia[10].

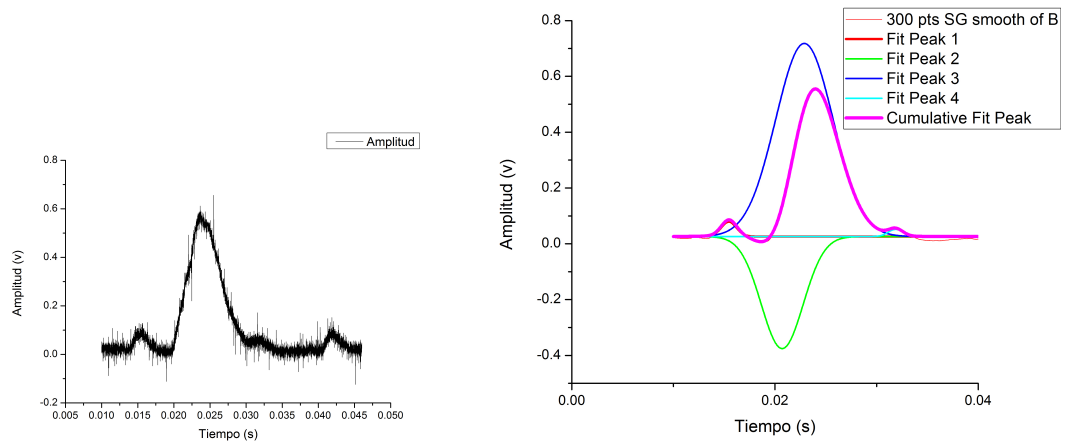
Una vez previsualizada la forma de onda de la señal retrodispersada, está lista para su proceso de análisis y obtener conclusiones en base a la hipótesis planteada sobre la relación que existe entre la distancia y la razón de los primeros dos coeficientes de Fourier.

Veáse claramente que tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia, la función es la misma campana de Gauss, de la cual podemos observar las siguientes características:

- Cuenta con un máximo en el eje  $t = 0$ , es decir la función se encuentra centrada en 0.
- Es simétrica al rededor de  $t$

Cabe mencionar que lo anteriormente descrito está definido estrictamente para una función de tipo Gaussiana, sin embargo la señal periódica que se extrae del osciloscopio tiene variaciones acentuadas en la base de la onda (Figura V.4 (a)); las

cuales pueden mostrar información relevante que no se debe descartar, para eso se procede a realizar un ajuste con varias funciones Gaussianas, en cada máximos relativos de un sólo pulso de toda la función (por la periodicidad que presenta), una vez agregadas todas las gaussianas necesarias, OriginLab se encarga de procesar las señales involucradas para obtener la suma de las anteriores para poder ajustarse a la señal original, veáse en la Figura V.4(b), la señal ajustada en color fucsia.



(a) Un pulso de la señal retrodispersada.

(b) Ajuste de la señal, en color fucsia.

Figura V.4: Extracción y procesamiento de la señal en Origin Lab

Una vez hecho el ajuste de la señal, se obtiene la ecuación de la función, tomando en cuenta uno sólo de sus pulsos, descrita matemáticamente como sigue:

$$(5.3) \quad f(t) = y_0 + \frac{A}{\omega \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \exp\left(-2 \frac{(x - x_c)^2}{\omega^2}\right)$$

Comparando las exponenciales de las ecuaciones 5.1 y 5.3, se puede deducir que:

$$\exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) = \exp\left(-2 \frac{(x - x_c)^2}{\omega^2}\right)$$

$$\frac{1}{2\sigma^2} = \frac{2}{\omega^2}$$

Por ende  $\sigma = \frac{\omega}{2}$

Entonces la transformada de Fourier de un pulso Gaussiano centrado en el origen  $x_c = 0$ , se define como

$$(5.4) \quad f(t) = \exp\left(-\frac{2x^2}{\omega^2}\right) \Rightarrow \sqrt{\frac{\pi}{2}} \omega \exp\left(-\frac{\omega^2 \omega^2}{8}\right)$$

Entonces

$$(5.5) \quad f(t) = \frac{A}{\omega\sqrt{\frac{\pi}{2}}} \exp(-2\frac{x^2}{\omega^2}) \implies F(\omega) = \frac{A}{\omega\sqrt{\frac{\pi}{2}}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \omega \exp(-\frac{(\omega^2 w^2)}{8})$$

Si se desplaza en el tiempo  $f(t - t_0) \rightarrow F(\omega) \exp(-i\omega t_0)$ , se puede ver como

$$(5.6) \quad f(t) = \frac{A}{\omega\sqrt{\frac{\pi}{2}}} \exp(-2\frac{(x - x_c)^2}{\omega^2}) \implies F(\omega) = A \exp(-\frac{(\omega^2 w^2)}{8}) \exp(-i\omega t_c)$$

La serie de Fourier de una señal periódica se puede expresar en términos de la transformada de Fourier de uno de sus pulsos como sigue[11]

$$(5.7) \quad f'(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} c_n \exp(in\omega_0 t)$$

Donde  $c_n = \frac{1}{T} F(n\omega_0)$

Entonces un tren de pulsos que tienen la siguiente forma

$$(5.8) \quad g(x) = \frac{A}{\omega\sqrt{\frac{\pi}{2}}} \exp(-2\frac{(x - x_c)^2}{\omega^2}) \implies \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp(in\omega_0 t)$$

Donde

$$F(\omega) = A \exp(-\frac{(\omega^2 w^2)}{8}) \exp(-i\omega t_c)$$

$$c_n = \frac{A}{T} \exp(-\frac{\omega^2 (n\omega_0)^2}{8}) \exp(-i(n\omega_0) t_c)$$

La serie de Fourier queda entonces

$$(5.9) \quad g(x) = \frac{A}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(-(\frac{n\omega_0 \omega}{\sqrt{8}})^2) \exp(in\omega_0(x - x_c))$$

La serie de Fourier de N Gaussianas es entonces

$$(5.10) \quad f(x) = \sum_{k=1}^N (\frac{A_i}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(-(\frac{n\omega_0 \omega_k}{\sqrt{8}})^2) \exp(in\omega_0(x - x_{ck}))$$

Analizando entonces la serie de Fourier de una Gaussiana  $g(x)$  es:

$$(5.11) \quad f(x) = \sum_{k=1}^N (\frac{A_i}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(-(\frac{n\omega_0 \omega_k}{\sqrt{8}})^2) \exp(in\omega_0(x - x_{ck}))$$

Entonces la serie de Fourier de un pulso Gaussiano en términos trigonométricos quedaría descrita como

$$(5.12) \quad g(x) = \sum_{k=1}^N \left( \frac{2A}{T} + \left( \frac{2A}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\left(\frac{nw_0\omega}{\sqrt{8}}\right)^2\right) \cos(nw_0(x - x_{ck})) \right) \right)$$

Y para N pulsos la función queda descrita de la siguiente forma

$$(5.13) \quad f(x) = \sum_{k=1}^N \left( \frac{A_k}{T} \left( 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\left(\frac{nw_0\omega_k}{\sqrt{8}}\right)^2\right) \cos(nw_0(x - x_{ck})) \right) \right)$$

A continuación se calcula el  $m$  -ésimo término de los coeficientes de Fourier, sabiendo que

$$(5.14) \quad b_m = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \cos(nw_0x) dx$$

$$(5.15) \quad a_m = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \sin(nw_0x) dx$$

Se calculan, los primeros coeficientes de la serie de Fourier de la señal retrodispersada, entonces sólo se requieren del primero y segundo coeficientes de la serie, puesto que éstos contienen las frecuencias más altas y por ende nos proveen la mayor información sobre la amplitud de la señal retrodispersada estudiada; ahora, cabe mencionar que la toma de los datos del experimento se configuraron para que las muestras obtenidas se registraran en modo magnitud y fase, por tanto, para calcular el primer coeficiente de Fourier, se tiene que obtener la magnitud, utilizando la ecuación 3.1, tal y como se explica en la sección 3.3, entonces

$$b_1 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \cos(nw_0x) dx$$

$$a_1 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \sin(nw_0x) dx$$

$$(5.16) \quad c_1 = \sqrt{b_1^2 + a_1^2}$$

Para obtener el segundo coeficiente, se calcula como prosigue

$$b_2 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \cos(nw_0x) dx$$

$$a_2 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \sin(nw_0x) dx$$

$$(5.17) \quad c_2 = \sqrt{b_2^2 + a_2^2}$$

Finalmente se obtiene la razón de los dos primeros coeficientes de la serie de Fourier ( $R$ ), definida como el cociente del coeficiente 1 entre el coeficiente 2, tal y como se muestra en la ecuación 5.18; cualitativamente ésta razón es constante en cada gas, la relación de los coeficientes de Fourier es casi la misma para todas las longitudes de la cámara, porque la función matemática de la forma de la señal retrodispersada no varía incluso al cambio de longitud de la cámara, siendo la amplitud el único parámetro variable.

$$(5.18) \quad R = \frac{c_1}{c_2}$$

### 5.1.1 Cálculo analítico

Una vez obtenidas las expresiones de los primeros dos coeficientes de la serie de Fourier de la señal retrodispersada, ahora es posible obtener los valores numéricos de  $c_1$ ,  $c_2$  y  $R$ , sustituyendo los parámetros de ajuste mostrados en la Tabla V.1, quedando entonces para la medición de la neblina con una longitud de la cámara igual a 2.30 m, con  $T=0.0263$  s en su máxima saturación de gas los siguientes resultados, calculados con la ayuda de Wolfram Mathematica, versión 12.0

Donde

| Gaussiana | $y_0$  | $x_c$  | w      | A        |
|-----------|--------|--------|--------|----------|
| Peak1     | 0.0262 | 0.0155 | 0.0015 | 9.97E-05 |
| Peak2     | 0.0262 | 0.0207 | 0.0041 | -0.0020  |
| Peak3     | 0.0262 | 0.0229 | 0.0057 | 0.0049   |
| Peak4     | 0.0262 | 0.0319 | 0.0015 | 4.64E-05 |

Tabla V.1: Se muestran los valores de los parámetros definidos para cada una de las cuatro Gaussianas utilizadas para el ajuste de la función retrodispersada.

Una vez definidos todos los valores de las variables, se procede a calcular

$$b_1 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \cos(nw_0x) dx = 0.0169$$

$$a_1 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \sin(nw_0x) dx = 0.1069$$

$$(5.19) \quad c_1 = \sqrt{b_1^2 + a_1^2} = 0.1082$$

Para obtener el segundo coeficiente, se calcula

$$b_2 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \cos(nw_0x) dx = -0.0668$$

$$a_2 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \sin(nw_0x) dx = -0.0275$$

$$(5.20) \quad c_2 = \sqrt{b_2^2 + a_2^2} = 0.0723$$

Finalmente se obtiene la razón (R) de los coeficientes de Fourier para la longitud de 230 cm.

$$(5.21) \quad R = \frac{c_1}{c_2} = 1.4972$$

Se calcula cada una de las longitudes definidas de la cámara para el caso de la neblina, para poder recabar todos los cálculos, tal y como se muestra en la siguiente tabla (Tabla V.2), donde se puede apreciar todos los cálculos realizados, veáse también la Figura V.5, donde se muestra de forma gráfica el comportamiento de las razones teóricas para la neblina.

| Longitud (cm) | Coficiente 1 (v) | Coficiente 2 (v) | R      |
|---------------|------------------|------------------|--------|
| 225           | 0.1994           | 0.1017           | 1.9610 |
| 230           | 0.1082           | 0.0723           | 1.4972 |
| 235           | 0.0920           | 0.0623           | 1.4761 |
| 240           | 0.0919           | 0.0622           | 1.4771 |
| 245           | 0.0776           | 0.0555           | 1.3971 |
| 255           | 0.1159           | 0.0784           | 1.4783 |
| 260           | 0.0903           | 0.0616           | 1.4651 |
| 265           | 0.0859           | 0.0597           | 1.4393 |
| 270           | 0.0826           | 0.0581           | 1.4209 |
| 275           | 0.1102           | 0.0822           | 1.2973 |
| 280           | 0.0786           | 0.0569           | 1.3822 |
| 285           | 0.0724           | 0.0495           | 1.4622 |
| 290           | 0.0789           | 0.0545           | 1.4479 |

Tabla V.2: Se muestran los resultados teóricos calculados para la neblina.

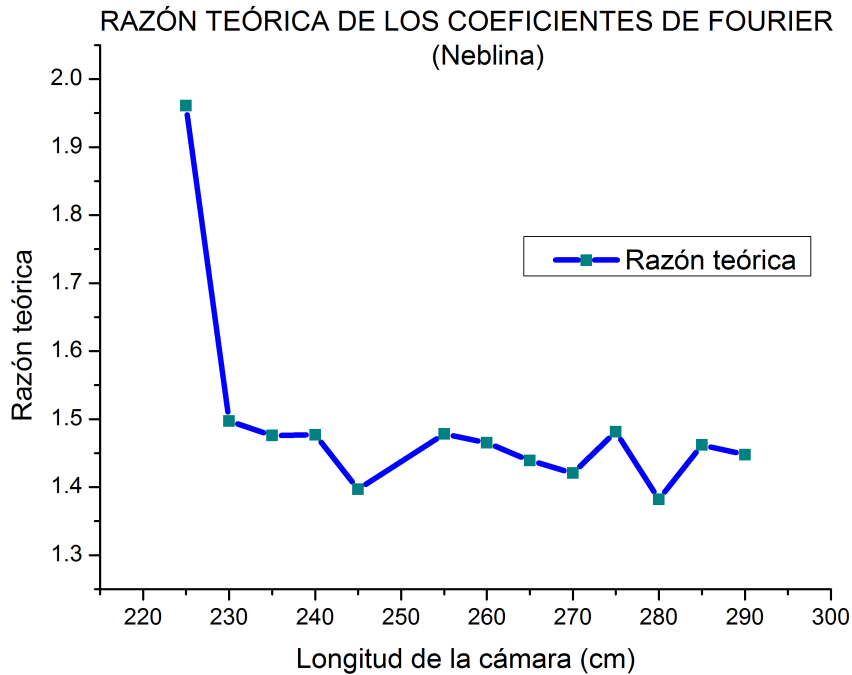


Figura V.5: Visualización de las razones con respecto a la longitud de la cámara de niebla, nótese que los valores oscilan alrededor de 1.49, con independencia de la longitud.

De la misma forma se registran los resultados analíticos sobre las mediciones del incienso, véase Tabla V.3, donde se muestran los coeficientes y razones calculadas.

| Longitud (cm) | Coficiente 1 (v) | Coficiente 2 (v) | R      |
|---------------|------------------|------------------|--------|
| 225           | 0.0852           | 0.0545           | 1.5632 |
| 230           | 0.0810           | 0.0519           | 1.5598 |
| 235           | 0.0260           | 0.0160           | 1.6275 |
| 240           | 0.0269           | 0.0155           | 1.7383 |
| 245           | 0.1006           | 0.0673           | 1.4958 |
| 255           | 0.0982           | 0.0642           | 1.5306 |
| 260           | 0.0932           | 0.0577           | 1.6149 |
| 265           | 0.0904           | 0.0551           | 1.6404 |
| 270           | 0.0949           | 0.0582           | 1.6302 |
| 275           | 0.0759           | 0.0759           | 1.5158 |
| 280           | 0.0947           | 0.0605           | 1.5649 |
| 285           | 0.1098           | 0.0720           | 1.5259 |
| 290           | 0.1279           | 0.0700           | 1.8280 |

Tabla V.3: Se muestran los resultados teóricos calculados para el incienso.

En la siguiente figura (Figura V.6), se muestra gráficamente el comportamiento de las razones de los coeficientes de la señal retrodispersada del incienso.

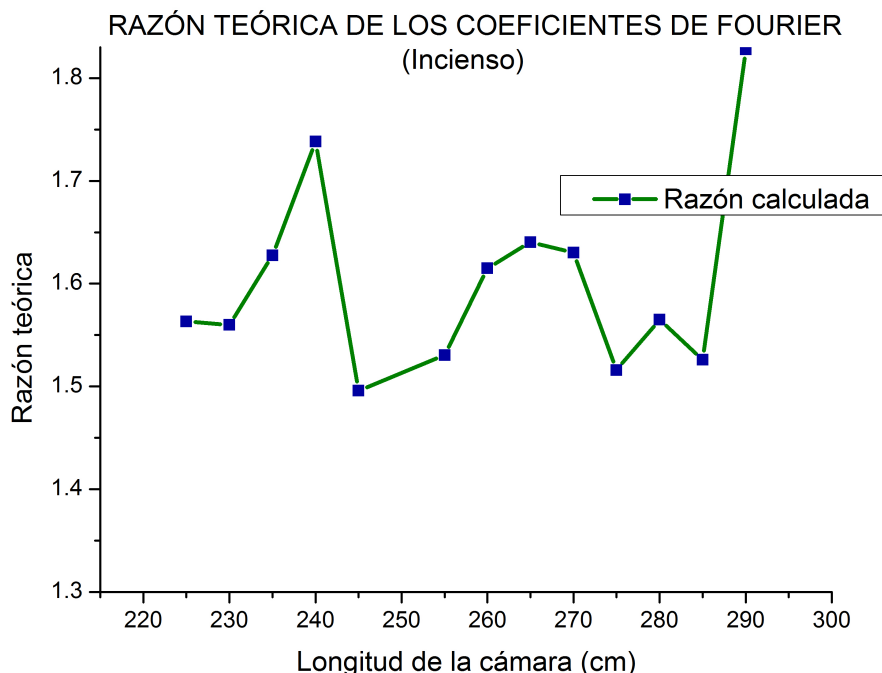


Figura V.6: Visualización de las razones con respecto a la longitud de la cámara de incienso, nótese que los valores oscilan alrededor de 1.6, con independencia de la longitud.

### 5.1.2 Comparación y análisis de los coeficientes

En este apartado se muestran los datos más relevantes de la investigación, cuya información resulta bastante interesante para ambos gases utilizados en el experimento; las siguientes tablas comparativas nos dan una perspectiva de análisis muy eficaz sobre las razones de los coeficientes experimentales y teóricos.

En la primer lugar se analiza la neblina, véase Tabla V.4, donde se puede observar claramente por simple inspección que las razones tanto experimentales como teóricas son casi similares, también se define un margen de error para cada longitud de la cámara, definida como  $Error = R_{experimental} - R_{calculada}$ .

| RAZONES DE NEBLINA |                    |               |         |
|--------------------|--------------------|---------------|---------|
| Longitud (cm)      | Razón Experimental | Razón Teórica | Error   |
| 225                | 1.8310             | 1.9610        | -0.1300 |
| 230                | 1.6801             | 1.4972        | 0.1829  |
| 235                | 1.5106             | 1.4761        | 0.0345  |
| 240                | 1.4509             | 1.4771        | -0.0261 |
| 245                | 1.6254             | 1.3971        | 0.2284  |
| 255                | 1.5173             | 1.4783        | 0.0390  |
| 260                | 1.3293             | 1.4651        | -0.1358 |
| 265                | 1.2738             | 1.4393        | -0.1655 |
| 270                | 1.3167             | 1.4209        | -0.1042 |
| 275                | 1.2974             | 1.2973        | -0.0001 |
| 280                | 1.3707             | 1.3822        | -0.0115 |
| 285                | 1.8174             | 1.4622        | 0.3552  |
| 290                | 1.2295             | 1.4479        | -0.2184 |

Tabla V.4: Tabla comparativa de los valores experimentales y calculados de la neblina.

A continuación se muestra de forma gráfica el comportamiento de ambas razones tanto experimentales como teóricas, véase la Figura V.7, del cual se pueden obtener el siguiente análisis estadístico que se puede visualizar en la Tabla V.5.

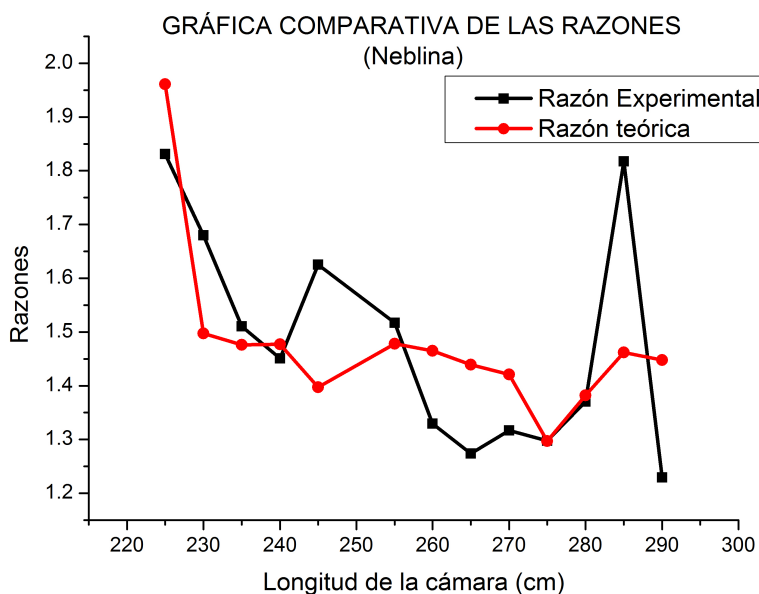


Figura V.7: Visualización de las razones experimentales y teóricas de la neblina.

CAPÍTULO V. ANÁLISIS Y RESULTADOS

| ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA |        |                     |        |        |        |
|-------------------------|--------|---------------------|--------|--------|--------|
| Razón                   | Media  | Desviación estándar | Mínimo | Medio  | Máximo |
| Experimental            | 1.4808 | 0.2044              | 1.2295 | 1.4509 | 1.8310 |
| Teórico                 | 1.4771 | 0.1549              | 1.2973 | 1.4622 | 1.9610 |

Tabla V.5: Tabla comparativa de los valores experimentales y calculados de la neblina.

En la segunda sección se analiza el incienso, véase Tabla V.6, donde se puede observar de la misma forma que las razones de los coeficientes tanto experimentales como teóricas presentan menos estabilidad, del cual se pueden obtener el siguiente análisis estadístico que se puede visualizar en la Tabla V.7.

| RAZONES DEL INCIENSO |                    |               |         |
|----------------------|--------------------|---------------|---------|
| Longitud (cm)        | Razón Experimental | Razón Teórica | Error   |
| 225                  | 2.2471             | 1.5632        | 0.6839  |
| 230                  | 2.0008             | 1.5598        | 0.4410  |
| 235                  | 1.3313             | 1.6275        | -0.2962 |
| 240                  | 1.2916             | 1.7383        | 0.7430  |
| 245                  | 1.2117             | 1.4958        | -0.2841 |
| 255                  | 1.6414             | 1.5306        | 0.1108  |
| 260                  | 1.9818             | 1.6149        | 0.3668  |
| 265                  | 1.7187             | 1.6404        | 0.0783  |
| 270                  | 1.7685             | 1.6302        | 0.1383  |
| 275                  | 1.8008             | 1.5158        | 0.2851  |
| 280                  | 1.7660             | 1.5649        | 0.2011  |
| 285                  | 1.3935             | 1.5259        | -0.1325 |
| 290                  | 2.8932             | 1.8280        | 1.0652  |

Tabla V.6: Tabla comparativa de los valores experimentales y calculados del incienso.

| ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA |        |                     |        |        |        |
|-------------------------|--------|---------------------|--------|--------|--------|
| Razón                   | Media  | Desviación estándar | Mínimo | Medio  | Máximo |
| Experimental            | 1.7728 | 0.4548              | 1.2117 | 1.7660 | 2.8932 |
| Teórico                 | 1.6027 | 0.0944              | 1.4958 | 1.5649 | 1.8280 |

Tabla V.7: Análisis estadístico de las razones de Fourier.

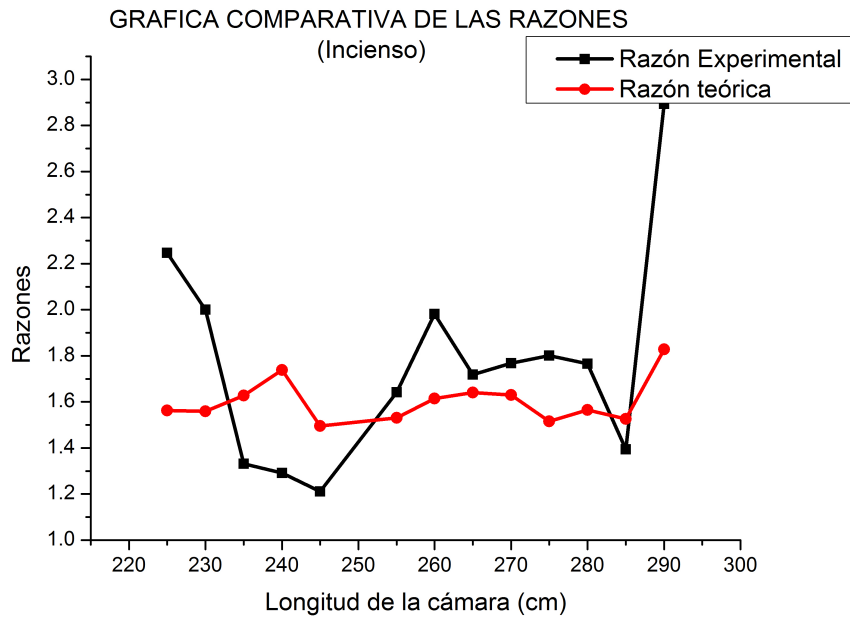


Figura V.8: Visualización de las razones del incienso experimentales y teóricas.



## CONCLUSIONES

### 6.0.1 Sobre el sistema

Uno de los puntos más importante en el desarrollo de esta investigación, y que se encuentra ligada directamente con el cumplimiento de los objetivos y la culminación exitosa de ésta tesis, es precisamente la de desarrollar un sistema LIDAR de laboratorio, para así poder realizar la caracterización de los gases.

Como se menciona en el capítulo IV, el sistema completo consta de 4 etapas, 2 de ellas desarrolladas desde cero, la primera se trata de un elemento meramente físico, más específicamente hablando sobre el diseño y la implementación de la cámara de gas, que aunque fue un verdadero reto realizar una cámara de esa índole, se logró el producto deseado bajo las especificaciones requeridas (cortes transversales, ajuste en las uniones, orificio de drenado y llenado); la segunda parte se trata de nuestra plataforma de captura (software diseñado para la toma de muestras y procesamiento de datos en tiempo real), realmente es un sistema bastante confiable a la hora de poner en marcha el experimento, cumple con funciones de un software de gamma media, lo cual dio mayor confiabilidad a la hora de la obtención de los datos. Pudiendo concluir que el desarrollo del sistema planteado, se realizó satisfactoriamente, con un nivel de funcionamiento muy bien diseñado, pero sobre todo bastante eficiente a la hora de la toma de muestras y captura de la información.

En la siguiente tabla (Tabla VI.1) se muestran las especificaciones del LIDAR de laboratorio implementado en éste proyecto.

| TABLA DE ESPECIFICACIONES                   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| Parámetro                                   | Descripción                          |
| Longitud de onda                            | 850nm                                |
| Tamaño del pulso                            | <30ns                                |
| Frecuencia del pulso                        | <16Khz                               |
| Presición                                   | 1nV                                  |
| Exactitud                                   | 0.002V                               |
| Distancia máxima                            | 15m                                  |
| Impedancia                                  | 100M+25pF                            |
| Sensitividad                                | 100nV a 500mV                        |
| Ruido                                       | 7nV/Hz a 1 kHz                       |
| Conexión al osciloscopio                    | via ethernet                         |
| Conexión al Lock-in                         | RS-232                               |
| Tamaño                                      | 15 cm 8 cm x 6cm                     |
| Control del sistema                         | Remota (disponible en contraportada) |
| Sistema operativo requerido para el control | Windows Seven o superior             |

Tabla VI.1: Tabla de especificaciones del LIDAR de laboratorio.

### 6.0.2 Sobre la caracterización

Acerca de la caracterización de los dos tipos de gases, hubo muchas ventajas a la hora de realizar las mediciones de la neblina, ya que para saturar la cámara de gas, se utilizó un humidificador, sistema que permite tener una neblina constante y densa, lo cual lleve a obtener un rango de resultados más estables; a diferencia de la caracterización con el incienso, ya que el sistema de llenado fue mediante la quema directa de incienso, haciendolo ventilar hacia la cámara de gas, para propagarla dentro de ella; en efecto esto resultó muy tedioso, ya que varias veces se apagaba, o simplemente no se tenía un grado de saturación convincente para la toma de las muestras, lo que este proceso fue un poco más complicado, lo que ocasionó una mayor desviación estándar en los resultados, sin embargo se lograron obtener satisfactoriamente los datos necesarios para su análisis. La problemática antes mencionada se puede mejorar proponiendo un diseño electrónico generador de humo de incienso controlado con un ventilador más grande y un área de quema mayor que permita generar mayor cantidad de humo.

En resumen, las muestras de neblina resultaron bastante más fáciles, debido a la utilización del humidificador, por ende las razones de los coeficientes tienen un patrón más estable (veáse gráfico V.6), a diferencia de la razón de el incienso (veáse gráfico V.7), donde claramente se puede visualizar que las razones se disparan para

---

algunas longitudes y se mantienen para otras. Sin embargo, cabe recalcar que a pesar de los métodos de llenado utilizados, los resultados obtenidos realmente se apegan a lo esperado, es decir, se logra aún apreciar que las razones se mantienen constantes al variar la longitud de la celda.

### **6.0.3 Sobre los resultados**

De manera generalizada se puede concluir que los resultados fueron satisfactorios, desde el punto de vista del funcionamiento del sistema LIDAR, hasta el uso de la técnica de Detección sensible a fase, pues se demostró que la señal de retorno LIDAR se puede analizar mediante ésta técnica de medición, con ayuda del muestreo de base de tiempo equivalente-secuencial (SETS) del mismo LIDAR, ofreciendo muchas ventajas a la hora de captar la señal retrodispersada.

Además de que dichos resultados fueron respaldados en forma teórica para concluir que la razón de los coeficientes de Fourier no depende de la longitud de la cámara, sino que se mantiene oscilando en un valor constante aproximado en 1.5 v. Finalmente, podemos concluir que el valor promedio de R nos da una indicación del tamaño de la partícula que compone al medio dispersor, ya que para la niebla se encontró un valor promedio de 1.4988 y para el incienso un valor 1.6661. Quedando como trabajo a futuro ahondar en este punto la repetición del trabajo de esta tesis con más muestras.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cascante-Vindas J., Diez A. and Andres, M.V. (2010). Conference:2010 IEEE CONCAPAN XXX.Estado del arte, avances y aplicaciones de las fuentes láser de amplio espectro. DOI: 10.13140/RG.2.1.1614.8881.
- [2] Galván-Pineda S. (2014).El sistema lidar aplicado a la geomática, generando modelos digitales de elevación (MDE) (Tesis de pregrado).UNAM, México, DF.
- [3] Wandinger U., (2005), Introduction to Lidar. En Weitkamp C. (Ed.), Lidar, Range Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere (pp. 1-18) Leipzig, Germany. Springer.
- [4] Vosselman, G. (2017). Lasser Scanning. En Shekhar S., Xiong H.(Ed.), Encyclopedia of GIS (1, 116-119) Shekhar S., Xiong H., Springer, DOI 10.1007/978-3-319-17885-1.
- [5] François Nicolas, Luc R. Bissonnette, and Pierre H. Flamant, "Lidar effective multiple-scattering coefficients in cirrus clouds," Appl. Opt. 36, 3458-3468 (1997)
- [6] Gómez, A., Octubre 2014. MATLAB modeling of a differential absorption LiDAR for the remote detection of contaminants, (Tesis de pregrado), Cantabria España.
- [7] Meade, M.(1983). Lock-in amplifiers : principles and applications Londres UK: Peter Peregrinus Ltd.
- [8] Karen Wear. (2001). Coleccion de neblina, principios y aplicaciones. 2019, de Donaldson Filtration Solution Sitio web: <https://www.donaldson.com>

[9]Reynoso, E., Dávila, J., Hernández, N., Rendon, M., Serrano, G., Ramirez, G. Lima, E. G. Construcción de un Lidar Monoestático coaxial de retrodispersión elástica en México para el monitoreo ambiental. REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA, (2011). 20, 7-9.

[10] P.B Lathi. (2001). Introducción a la teoría y sistemas de comunicación. México D.F., Limusa.

[11] Hwei P. Hsu. (1970). Fourier Analysis. Nueva York, Prentice Hall.

[12] National Instruments. (2011). Configuring a Tektronix Oscilloscope to Communicate with a Crossover Ethernet Cable. Abril 2019, de National Instruments Sitio web: <http://www.ni.com/tutorial/7301/en/>

[13] Stanford Research Systems. (2013). MODEL SR530 Lock-in Amplifier. California, Estados Unidos: SRS.



## APÉNDICE A: OSLRF-01

El OSLRF-01 es un sensor de "metal desnudo" de tiempo de vuelo que forma la parte frontal de un sistema de telémetro láser. Se ejecuta de forma autónoma, cuando se aplica energía y produce señales eléctricas que se pueden analizar para determinar el tiempo que tarda un láser en viajar de la unidad, a una superficie y viceversa. El OSLRF-01 resuelve los problemas de ingeniería más críticos que enfrentan los diseñadores cuando realizan un telémetro láser de tiempo de vuelo. Estas son:

1. El láser debe "dispararse" utilizando un pulso de corriente muy corto de decenas de amperios y los componentes del controlador de alta velocidad deben estar blindado para evitar fugas ópticas y electrónicas que de otro modo interferirían con el detector y enmascararían la señal de retorno.

2. El detector debe captar la señal de retorno muy débil y amplificarla a un nivel muy por encima de cualquier ruido de fondo.

La amplificación se realiza utilizando amplificadores de alta velocidad que son caros y consumen mucha energía.

3. El tiempo entre el pulso del láser saliente y la señal de retorno debe medirse con una precisión muy alta para calcular la distancia. Se necesitarían velocidades de reloj de 15 GHz en un temporizador capaz de una resolución de 1 cm y esto no es práctico.

4. La óptica de colimación para el haz láser saliente y la óptica de recolección para

la señal de retorno son necesarias para que el sistema funcione sobre un rango razonable.

El OSLRF-01 consta de un láser, fotodiodo, óptica, amplificadores y circuitos de muestreo de base de tiempo equivalente-secuencial (SETS). Estos componentes trabajan juntos para crear señales que son fáciles de analizar, se han amplificado y ralentizado en un modo manejable base de tiempo. Las señales de salida del OSLRF-01 incluyen el pulso del láser saliente, la señal de retorno y varias referencias de temporización.



Figura A.1: Identificación del producto y etiquetas de seguridad.

## DIAGRAMA A BLOQUES

El siguiente diagrama de bloques muestra las funciones principales dentro del OSLRF-01. El láser es disparado por la lógica de control y el láser saliente. El pulso se muestrea utilizando un muestreo secuencial equivalente en tiempo (SETS). Este proceso convierte la señal de alta velocidad en una más lenta. La base de tiempo y esta señal ralentizada son visibles en el pin de salida "Zero". La salida óptica del láser es colimada en un estrecho lente y el flash láser se proyectan sobre una superficie objetivo a cierta distancia frente al OSLRF-01. El flash láser se desplaza a la velocidad de la luz hacia la superficie y parte de él se refleja en la lente del receptor que enfoca la luz en un fotodiodo. El fotodiodo produce un pulso de corriente muy breve que debe amplificarse antes de poder utilizarlo. La primera etapa de la amplificación se realiza mediante un amplificador de transimpedancia (TIA) que convierte la señal actual en una voltaje. Este voltaje se somete a SETS de la misma manera que el pulso del láser saliente, y el resultado es muy pequeño pero lento. Versión escalada de la señal de retorno. Esta señal se amplifica y se pone a disposición en el pin de salida "Return".

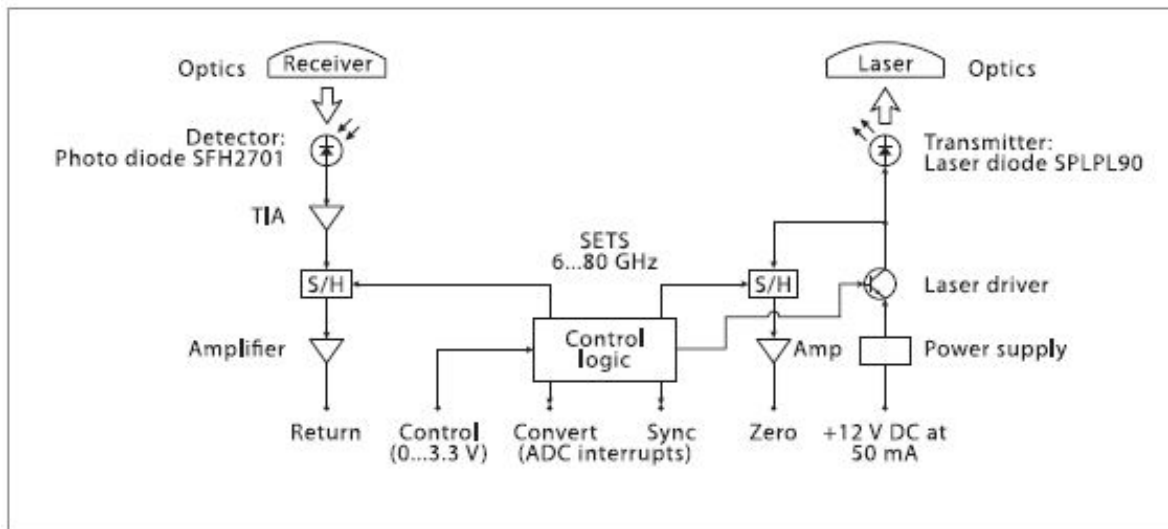


Figura A.2: Diagrama a bloques del OSLRF-01.

## INFORMACIÓN GENERAL

| Especificación             | Valor             | Notas                                |
|----------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Longitud de onda           | 850 nm            | Estimulada                           |
| Tamaño del pulso           | < 30 ns           |                                      |
| Frecuencia del pulso       | < 16 kHz          |                                      |
| Valor pico                 | < 10 W / 15.96 W  | 50 mm aperture at 2 m                |
| Energía promedio           | <0.6 mW / 0.78 mW | 7 mm aperture                        |
| Energía promedio por pulso | <0.15 nJ / 200 nJ |                                      |
| NOHD                       | <15 m             | Distancia de prismáticos son seguros |

Tabla A.1: Tabla sobre la información de la radiación del láser.

## DIMENSIONES

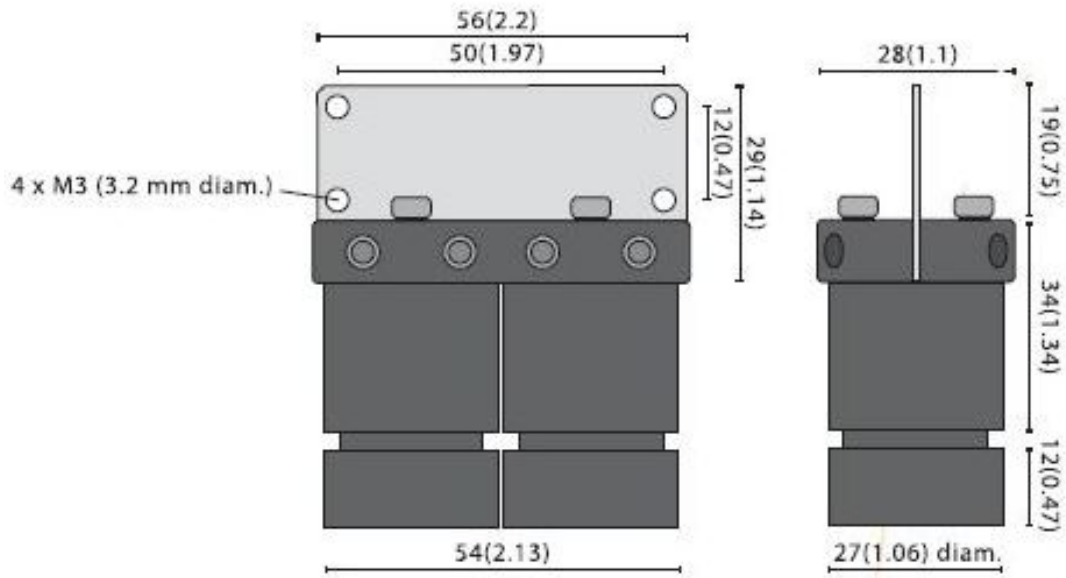


Figura A.3: Dibujo de las dimensiones con unidades en milímetros.

# ANEXO B

## APÉNDICE B: SR-530

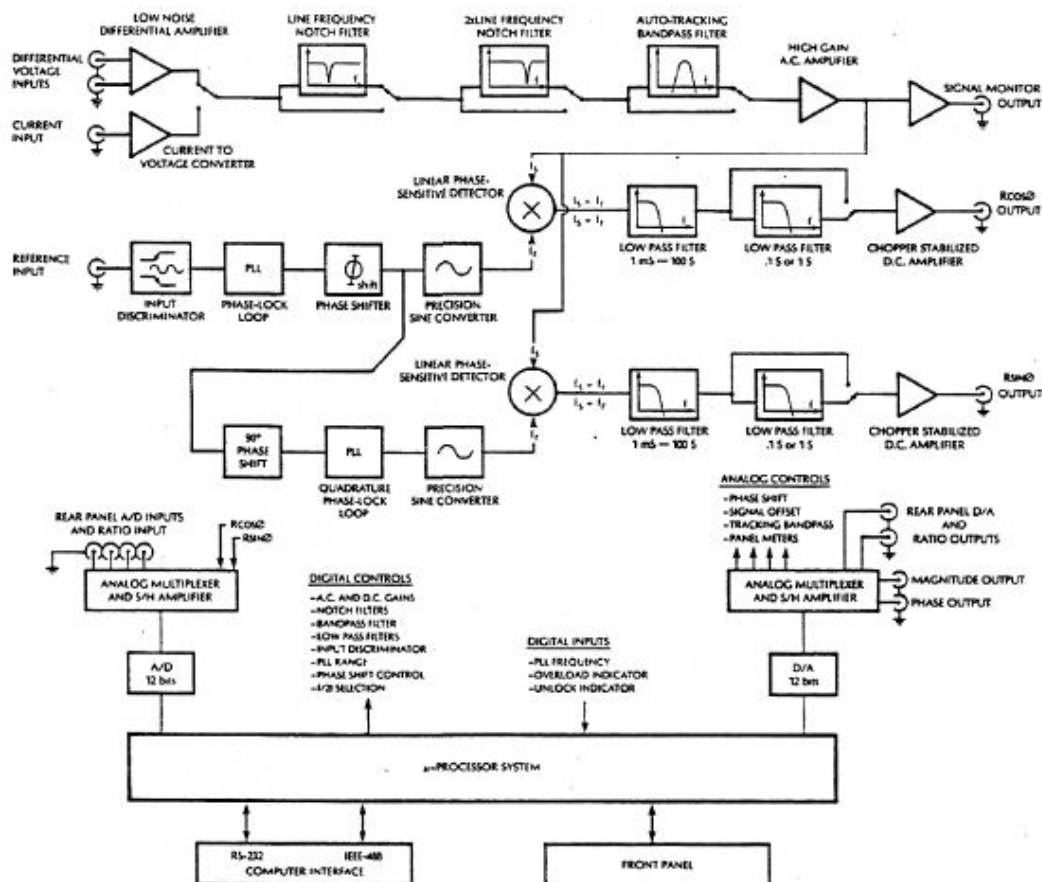


Figura B.1: Diagrama a bloques del Amplificador Lock-in SR-530 [13].

## RESUMEN DE ESPECIFICACIONES

| Señal                   | Parámetro                             | Descripción                   |
|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| Entrada                 | voltage                               | Simple o diferencial          |
|                         | corriente                             | $10^6 \text{Volts/Amps}$      |
| Impedancia              | voltage                               | 100 M + 25 pF                 |
|                         | Corriente                             | 1 k $\Omega$ a tierra virtual |
| Sensitividad            | voltage                               | 100 nV-a 500 mV               |
|                         | corriente                             | 100 fA a 0.5 A                |
| Entradas máximas        | voltage                               | 100 VDC,                      |
|                         | corriente                             | 10 mA umbral de daño          |
| Ruido                   | voltage                               | 7 nV/Hz at 1 kHz              |
|                         | corriente                             | 0.13 pA/ Hz at 1 kHz          |
| Precisión de ganancia   | 1% (2 Hz to 100KHz)                   |                               |
| Estabilidad de ganancia | 200 ppm/ $^{\circ}$ C                 |                               |
| Filtros                 | 60 Hz, -50 dB (Q=10, de 45-65 Hz)     |                               |
|                         | 120 Hz, -50 dB (Q=10, de 100-130 Hz)) |                               |
|                         | la banda de paso en 1%, (Q = 5)       |                               |
| Reserva dinámica        | 20 dB LW (1 V-500 mV)                 |                               |
|                         | 40 dB NORM (100 nV-50 mV )            |                               |
|                         | 60 dB HIGH (100 nV-5 mV )             |                               |

## DEMODULADOR

| Señal               | Parámetro   |
|---------------------|---|
| Estabilidad         | 5 ppm/ $^{\circ}$ C on LOW reserva dinámica             |
|                     | 50 ppm/ $^{\circ}$ C on NORM reserva diámica            |
|                     | 500 ppm/ $^{\circ}$ C on HIGH reserva dinámica          |
| Constante de tiempo | Pre: de 1 ms a 100 seg (6 dB / Octava)                  |
|                     | Post: 1 seg, 0.1 seg, ninguno (6 dB / Octava) o ninguno |
| Offset              | Hasta 1X escala completa (10X en expandir)              |
| Reloj armónico      | -55 dB (filtro pasabandas)                              |

---

## CANAL DE REFERENCIA

| Parámetro             | Descripción   |
|-----------------------|---|
| Frecuencia            | 0.5 Hz a 100 kHz  |
| Impedancia de entrada | 1 M $\Omega$ , ac acoplado  |
| Trigger               | sine: 100 mV mínimo, 1Vrms nominal<br>pulso: $\pm 1$ Volt, 1 4 $\mu$ seg ancho mínimo |
| Modo                  | Fundamental (f) o segundo armónico (2f)   |
| Tiempo de adquisición | 25 Seg a 1 Hz<br>6 Seg a 10 Hz<br>2 Seg a 10 kHz                                      |
| Velocidad de subida   | 1 década por 10 S a 1 kHz   |
| Control de Fase       | Turnos de 90°<br>Cambios finos en pasos de 0.025°                                     |
| Fase de ruido         | 0.01° rms at 1 kHz, 100 msec, 12 dB TC  |
| Fase derivada         | 0.1°/°C   |
| Error de fase         | Menos de 1° por encima de 10Hz  |
| Ortogonalidad         | 90° $\pm$ 1°  |

## CONFIGURACIÓN DE INTERRUPTORES

Hay dos bancos de 8 interruptores, SW1 y SW2, ubicado en el panel posterior. SW1 establece el Dirección GPIB y SW2 establece el RS232. parámetros. Se leen los interruptores de configuración Continuamente y cualquier cambio será efectivo inmediatamente.

### Configuración SW2: Modo RS232

| Bit1        | Bit2        | Bit3        | Velocidad en Baudios |
|-------------|-------------|-------------|----------------------|
| activado    | activado    | activado    | 19200                |
| desactivado | activado    | activado    | 9600                 |
| activado    | desactivado | activado    | 4800                 |
| desactivado | desactivado | activado    | 2400                 |
| activado    | activado    | desactivado | 1200                 |
| desactivado | activado    | desactivado | 600                  |
| activado    | desactivado | desactivado | 300                  |

| Bit | Ajuste      | Explicación        |
|-----|-------------|--------------------|
| 4   | activado    | paridad impar      |
|     | desactivado | incluso paridad    |
| 5   | activado    | sin paridad        |
|     | desactivado | paridad habilitada |
| 6   | activado    | sin eco            |
|     | desactivado | Modo eco           |
| 7   | activado    | 2 bits de parada   |
|     | desactivado | 1 bit de parada    |
| 8   | activado    | no usado           |

Ocho bits de datos se envían siempre, independientemente del ajuste de la paridad. El bit más significativo es siempre cero.

Ejemplo: Bit 1 'abajo' y todos los demás 'arriba' para Comunicación RS232 a 9600 baudios, sin paridad, dos bits de parada, y no hay eco o indicaciones por el SR530.



## APÉNDICE C: CONVERTIDOR RS-232 A USB

Los cables adaptadores USB-RS232 son una familia de dispositivos de comunicación. Este modelo, US232R, proporciona un método simple para adaptar dispositivos seriales heredados con interfaces RS232 a puertos USB modernos. Cada adaptador US232R contiene una pequeña placa de circuito electrónico interno que utiliza el FTDI FT232R, montado dentro de una carcasa de plástico resistente capaz de soportar rangos de temperatura industrial.

La electrónica integrada también incluye cambiadores de nivel RS232 y LED TXD / RXD para proporcionar una indicación visual del tráfico de datos a través del adaptador.

El cable incorpora un conector de dispositivo USB-A estándar para la conexión a un host o concentrador ascendente. Las señales de nivel RS232, incluidas las señales de protocolo de enlace de módem, están disponibles en un estándar de la industria Conector DE-9P. La velocidad máxima de datos de nivel RS232 es de 1 MBaud.

El cable adaptador US232R requiere controladores de dispositivos USB, disponibles gratuitamente desde FTDI, que se utilizan para hacer El US232R aparece como un puerto COM virtual (VCP). Esto permite el software de comunicaciones en serie existente, como HyperTerminal, para intercambiar datos a través del US232R a un dispositivo periférico RS232 heredado.

DIAGRAMA A BLOQUES

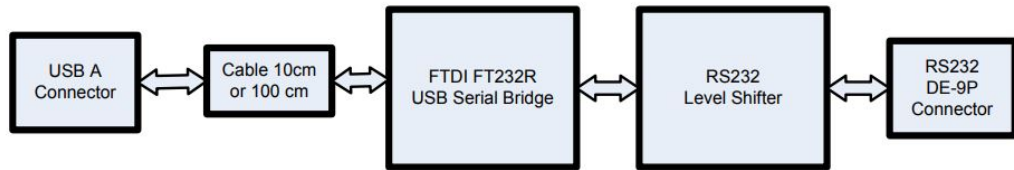


Figura C.1: Se muestra el diagrama de conversión RS-232 a USB.

### RENDIMIENTO

| Parametro       | Descripción  |
|-----------------|--|
| Interface USB   | 12Mbps USB 2.0 velocidad máx.  |
| Interface RS232 | Velocidad de transmisión estándar de Windows (300bps a 921.6Kbps) Velocidades de transmisión personalizadas (300bps a 1Mbps) mediante alias de velocidad de transmisión. Ver Nota de aplicación FTDI: Configuración de FT232R, FT2232 y FT232BM en baudios Tarifas |

### PINES DE SALIDA

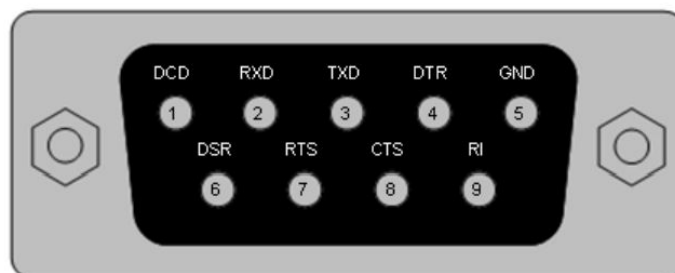


Figura C.2: Pines de salida enumeradas del conector DB9.

---

| Pin | Nombre | Tipo   | Descripción                               |
|-----|--------|--------|---|
| 1   | DCD    | Input  | Entrada de control                        |
| 2   | RXDATA | Input  | Entrada de datos asíncronos.              |
| 3   | TXDATA | Output | Salida de datos asíncronos.               |
| 4   | DTR    | Output | Terminal de datos                         |
| 5   | GND    | Gnd    | Dispositivo de alimentación               |
| 6   | DSR    | Input  | Entrada de control                        |
| 7   | RTS    | Output | Solicitud de envío                        |
| 8   | CTS    | Input  | Borrar para enviar entrada de control     |
| 9   | RI     | Input  | Entrada de control de indicador de anillo |





## APÉNDICE D: MANUAL DE USUARIO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y CONTROL

Este software multitareas, desarrollado bajo la plataforma de cómputo numérico Matlab v2015b, está diseñado con el propósito de controlar de forma remota al Lock-in SR530, lo cual además de permitir modificar parámetros específicos, tales como: la activación de los filtros, cambiar la forma de adquisición de la información, sensibilidad, configuración de el número de muestras y almacenar los datos en distintas extensiones de archivo en tiempo real, permite visualizar la captura de los coeficientes y su respectivo procesamiento en forma gráfica; lo anteriormente mencionado provee grandes ventajas a la hora de la realización del experimento, pues ésto nos permite un monitoreo; tal como verificar el comportamiento de los coeficientes de Fourier en todo el proceso de la caracterización del gas, incluso el experimentador puede percatarse sobre alguna falla en el sistema, pudiendo reiniciar o hasta cancelar la toma de muestras en cualquier instante que así se requiera, permitiendo un mayor control sobre el estado de la adquisición de la información.

### REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Sistema operativo Windows (Seven o superior)

Tipo de sistema preferentemente 32 bits

Matlab instalado (2015b o superior)

CD-R con el software (disponible en la contraportada de éste trabajo)

Un convertidor RS-232 a USB

## ANEXO D. APÉNDICE D: MANUAL DE USUARIO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y CONTROL

Tener a la mano los apéndices A,B y C, para cualquier consulta técnica.

### CONOCIENDO LA PLATAFORMA PRINCIPAL



Figura D.1: Pantalla principal del software desarrollado para adquisición de datos.

### PUESTA EN MARCHA

Inicialmente se requiere que Matlab esté instalado y en correcto funcionamiento y que se haya conectado de forma correcta el cable convertidor RS-232 a USB, sin dejar de mencionar la importancia del capítulo 4, para la configuración del resto de los elementos que conforman el sistema LIDAR de laboratorio, de suma importancia, tales como: la configuración del switch 2 del Lock-in y las señales tanto de retorno como la de referencia. Una vez verificado la configuración física, se procede a la puesta en marcha del software. Inicialice Matlab

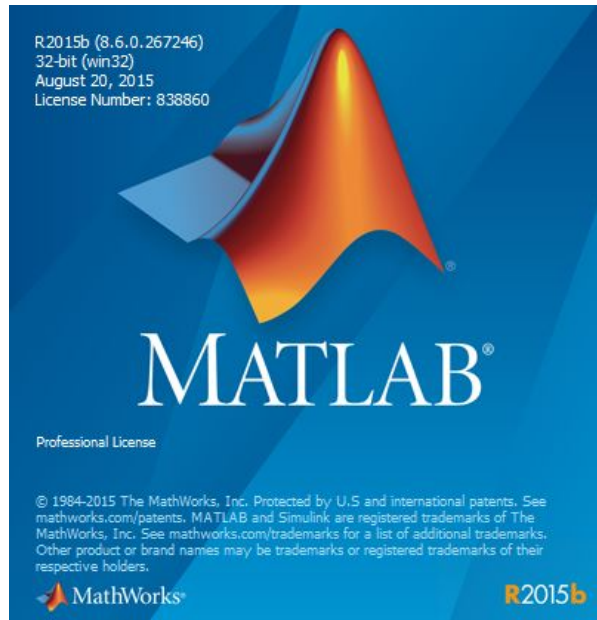


Figura D.2: Ventana de inicialización de Matlab.

Se abrirá Matlab en una nueva ventana

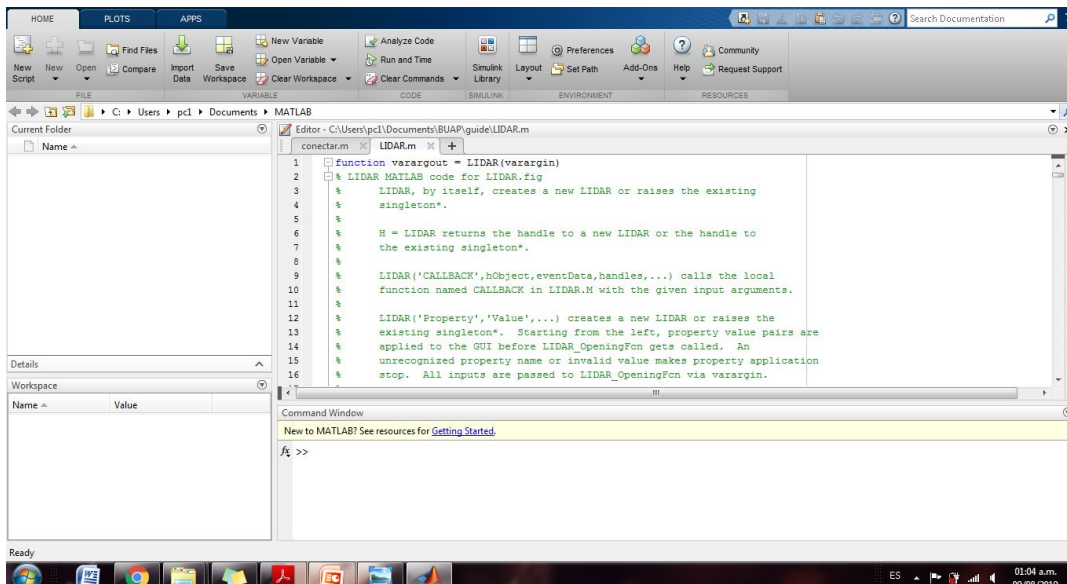


Figura D.3: Plataforma inicial de Matlab.

Dirijase a la cinta de opciones, que se encuentra en la parte superior izquierda, para seleccionar el directorio del software; en la opción archivo y Abrir, posteriormente seleccione el CD-R, y elija el archivo denominado "lidar.m"

## ANEXO D. APÉNDICE D: MANUAL DE USUARIO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y CONTROL

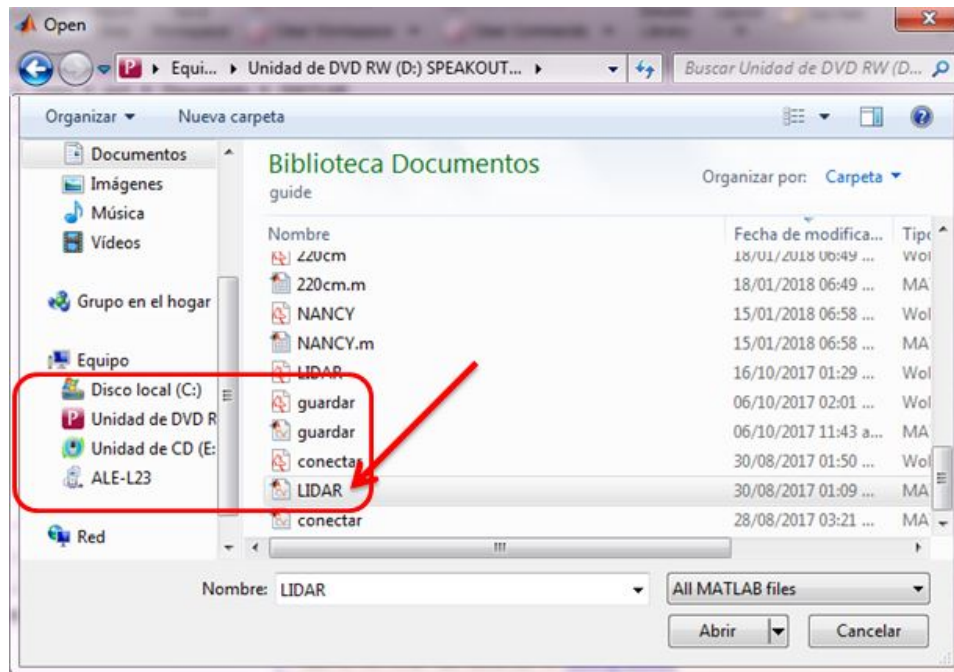


Figura D.4: Selecciona lidar.m

Una vez abierto el archivo, ejecute el Guide, dando click en la opción "Run and Time"

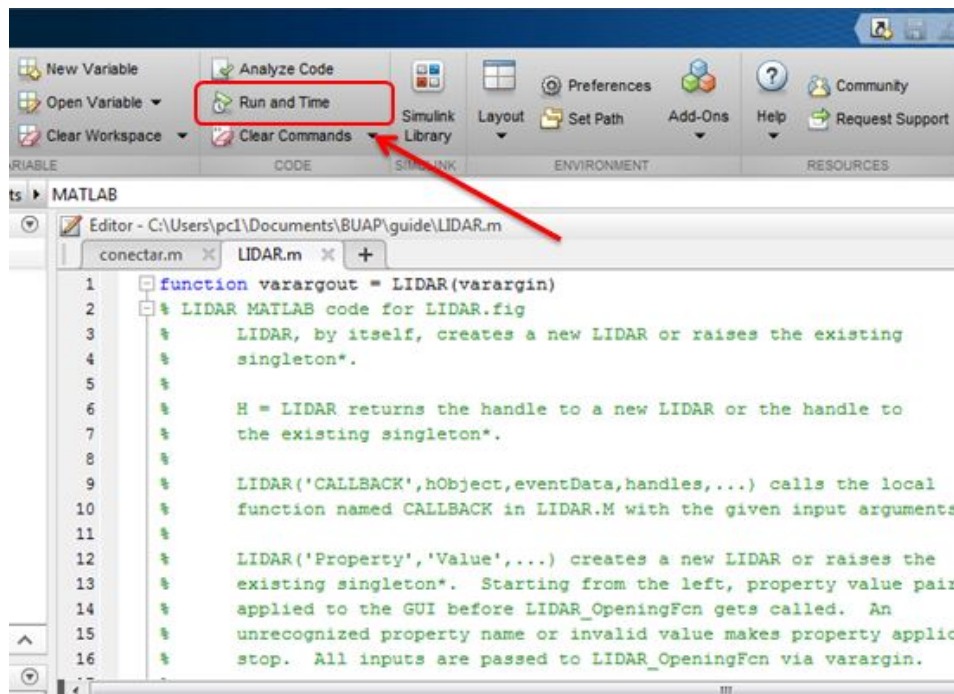


Figura D.5: Inicia la ejecución del programa.

Aparecerá una nueva ventana, como la que se muestra a continuación.

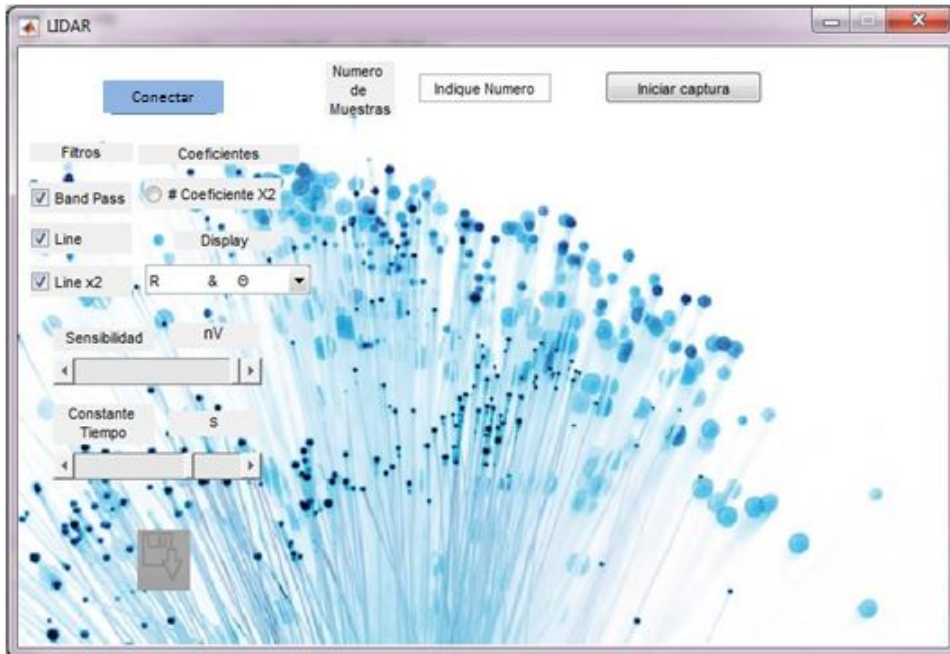


Figura D.6: Sistema de adquisición y control.

Establezca la comunicación entre el Lock-in y la computadora, seleccionando el botón "conectar", que se encuentra en la parte superior izquierda.

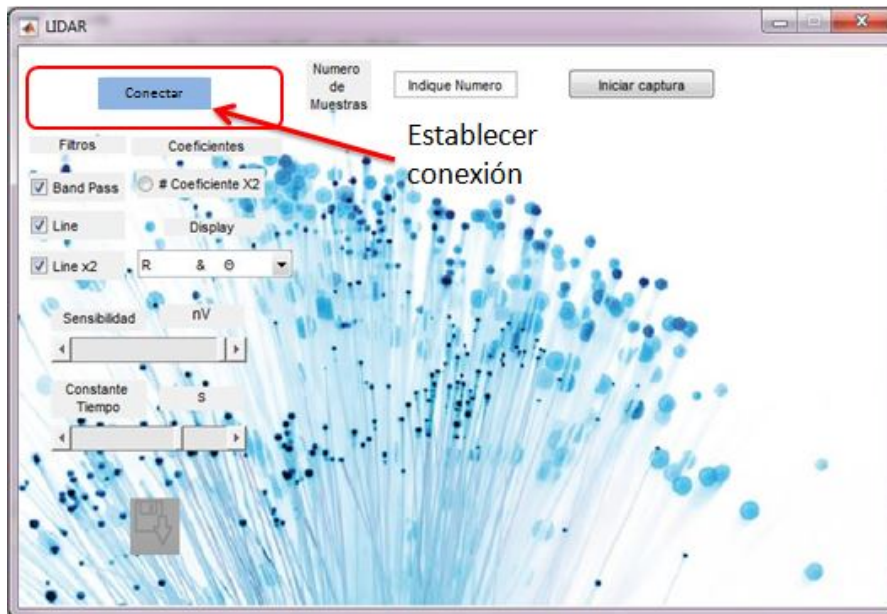


Figura D.7: Iniciando la comunicación entre la computadora y el SR530.

Se abrirá una nueva ventana, configure los parámetros de enlace, tal y como se muestra en la siguiente figura.

## ANEXO D. APÉNDICE D: MANUAL DE USUARIO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y CONTROL

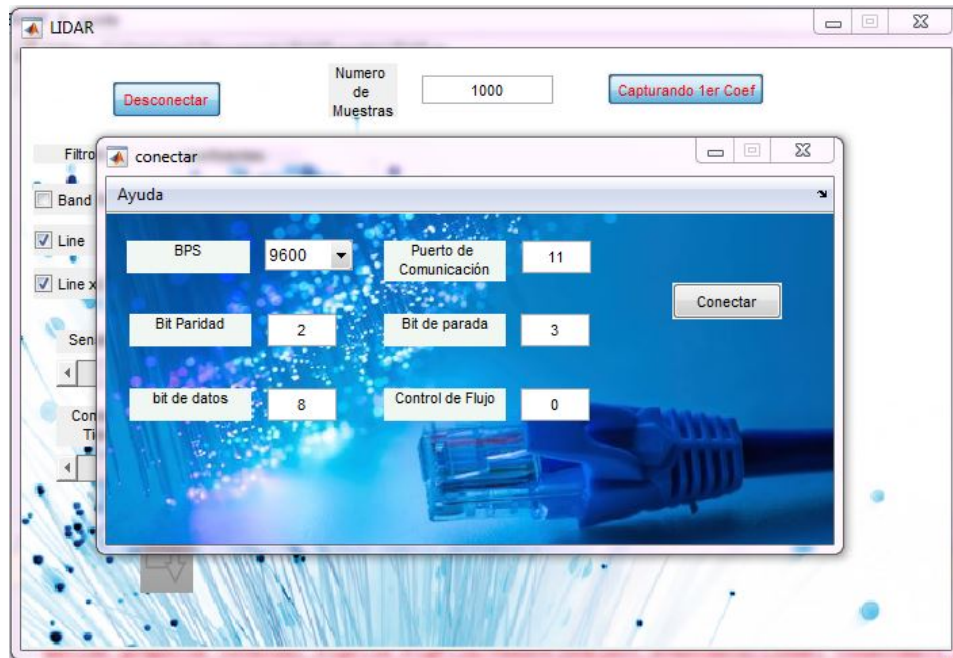


Figura D.8: Parámetros de configuración para establecer la comunicación entre el software y el hardware.

Aparecerá una ventana pop-up, para notificarle que se ha establecido la comunicación con éxito, y ahora estamos listos para poder controlar y realizar la adquisición de los datos del experimento, configure los parámetros de la plataforma principal tal y como se muestra en la imagen siguiente.



Figura D.9: Ventana principal del sistema de adquisición, donde se muestran habilitados los comandos de control.

Inicie la toma de muestras, clicando en la opción "Iniciar captura", verificando que

la opción "Coeficientes X1" se encuentre seleccionada, para adquirir el valor del primer coeficiente de Fourier y que la cámara de gas esté a su máxima saturación del gas utilizado y posteriormente cambie a "Coeficiente X2" para la toma del segundo coeficiente. Observe que la plataforma ofrece tres ventanas ancladas a la ventana principal, donde puede monitorear la captación de los datos en tiempo real para poder verificar la correcta ejecución del experimento.

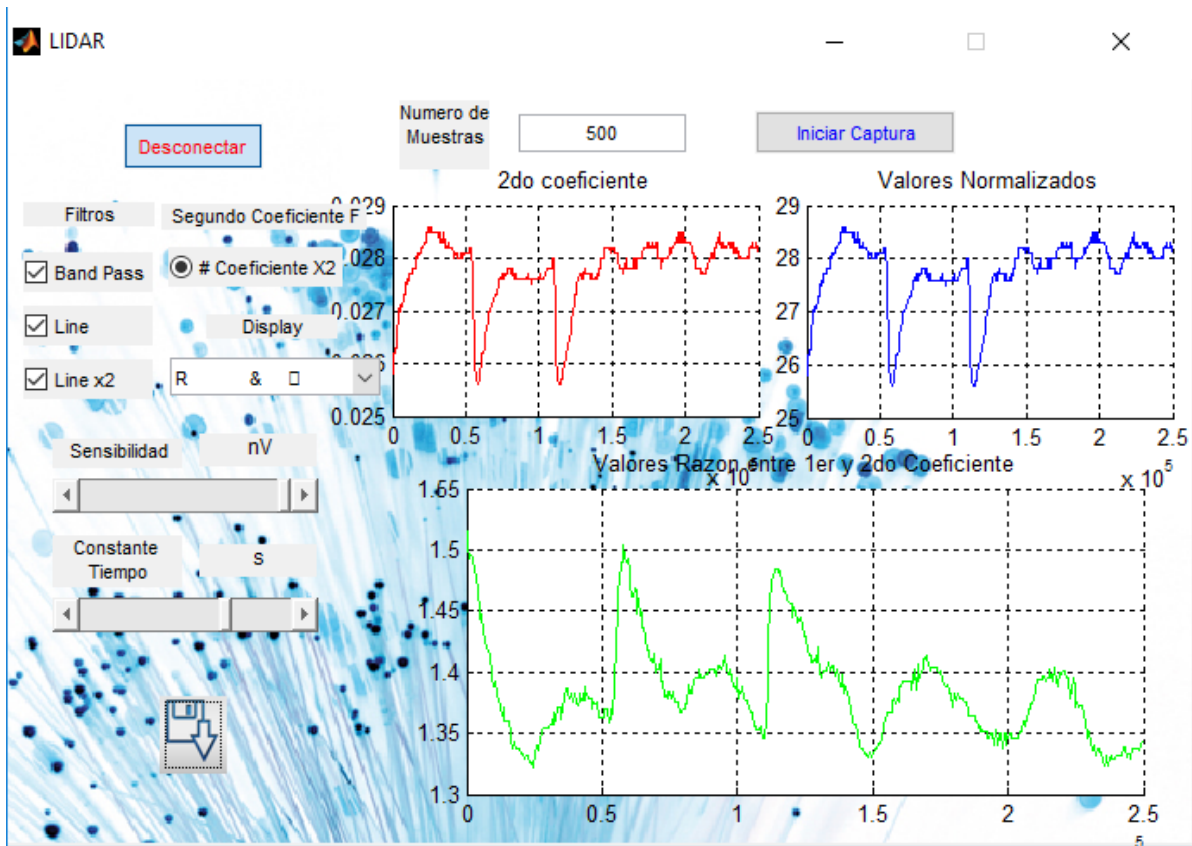


Figura D.10: Monitoreo de los coeficientes .

Verifique que los coeficientes se estabilicen en las gráficas, y en ese momento, usted está listo para respaldar los datos capturados. Seleccione el ícono de guardar, que se encuentra en la parte posterior izquierda de la ventana principal de captura, lo cual dará como resultado la obtención de una nueva ventana, configure el archivo con la asignación de un nombre, escoja los datos que desea respaldar (primero, segundo coeficiente y la razón ) y seleccione la extensión deseada, para posteriormente clicar en el botón de "Guardar"

## ANEXO D. APÉNDICE D: MANUAL DE USUARIO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y CONTROL



Figura D.11: Ventana de almacenamiento de la información.

Repita este proceso por cada ejecución del experimento, cuidando ser muy meticuloso a la hora de cambiar la longitud de la cámara de gas, y verificando constantemente que las tapas de la misma se encuentren completamente despejadas sin ninguna impureza o imperfecciones, que pueda alterar la señal del LIDAR.

Finalmente verifique que todas sus muestras se han guardado de forma correcta en el directorio seleccionado, de no ser así, repita el proceso de medición para dicha longitud.

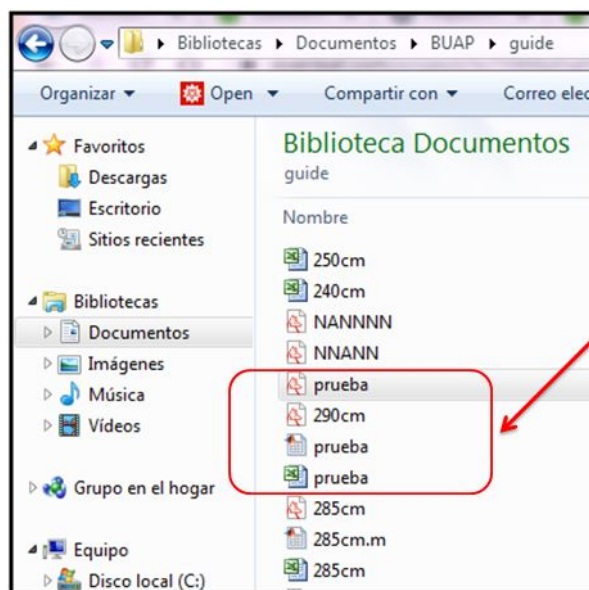


Figura D.12: En esta ventana se muestran tres diferentes tipos de extensiones(.xls, .m y .mat)para el archivo almacenado "prueba".