

CARACTERIZACIÓN OPTOELECTRÓNICA DE LA TURBULENCIA

Caracterización experimental de la turbulencia a grandes distancias horizontales y baja altura
mediante la técnica de Telescopía de Fourier

Omar Javier Tíjaro Rojas

Trabajo de grado para optar al título de Doctor en Ingenierías Área Ingeniería Electrónica.

Director

Yezid Torres Moreno

Dr. En Óptica y Tratamiento de la Señal

Codirectora

Ana Beatriz Ramírez Silva

PhD. In Electrical Engineering

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Doctor en Ingeniería Área Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A mi esposa y mis hijas, a pesar de no entender del todo lo que dice este libro, fueron mi apoyo, mi fuerza de voluntad y mi polo a tierra en cada paso que di.

A mis padres, que siempre me mantuvieron optimista, por escucharme en los momentos buenos y malos.

A mis hermanos, por todo lo que se han esforzado desde que salí de casa para ver realizar mis metas.

Agradecimientos

Principalmente a Dios, a quien he conocido en distintas facetas durante el camino de mi vida, y ha encaminado el apoyo espiritual recibido mediante oraciones de parte de mi familia y la energía que se proyecta a través de la fe que este ser emite.

A cada una de las personas que estuvieron pendientes del desarrollo de este proyecto, en especial a mis directores el Dr. Yezid Torres Moreno y la Dra. Ana Beatriz Ramírez Silva, quienes dieron sus puntos de vista en todo lo concerniente a la parte técnica, en algunos casos también en la parte administrativa y muchas veces en la parte personal.

Al apoyo dado por COLCIENCIAS en la convocatoria No.647 para apoyos a Doctorados Nacionales 2014, la cual fue fundamental para el sustento económico que necesitaba mi familia y a partir de este, cumplir esta meta. A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE-UIS) por el apoyo mediante el Proyecto N° 8811: Uso de la telescopía de Fourier de tiempo promedio para caracterizar la turbulencia horizontal a baja altura, el cual fue fundamental para la adquisición de los elementos que utilicé en mi tesis, adicionalmente por el apoyo en cada una de las fases al programa de doctorado.

A cada uno de los integrantes del Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS), a los profesores Jaime Enrique Meneses F., Arturo Plata, Rafael Ángel Torres A. quienes en cada una de sus discusiones me enseñaron a entender un poco más el mundo en el que estaba desarrollando esta tesis. De la misma manera, cada uno de los compañeros estudiantes también que en cada seminario o en las discusiones tomando café daban un aporte interesante al desarrollo de esta tesis. Entre ellos Jesús Hernán Mendoza, Alexander Ballesteros, Paula Andrea López, Zayda Paola Reyes, Carolina Mendoza, Carlos Alberto Chacón quienes hoy en día son Magíster o están en el

camino para ser Doctores y los estudiantes de pregrado, hoy ingenieros, que siguieron este proyecto y que con cada grano aportaron para avanzar y realizar las mediciones, entre ellos Jhonny Villamizar, Manuel Fernando Herreño, Jhonatan Steven Hernández, Jesús Omar Rincón, Juan Carlos López, Sergio Enrique Reyes, Wilson Yulian Pinzón, Andrés Vásquez, a los estudiantes de física Erick Muñoz y William Gutiérrez, al ingeniero Hernán Buenahora y al Magíster Yuber Galeano.

A cada una de las personas que me dieron acceso en el Parque Tecnológico Guatiguará, al profesor Carlos Alberto Ríos por el apoyo al espacio en el laboratorio de microscopía EDI 102, al personal de coordinación, apoyo y seguridad.

Al profesor Michel Fracés, por ser mi amigo y consejero durante mi pasantía y después de ella, pues ha sido agradable poder contar con su apoyo profesional y personal.

Al profesor William T. Rhodes y la profesora Angela Guzmán quienes me han colaborado en cada momento, han sido los impulsores y motivadores en cada idea propuesta.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	19
1. Objetivos	22
1.1 Objetivo General	22
1.2 Objetivos Específicos.....	22
2. Marco Teórico	23
2.1 Caracterización de la turbulencia	24
2.2 El láser y sus efectos	28
2.3 La Telescopía de Fourier.....	29
2.4 Desenvolvimiento de fase	32
2.5 Técnicas Implementadas	34
2.5.1 Simulaciones	37
3. Metodología	39
3.1 Diagrama experimental	40
3.2 Caracterización del láser	43
3.3 Adquisición de señales temporales	47
3.4 Diagrama de análisis de datos	49
4. Resultados	51
4.1 Caracterización para el movimiento intracavidad.....	52
4.2 Implementación de experimentos en campo	57

4.2.1 Medición de distancia.	60
4.3 Simulaciones y primeras pruebas en laboratorio	66
4.4 Ejecución de experimentos en campo	76
5. Conclusiones	90
6. Recomendaciones.....	93
Referencias Bibliográficas	100
Apéndices.....	109

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Tecnología utilizada en la implementación	48
Tabla 2. Configuraciones experimentales implementadas en campo.	65
Tabla 3. Variables dadas por los equipos tomadas para la simulación.	66
Tabla 4. Variables físicas del ambiente medidas durante las pruebas.	81
Tabla 5. Parámetros de turbulencia calculados.	82
Tabla 6. Desviaciones de fase estimadas y simuladas a partir de las distancias y C_n^2 encontrados.	85

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Cascadas de turbulencia descritas por Kolmogorov. Donde l_0 y L_0 indican los tamaños de escala límite de las celdas turbulentas que intervienen en la transferencia de energía. Fuente: (Jurado Navas, 2009).	24
Figura 2. Efectos ópticos de la atmósfera. a) Medio ideal sin atmósfera. b) Cambios en primer orden del índice de refracción. c) y d) Cambios en segundo orden en el índice de refracción que producen el efecto del centelleo. Fuente: (Labeyrie et al., 2006).	26
Figura 3. Diagrama experimental para calcular el ángulo de incidencia a la recepción de α . Fuente: (Consortini et al., 2003).	27
Figura 4. Iluminación del objetivo moviendo patrones senoidales con diferentes periodos y orientaciones. Fuente: (Rhodes, 2012).	30
Figura 5. Fase discontinua: (a) De una sección de una imagen de franjas de Young; (b) Fracción de un perfil horizontal de la imagen en (a). Fuente: (Ballesteros, 2019).	33
Figura 6. (a) Imagen de fase desenvuelta; (b) Perfil de fase desenvuelta en un corte al centro. ..	33
Figura 7. a) Elementos básicos del microscopio DEEP (del inglés “Doppler Encoded Excitation Patterning”): Se utiliza iluminación con dispositivos acústico-ópticos produciendo franjas de interferencia a distintas frecuencias espaciales en paralelo. b) Representación de la amplitud y fase en el plano de Fourier de la frecuencia espacial de las franjas adquirida por un detector de alta velocidad. Fuente: (Feldkhun & Wagner, 2010).	34

Figura 8. Diagrama experimental de PDI (Point Diffraction Interferometer). Fuente: (J. Millerd et al., 2005). 35

Figura 9. Vista lateral de montaje experimental implementado en la referencia (Augustine & Chetty, 2014). Fuente: (Augustine & Chetty, 2014)..... 35

Figura 10. Diagrama experimental implementado por Funes. Fuente: (Funes & Garavaglia, 2011). 36

Figura 11. Diagrama experimental del interferómetro de Young a través de un modulador acústico-óptico. BS: Divisor de Haz. M#: Espejo #. AOM: Modulador acústico-óptico. PMT: Tubo foto multiplicador. ADC: Conversor Analógico a Digital. S: Distancia de Separación entre espejos. L: Distancia de separación entre fuente y objetivo. P_{fr} : Periodo de las franjas. 40

Figura 12. Diagrama de un modulador acústico-óptico. Fuente (Neos Technologies, 2006). 41

Figura 13. Movimiento de las franjas de interferencia dadas por el modulador acústico-óptico acompañado por la intensidad medida en el PMT: (a) Mayor paso; (b) Paso parcial; (c) Paso más bajo; respecto al tiempo. 42

Figura 14. Reconstrucción temporal de la onda eléctrica incluyendo la turbulencia: (a) Ilustración del fenómeno. (b) Señal transducida por el PMT. 42

Figura 15. Descripción del fenómeno del bandeo intracavidad en el esquema base del interferómetro de Young. (a) Esquema general. (b) Descripción a la altura del divisor de haz. (c) Interacción con los espejos M1 y M2. (d) Efecto de la llegada en el plano objeto. 44

Figura 16. Esquema experimental de caracterización del movimiento intracavidad del láser. Fuente: (Tíjaro et al., 2019). 47

Figura 17. Diagrama de bloques del procesamiento de la señal. 50

Figura 18. Representación del comportamiento del movimiento intracavidad en Láser no estabilizado (de la Figura 16). Realización: (a) 32 (b) 45 (c) 59 (d) 83. (e) Amplitudes y (f) Frecuencias, de las fundamentales detectadas. 54

Figura 19. Representación del comportamiento del movimiento intracavidad en el Láser estabilizado. Realización: (a) 2 (b) 25 (c) Amplitudes y (d) Frecuencias, fundamentales detectadas. 55

Figura 20. Implementación en campo (de la Figura 11). (a) Fuente y montaje óptico. (b) Detector y sensores. (c) Vista horizontal PMT y montaje completo de detección. AOM: Modulador Acústico-Óptico, BS: Divisor de haz, M1: Espejo 1. PMT: Tubo fotomultiplicador. 58

Figura 21. Desplazamiento de la red de Ronchi y del haz que viene de M1. 60

Figura 22. Limitaciones dadas por la vegetación. 60

Figura 23. Configuración de la cámara para medidas de distancia. 61

Figura 24. Estimación de la medida de la distancia. Los órdenes hacen referencia al fenómeno descrito en AOM. 62

Figura 25. Imágenes de los patrones de franjas adquiridos a: (a) Distancia $L=30.88$ m, $S=12.5$ cm. (b) Distancia $L= 50.28$ m, $S=66.7$ m. (c) Distancia $L=133.89$ m, $S=69.5$ cm. 63

Figura 26. Perfil de franjas adquiridos a 133.88 m: (a) Perfil completo. (b) Zoom de (a) para observar su separación. (c) Representación en el espacio recíproco de la imagen de franjas completa. (d) Perfil de (c) en coordenada central horizontal. 64

Figura 27. Simulación de la técnica de desenvolvimiento de fase. Arriba: Señal. Abajo: Fluctuaciones de fase. 67

Figura 28. Simulación de la técnica de desenvolvimiento de fase a señales ruidosas. (a) Ruido aditivo. (b) Ruido multiplicativo. (c) Combinación de ruidos aditivo y multiplicativo. 69

Figura 29. Representación en dos dimensiones de las muestras adquiridas. La barra lateral describe la escala de tensión en Volts..... 69

Figura 30. Realización 5 de 140 adquirida del PMT. (a) Representación completa de la señal. (b) Acercamiento a los primeros 10 ns..... 70

Figura 31. Detección calculada. (a) Frecuencia fundamental. (b) Amplitud a la frecuencia fundamental..... 71

Figura 32. Fluctuaciones de fase al primer orden en la última realización..... 71

Figura 33. Valores por realización. (a) Fase promedio (Promedio global: -7.6×10^{-16} rad)..... 72

Figura 34. Configuración de las variables identificadas en el interferómetro de Young para modificar la función estructura de la fase. 73

Figura 35. Aplicación de la solución de la ecuación 30 a diferentes $C_n^2(0)$ 74

Figura 36. Cálculo de las fluctuaciones y sus desviaciones. (a) Fluctuaciones de primer orden. 75

Figura 37. Sensores utilizados. (a) Humedad relativa y temperatura. Fuente: (Measurement Specialties, 2008). (b) Presión. Fuente: (Honeywell, 2017). (c) Velocidad de flujo de aire. Fuente: (Honeywell, 2015). 76

Figura 38. Tarjetas implementadas para: (a) Sensor de presión. Fuente: (Pinzon Sierra, 2017). (b) Humedad relativa y temperatura. Fuente: (Reyes Aparicio & Vásquez Caicedo, 2018). (c) Tarjeta de comunicación entre los sensores y el sistema de desarrollo. Fuente: (Reyes Aparicio & Vásquez Caicedo, 2018). 77

Figura 39. (a) Sistema de desarrollo utilizado. Fuente: (STMicroelectronics, 2015). (b) Software implementado para pruebas. 77

Figura 40. Sistema de medición en campo. (a) En amarillo: Cámara instalada. En blanco: Lugar donde debía ser instalado el PMT por la desviación del primer orden de AOM. (b) Cámara

acoplada a tubo para evitar en lo posible ruido coloreado del sol (vista lateral). (c) Haces propagados a 47 m (antes de llegar a la cámara o en el proceso de alineación). (d) Los dos haces apuntando al sensor de la cámara (afinando su posicionamiento)..... 79

Figura 41. Parámetros de turbulencia calculados a una distancia de propagación de 30.88 m. (a) Parámetro estructura del índice de refracción C_n^2 . (b) Índice de Centelleo σ_1^2 . (c) Escala interna l_0 83

Figura 42. Parámetros de turbulencia calculados a una distancia de propagación de 50.28 m. (a) Parámetro estructura del índice de refracción C_n^2 . (b) Índice de Centelleo σ_1^2 . (c) Escala interna l_0 84

Figura 43. Parámetros de turbulencia calculados a una distancia de propagación de 133.89 m. . 85

Figura 44. Desviación de fase calculada a la distancia de: (a) 30.88 m. (b) 50.88 m. (c) 133.89 m. 87

Figura 45. Imágenes generadas a partir de software de simulación. (a) Espacio directo. (b) Espacio recíproco..... 88

Figura 46. Comparación entre las señales adquiridas: (a) Por simulación (FAU). (b) En experimento en campo. 89

Figura 47. Diagrama del proceso para el diseño del sistema óptico. 109

Figura 48. Diagrama del proceso para el diseño de los sistemas electrónicos. 109

Figura 49. Diagrama de transductores de cada dispositivo de sensor con sistema embebido 111

Figura 50. Diagrama de comunicación del sensor de velocidad de flujo. Fuente: (Hernández Quintero & Rincón Correa, 2016) 112

Figura 51. Diagrama de comunicación del sensor de humedad relativa. Fuente: (Herreño Vanegas & Villamizar Conde, 2016)..... 112

Figura 52. Circuitos diseñados para la medición de humedad relativa. a) Generador de frecuencia; b) Conversión de Frecuencia a tensión; c) Filtro pasa bajos. Fuente: (Herreño Vanegas & Villamizar Conde, 2016).....	113
Figura 53. Diagrama de flujo implementado en sistema embebido.....	113
Figura 54. Diagrama para diseño de circuito de polarización eléctrica. Fuente: (Hamamatsu Photonics K. K., 2013).....	114
Figura 55. Diagrama de flujo de procesamiento después de adquiridos los datos.	115

Lista de Apéndices

Apéndice A. Procesos, sistemas implementados y diagramas.....	109
Apéndice B. Characterizing horizontal atmospheric turbulence from air velocity in an optical turbulence generator.....	117
Apéndice C. Atmospheric Characterization Based on Relative Humidity Control at Optical Turbulence Generator	113

Resumen

Título: Caracterización experimental de la turbulencia a grandes distancias horizontales y baja altura mediante la técnica de Telescopía de Fourier*

Autor: Omar Javier Tijero Rojas**

Palabras Clave: Turbulencia atmosférica, Óptica, Electrónica, C_n^2 .

Descripción:

Esta tesis presenta la técnica de Telescopía de Fourier probada experimentalmente a tres distancias diferentes de propagación horizontal y cerca del suelo para la caracterización de la turbulencia, la cual está apoyada en mediciones a partir de sensores de variables físicas adicionales donde se observan las condiciones ambientales. El diseño de este método se basa en la integración de montajes ópticos y electrónicos para poder llevar a cabo el registro y posterior análisis de las mediciones, en donde el láser fue caracterizado con relación a los efectos más importantes que este produce y por el cual afecta las mediciones de la turbulencia. El hardware y software aquí utilizado se diseñó especialmente para que las mediciones en campo se pudieran adaptar fácilmente a la alimentación con baterías. Los cálculos registrados de las variables de medición de turbulencia fueron ejecutados a partir de Matlab ® y las simulaciones se ejecutaron a partir del apoyo recibido por la “*Florida Atlantic University*” (FAU) y el “*Department of Computer & Electrical Engineering and Computer Science*”, con los algoritmos brindados. Esta técnica sirve para la medición de estos parámetros, rescatando las características que se aprendieron en esta tesis para aplicaciones de seguridad en donde se necesite por ejemplo detección de objetos a larga distancia, pues el periodo espacial, de las franjas proyectadas a 134.8 metros de propagación, estuvo en el orden de los cientos de nanómetros, lo cual origina una fuerte motivación para continuar trabajando en este tema.

* Tesis de Doctorado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: Yezid Torres Moreno. Codirectora: Ana Beatriz Silva Ramírez.

Abstract

Title: Experimental characterization of the turbulence to long horizontal path and ground level from Fourier Telescopy technique*

Author: Omar Javier Tíjaro Rojas**

Key Words: Atmospheric turbulence, Optics, Electronics, C_n^2 .

Description:

This these presents the Fourier Telescopy technique tested experimentally at three different distances of horizontal propagation and near the ground for turbulence characterization, which is supported by measurements from sensors of additional physical variables where environmental conditions are observed. The design of this method is based on the integration of optics and electronics setups to be able to carry out the recording and subsequent analysis of the measurements, where the laser was characterized in relation to the most important effects that it produces and by which it affects the turbulence measurements. The hardware and software used here was specifically designed so that field measurements could be easily adapted to battery power. The recorded calculations of the turbulence measurements variables were executed from Matlab[®] and the simulations were executed based on the support received by the “Florida Atlantic University (FAU) and its “Department of Computer & Electrical Engineering and Computer Science”, with the algorithms provided. This technique is used to measure these parameters, rescuing the characteristics that were learned in this these for security applications where, for example, long-distance object detection is needed, since the spatial period, of the projected fringes to 134.8 meters of propagation, it was in the order of hundreds of nanometers, which gives a strong motivation to continue working in this issue.

* PhD Thesis

** Faculty of Physic-Mechanics Engineering. Electrics, Electronics and Telecommunications Engineering School.
Advisor: Yezid Torres Moreno. Co-advisor: Ana Beatriz Silva Ramírez.

Introducción

La turbulencia es un fenómeno que se presenta con gran intensidad en la superficie terrestre, y en diferentes caracterizaciones, reportadas en función de la altura típicamente (Labeyrie, Lipson, & Nisenson, 2006; Schmidt, 2010; Tatarski, 1961), se ha evidenciado que las mediciones más separadas de la superficie poseen parámetros de turbulencia más débiles. Por tal motivo se han construido, diferentes telescopios en órbitas exteriores a la atmósfera (Reynolds, Talent, & Vilas, 1989) para contrarrestar tal fenómeno. La Telescopía de Fourier es una de estas técnicas que busca estudiar la atmósfera para conocer un poco más sobre su función de transferencia óptica (OTF - del inglés Optical Transfer Function) y, en algunos casos, por medio del promediado en el tiempo mejorar la resolución de imágenes que se tomen cerca de la superficie terrestre (TAFT – del inglés Time Average Fourier Telescope) (Rhodes, 2012). De esa manera, la teoría utilizada se conecta con las funciones estructuras formuladas desde 1941 por Kolmogorov (Jiménez, 2004), que presenta una combinación de las fluctuaciones espaciales de segundo orden promediadas en el tiempo y que, a su vez, han sido mejorada por Tatarski (Tatarski, 1961) e incluida en diferentes modelos de simulación (Schmidt, 2010) que han sido base para diferentes estudios como los reportados en (Randunu Pathirannehelage, 2015), (Pava, 2014) entre otros. De tales teorías se han formulado diferentes parámetros para estimar una medida de la fortaleza de la turbulencia como el parámetro de estructura del índice de refracción C_n^2 , la escala interna l_o , escala externa L_o y el índice de centelleo σ_I , en dónde se han utilizado algunas técnicas para poder calcularlos (Consortini, Sun, Innocenti, & Li, 2003; Masciadri & Vernin, 1997; Rasouli, 2010; Razi &

Rasouli, 2014; Voitsekhovich, 1995). Estos parámetros no sólo son las causas de no poder formar imágenes de alta resolución a largas distancias limitadas por la difracción, sino también afectan las comunicaciones, pues una gran cantidad de medios utilizan la atmósfera como medio de propagación de ondas para enviar señales a través de enlaces ópticos no guiados (Jurado Navas, 2009). Con esta tesis, se busca dar respuesta a la pregunta ¿Es posible caracterizar la turbulencia atmosférica a nivel horizontal estimando el parámetro estructura del índice de refracción a partir de la técnica de Telescopía de Fourier en combinación con las funciones estructuras de Kolmogorov-Tatarski? Por tal motivo, se tomó el esquema de la TFTP (de inglés TAFT, Time Average Fourier Telescopy) para caracterizar experimentalmente la atmósfera a nivel horizontal y baja altura en una combinación de montajes ópticos, equipos de medida eléctrica (Andrews & Philips, 2005; Contreras, 2016; Hernández Quintero & Rincón Correa, 2016; Herreño Vanegas & Villamizar Conde, 2016; Pinzon Sierra, 2017; Tíjaro Rojas, Sandoval Vera, & Torres Moreno, 2017), sistemas electrónicos embebidos diseñados para adquirir señales lumínicas y ambientales a diferentes horas del día, diferentes distancias de propagación que fueron insumos para poder calcular a partir de esta técnica -y por primera vez en campo- los parámetros que indicaron la turbulencia en latitudes cercanas al Ecuador que finalmente se aplicarían en la seguridad del envío y recepción de la información.

En los capítulos siguientes, se presenta una explicación de los temas tratados, iniciando por el marco teórico, en el cual se hace una breve introducción a la turbulencia, las escalas interna y externa, los parámetros que se miden para evaluar si la turbulencia es fuerte o débil dependiendo de los valores del parámetro C_n^2 ; una muy corta revisión de la historia del láser y los efectos que este produce, haciendo hincapié en la deriva del haz; luego, se presenta la Telescopía de Fourier como la técnica base para la implementación de los experimentos; el desenvolvimiento de fase

para medir el comportamiento de las señales y; las técnicas encontradas hasta hoy en la revisión del estado del arte para la estimación de la turbulencia, en donde se muestran los diferentes dispositivos ópticos y las ventajas reportadas, incluye los avances alcanzados en el grupo de investigación y lo observado a nivel internacional.

En el capítulo de la metodología, son mostrados cada uno de los diagramas experimentales incluyendo los componentes ópticos, acústico-ópticos, la detección y la forma de onda, los cuales conllevan a proponer modelos para la caracterización del láser y su posterior implementación, que muestran las ventajas de la técnica propuesta frente a las previamente encontradas y detalladas en el marco teórico. Se explican con detalle los equipos que se utilizaron para la adquisición de las señales temporales tanto de las variables físicas (temperatura, presión, humedad relativa y velocidad del flujo de aire) como ópticas (provenientes del láser y el medio), las ecuaciones que se derivan del tratamiento de señales realizados y los diagramas de análisis de datos para evaluar su comportamiento respecto a la fase principalmente. En el capítulo de resultados, se presenta la caracterización para el movimiento intracavidad del haz láser, la implementación del experimento, se explican las razones por las cuales se utilizó una rendija para la experimentación, la estimación de la distancia a partir de los patrones de franja capturados, las simulaciones y pruebas en el laboratorio que fueron comparados con los modelos teóricos y los resultados de la estimación de los parámetros de la turbulencia en campo. En las conclusiones se consignan de igual manera, los aportes y hallazgos además de las recomendaciones para los trabajos futuros.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar la turbulencia para diferentes distancias horizontales a nivel del suelo mediante la técnica de Telescopía de Fourier.

1.2 Objetivos Específicos

Caracterizar las fuentes de luz que se utilizarán para iluminar el blanco a diferentes distancias horizontales teniendo en cuenta los efectos del bandeo intracavidad.

Implementar un montaje experimental que permita adquirir señales sobre la turbulencia atmosférica a diferentes distancias horizontales, del orden de los centenares de metros, a baja altura a partir de la técnica de la Telescopía de Fourier.

Caracterizar la turbulencia a partir de estas mediciones, dados los efectos de variables como la temperatura, presión, humedad relativa y velocidad del aire.

2. Marco Teórico

Desde el planteamiento de las teorías de Kolmogorov en 1941, conocidas como K41 (Jiménez, 2004), se encontraron soluciones para modelar fenómenos que dependían del espacio y el tiempo, pero cuyas fluctuaciones no estaban dadas por funciones lineales, sino que tenían en cuenta el segundo orden. Esta teoría de la turbulencia es ampliamente utilizada en astronomía, con algunas modificaciones que la han mejorado, entre otros por Von Karman y Tatarskii (Tatarski, 1961) para mejorar y corregir las imágenes afectadas por efectos de la turbulencia atmosférica. Dentro del planteamiento realizado, por décadas se ha utilizado el modelo de propagación vertical, sin embargo, el modelo a nivel horizontal ha sido propuesto inicialmente por Rhodes (Rhodes, 2012), proponiendo una serie de hipótesis en su técnica de telescopía de Fourier promediando imágenes en el tiempo. Según su planteamiento, para diferentes distancias horizontales podría funcionar en la práctica si se puede tener un control sobre la fase, la cual tiene fuertes afectaciones originadas por la turbulencia atmosférica.

La turbulencia atmosférica produce variaciones del índice de refracción, que a su vez originan fluctuaciones de la irradiancia, ensanchan el haz, incrementando la divergencia de este, producen fluctuaciones del ángulo de arribo y producen la pérdida de la coherencia espacial. A su vez, las inhomogeneidades en la temperatura y en la presión de la atmósfera producen variaciones del índice de refracción, lo que ocasiona que las señales ópticas que pasan por la atmósfera sean distorsionadas (Sánchez, 2009).

En la caracterización de la turbulencia se miden parámetros, y se utilizan técnicas que utilizan interferometría. Las simulaciones realizadas y los trabajos presentados actualmente han permitido algunos avances relativos al desarrollo de esta tesis y que se presentan en las siguientes secciones.

2.1 Caracterización de la turbulencia

La caracterización de la turbulencia se basa en los efectos que ésta produce y que se tienen en cuenta al realizar mediciones experimentales y son dados principalmente por diferencias entre las variables físicas como la presión y la temperatura (Andrews & Philips, 2005), que en el ambiente producen cambios en otras variables físicas. Dentro de los parámetros a enunciar, las escalas interna y externa de la turbulencia (l_0 y L_0 respectivamente) dependen generalmente de la teoría de cascadas de la turbulencia descrita también por Kolmogorov (Kolmogorov, 1941), la cual es ilustrada esquemáticamente en la Figura 1. En ésta, el eje vertical hace referencia a la variable temporal y el eje horizontal a puntos específicos del espacio. La inyección de energía hace referencia a la inserción de una corriente de aire caliente dentro de un fluido, lo cual genera una energía cinética por el movimiento del gas que es proporcional al cuadrado de la velocidad en una región coherente de dimensión l y con una velocidad típica v_l dada en (Labeyrie et al., 2006):

$$E_c \sim v_l^2. \tag{1}$$

El movimiento en el tiempo que se gasta en recorrer la longitud l está dado por:

$$\tau = \frac{l}{v_l} \wedge \epsilon \sim \frac{v_l^2}{\tau} \Rightarrow \epsilon \sim \frac{v_l^3}{l}, \tag{2}$$

siendo ϵ la rata de ingreso de la corriente de aire caliente en el fluido.

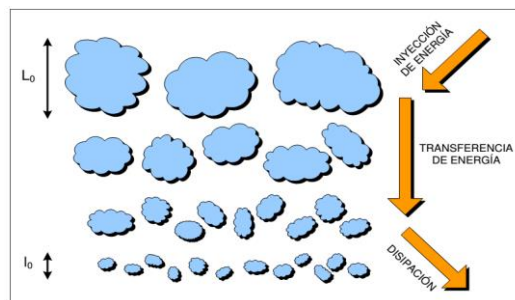


Figura 1. Cascadas de turbulencia descritas por Kolmogorov. Donde l_0 y L_0 indican los tamaños de escala límite de las celdas turbulentas que intervienen en la transferencia de energía. Fuente: (Jurado Navas, 2009).

Si cada nube representa una celda en la Figura 1 y su velocidad cambia aleatoriamente entre una celda y otra de la región, entonces se genera un diferencial de velocidad $\Delta V \sim \frac{v_l}{l}$. Si adicionalmente se supone un medio viscoso con viscosidad cinemática μ , éste convierte la energía cinética para calentarse con una rata de disipación de energía ϵ enunciada en

$$|\Delta V|^2 \mu \sim \mu \frac{v_l^3}{l} \quad (3)$$

y la energía cinética no puede ser disipada como calor, a menos que:

$$\epsilon < |\Delta V|^2 \mu \text{ o } \frac{lv_l}{\mu} < 1. \quad (4)$$

De esta expresión se encuentra el número de Reynolds para la escala l : $Re_l = \frac{lv_l}{\mu}$ el cual es una cantidad adimensional. A partir de estas experiencias, se determinan v_0 y l_0 como las escalas más pequeñas dadas por la energía de entrada y se les denomina escala interna.

$$v_0 \sim (\epsilon l_0)^3 \text{ y } \epsilon = \frac{\mu v_0^3}{l_0^3} \Rightarrow l_0 \sim \left(\frac{\mu^3}{\epsilon}\right)^{\frac{1}{4}} \Rightarrow v_0 \sim (\mu \epsilon)^{\frac{1}{4}}. \quad (5)$$

A su vez, el final de la escala se denomina escala externa, cuya dimensión es L_0 y velocidad v_{L_0} . De tal manera, a partir de $\epsilon \sim \frac{v_{L_0}^3}{L_0}$ se obtiene:

$$l_0 \sim \left(\frac{\mu^3}{\epsilon}\right)^{\frac{1}{4}} \sim \left(\frac{\mu^3 L_0}{v_{L_0}^3}\right)^{\frac{1}{4}}. \quad (6)$$

Lo cual muestra cómo se va generando una conversión de la energía de una escala a otra, que está presente mientras que un flujo empuja a otro y finalmente se disipa.

A pesar de que la mecánica y la termodinámica de la turbulencia y el modelo expuesto de estas dos escalas son muy importantes para entender el comportamiento mecánico general de la turbulencia, se encuentran otros parámetros como el centelleo que permiten caracterizar el comportamiento estadístico de este fenómeno. El centelleo es un efecto óptico asociado a los cambios bruscos en el índice de refracción a lo largo del camino de propagación de la luz. Es dado

por las pequeñas fluctuaciones de temperatura, densidad atmosférica y, fue estudiado inicialmente por los astrónomos, pues el frente de onda de la luz procedente de las estrellas lejanas debía ser plano, pero al entrar en la atmósfera se producían desviaciones generando sensaciones temporales en el ojo que se traducen en el titilar de las estrellas (Labeyrie et al., 2006).

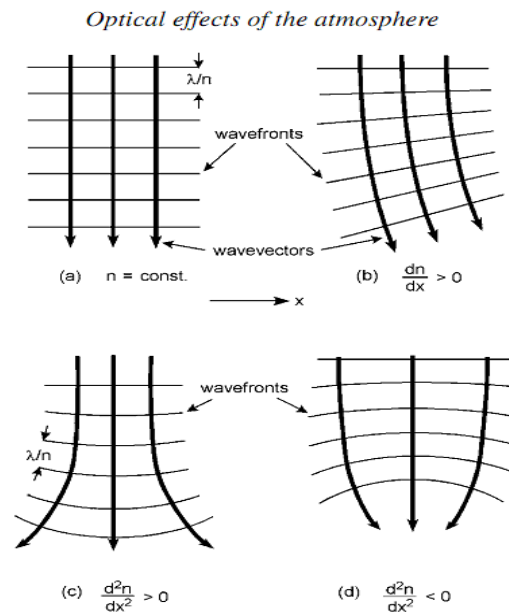


Figura 2. Efectos ópticos de la atmósfera. a) Medio ideal sin atmósfera. b) Cambios en primer orden del índice de refracción. c) y d) Cambios en segundo orden en el índice de refracción que producen el efecto del centelleo. Fuente: (Labeyrie et al., 2006).

Como se ilustra en la Figura 2, las figuras c) y d), presentan cambios de segundo orden, que al combinarse en diferentes tiempos da la sensación de opacidad y brillo en estas.

El centelleo en general se mide en términos del “índice del centelleo” definido como la varianza de las fluctuaciones de la irradiancia (Stromqvist Vetelino et al., 2005), como se presenta a continuación:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1, \tag{7}$$

donde I representa la irradiancia de la onda óptica y $\langle f \rangle$ representa el promedio temporal de f .

Otro parámetro óptico importante en el análisis es el C_n^2 , el cual se ha llamado “parámetro estructura del índice de refracción” (Labeyrie et al., 2006; Schmidt, 2010; Tatarski, 1961) e indica la intensidad de la turbulencia. Las aproximaciones a las fluctuaciones más débiles de esta están dadas por el índice de centelleo a la varianza de Rytov:

$$\sigma_I^2 = 1.23 C_n^2 k^7 L^{\frac{11}{6}}. \quad (8)$$

Sin embargo, cuando la turbulencia es fuerte, es necesario apoyarse en otros parámetros como el ángulo de incidencia propuesto por Consortini et al. en (Consortini et al., 2003), que en combinación con el índice de centelleo (Ecuación 7), la distancia de propagación, L , y en dado caso con el número de onda, k , se calcula la escala interna para ondas monocromáticas esféricas:

$$l_0 = \left(\frac{\sigma_I^2}{12.8 C_n^2 L^3} \right)^{-\frac{3}{7}}, \quad l_0 = 1.08 L \sqrt{\frac{\langle \alpha^2 \rangle}{\sigma_I^2}} \quad \text{ó} \quad l_0 = 1.37 k^{-7/2} L^{-5/2} \left(\frac{\sigma_I^2}{\langle \alpha^2 \rangle} \right)^3. \quad (9)$$

La primera ecuación de izquierda a derecha es la ecuación general, y más utilizada, las restricciones de las dos restantes son $\sigma_I^2 \ll 1$, si se utiliza la ecuación central tal que $L \ll \frac{l_0^2}{\lambda}$ (siendo λ la longitud de onda electromagnética utilizada), y si se utiliza la ecuación de la derecha, $L \gg \frac{l_0^2}{\lambda}$. El diagrama experimental propuesto para medir el ángulo de incidencia a la recepción de la señal α se muestra en la siguiente figura.

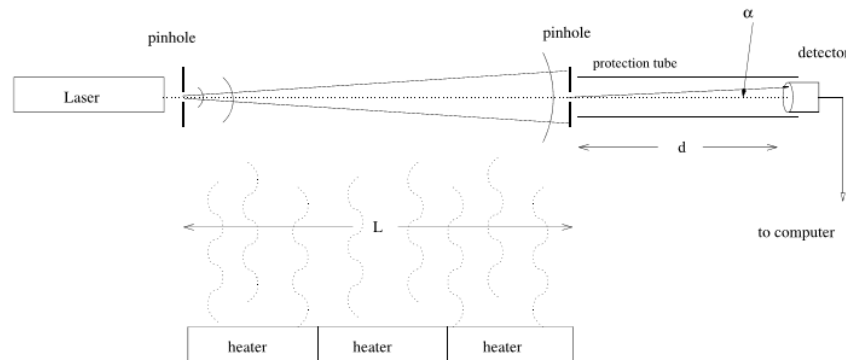


Figura 3. Diagrama experimental para calcular el ángulo de incidencia a la recepción de α . Fuente: (Consortini et al., 2003).

A partir de las Ecuaciones (7-9), fue posible calcular cada uno de los parámetros que se utilizaron para la caracterización de la turbulencia. Teniendo en cuenta también los valores reportados en (Kwiecień, 2019) que describen categorías de la turbulencia según el parámetro de estructura C_n^2 , clasificando como turbulencia fuerte a $C_n^2 \sim 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, moderada para $C_n^2 \sim 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, débil para $C_n^2 \sim 1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ y muy débil para $C_n^2 \sim 1 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$.

2.2 El láser y sus efectos

El láser es uno de los dispositivos que ha sido producto de una gran cantidad de investigaciones como: la electrodinámica, la espectroscopía, estudios de la radiación del cuerpo negro, modelos de los átomos y las teorías de Einstein, que moldearon la base de lo que actualmente se usa para la generación de luz coherente por emisión estimulada, o luz láser y construcción de los dispositivos llamados también láseres (Bertolotti, 2005). De esa manera, un láser consiste en una colección de átomos o moléculas (el “medio activo”) excitadas por una fuente de energía (la “bomba”) y contenida en una cavidad resonante que provee realimentación. La emisión espontánea del medio activo es reflejada desde los espejos finales de la cavidad y pasa otra vez a través del medio activo, donde es amplificada por emisión estimulada adicional. La contribución de la emisión estimulada desde diferentes pasos a través del medio activo agrega constructivamente sólo para ciertas frecuencias o modos que son los que se propagan (Goodman, 2000).

Hoy en día, sus aplicaciones en comunicaciones, tratamiento de imágenes tanto en una o varias longitudes de onda, biomedicina, microondas, entre otras, son algunos de los ejemplos de la importancia de estos dispositivos, pues las características que tienen los haces láser son aprovechadas para incrementar la precisión, velocidad o seguridad en diferentes sistemas de comunicaciones como en el caso del protocolo BB84 (Shor & Preskill, 2000), el cual se utiliza

como clave cuántica y podría llegar a comunicaciones completamente seguras como lo reportado en la referencia (López, Moreno, & Rhodes, 2018), utilizan esquemas como el del momento angular orbital de la luz (Acevedo, Jérez, Diaz, Torres, & Guzmán, 2013; López H, Reyes Q, Guzmán, Torres M, & Mendoza C, 2017), el cual es otra característica de la luz que está generando grandes expectativas.

Ante estas situaciones, ciertas características del láser son estudiadas para poder mejorar la precisión en experimentos, una de ellas es la deriva del haz o bandeo (en inglés *Beam Wander*), que es un efecto originado al interior de la cavidad del láser que se genera por cambios de temperatura, modificación de la longitud de la cavidad, geometría de los espejos, entre otros y que ha sido modelado inicialmente como cambios de fase en la onda electromagnética, donde están incluidas las vibraciones acústicas acopladas de los espejos que conforman la cavidad y el ruido inherente en la salida del oscilador (Goodman, 2000). Además ha sido estudiado para observar las implicaciones de este efecto en la turbulencia atmosférica tanto para generación y corrección de la misma en modelos teóricos (Sánchez, 2009), simulaciones y algunos experimentos en (Kaushal et al., 2011; Sjöqvist, Allard, Gustafsson, Henriksson, & Pettersson, 2011; Zhao & Liao, 2011).

2.3 La Telescopía de Fourier

La técnica de Telescopía de Fourier es utilizada en muchas aplicaciones debido a algunas ventajas que ofrece como: la fuente de iluminación al objetivo es activa, el brillo del objeto depende de la potencia del láser y el ángulo de emisión, la resolución de la imagen depende de la separación de los dos haces, si la distancia aumenta, la resolución también, entre las más importantes (Lu, Gao, Tang, & Wang, 2012). Esta técnica también es conocida como la síntesis de apertura (Cassaing, Mugnier, Rousset, & Sorrente, 1997) y tiene varias aplicaciones en la

mejora de resolución en imágenes en prototipos utilizados en el estudio de fenómenos espaciales. El método planteado por Rhodes (Rhodes, 2012) es utilizado como referencia para el desarrollo de esta tesis, sin embargo busca dar solución al problema de obtener alta resolución en imágenes lejanas a través de un camino horizontal.

A su vez, para poder obtener las imágenes de alta resolución, no se utiliza la óptica clásica, sino que se utiliza muestreo en el espacio espectral espacial, esto quiere decir, que en lugar de buscar una imagen en el espacio directo se miden las componentes de intensidad de reflectancia de la imagen en el plano de Fourier y se realiza una transformación inversa de esta como se muestra aquí:

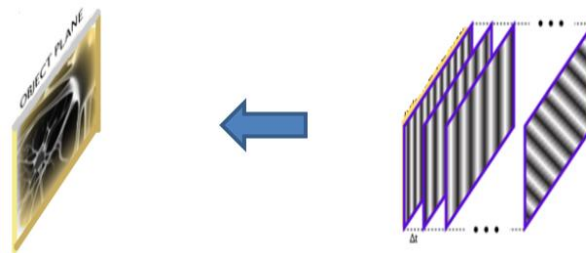


Figura 4. Iluminación del objetivo moviendo patrones senoidales con diferentes periodos y orientaciones. Fuente: (Rhodes, 2012).

$$I_{il}(x, y; u, v; t) = 1 + \cos [\omega t - 2\pi(ux + vy)]. \quad (10)$$

$$i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \{1 + \cos[\omega t - 2\pi(ux + vy)]\} dx dy. \quad (11)$$

$$i(t) = Bias + s(t, u, v). \quad (12)$$

Los patrones de franjas que se proyectan sobre el objeto a iluminar en la Figura 4 son gobernados idealmente por la Ecuación 10. El detector de salida registra la iluminancia del objeto y la modulación dada por las franjas sobre él (véase Ecuación 11) la cual debe ser transducida a una corriente eléctrica como se observa en la Ecuación 12, que contiene de una parte las corrientes de polarización del circuito y el fondo continuo de la imagen, y otra la señal de reflectancia del objeto como tal (Rhodes, 2012).

Es fácil demostrar que $s(t, u, v)$ se puede expresar como la magnitud de la transformada de Fourier de la señal multiplicando el patrón de franjas desfasado según la fase de la transformada de Fourier del objeto, teniendo la ecuación:

$$s(t; u, v) = |F(u, v)| \cos[\omega t + \varphi(u, v)]. \quad (13)$$

Para el caso de un interferómetro de Young que ilumina un objeto situado a una distancia L , con una onda monocromática de longitud de onda λ y con separación S entre espejos; la frecuencia espacial muestreada es:

$$(u, v) = \left(\frac{S_x}{\lambda L}, \frac{S_y}{\lambda L} \right) \text{ con } S^2 = S_x^2 + S_y^2. \quad (14)$$

Sin embargo, al viajar por la atmósfera, el comportamiento está bien lejos del ideal y se obtienen patrones no lineales que generan una distorsión a la imagen que no deja visualizar los detalles, este efecto puede considerarse simulando un filtro de paso bajo en donde incluso el fondo continuo puede cambiar respecto al espacio y al tiempo, exponiendo una función de iluminación de la forma:

$$I_{ii}(x, y, u, v; t) = b(x, y, u, v; t) + a(x, y, u, v; t) \cos[\omega t - 2\pi(ux + vy) + \varphi(x, y, u, v; t)]. \quad (15)$$

Cabe anotar, que la Ecuación 15 es la modificación de la Ecuación 10 ajustada a los efectos de la atmósfera. Se espera, por lo tanto, que los cambios respecto a las cantidades unitarias sencillas que acompañaban el modelo ideal modifiquen la señal y el *Bias* por valores que cambian en el tiempo y en el espacio; y que además cambian la fase, que anteriormente era nula, y es uno de los mayores escollos a sobrepasar.

Se hace importante entonces, conocer los cambios de fase a la señal y, una de las formas de realizarlo es utilizando la teoría original de Takeda a partir de algoritmos como los dados en (Huntley & Saldner, 1993), donde se automatiza la función estudiando cada pixel de una imagen como una función del tiempo o en (Meneses, Gharbi, & Humbert, 2005), donde a pesar del ruido

contenido en una señal espacial, es posible encontrar un método no invasivo para hallar la forma en 3D de la estructura de la piel humana, y en donde el estudio de la fase es fundamental.

Por otro lado, las variables físicas que denotan las variaciones considerables, sobre todo en la fase del haz propagándose, están ligadas a cambios en la velocidad del aire, temperatura como se observó en (Ballesteros Díaz, Tijero Rojas, & Torres Moreno, 2017), presión y humedad, siendo esta última la asociada a la viscosidad del fluido (aire en condiciones normales).

2.4 Desarrollo de fase

Para el cómputo del desarrollo de fase en señales de una dimensión se realizó un trabajo para verificar varios métodos y las aplicaciones en las que se utilizaban (Karam, 2007), sin embargo, los métodos más cercanos al fenómeno estudiado se basan en los algoritmos dados por (Meneses et al., 2005), ya que se parte de la representación de imágenes interferométricas en el tiempo de acuerdo a la frecuencia temporal ω dada en las ecuaciones (10), (11), (13) y (15). En el caso de (Meneses et al., 2005) se tratan imágenes, en donde se segmentan regiones con píxeles de fase continua, se determina el desplazamiento de fase entre tales regiones y se desenvuelve la fase adaptando secuencialmente las regiones con fase discontinua.

El algoritmo de desarrollo en una imagen compara los valores de fase entre píxeles vecinos. Dada la fase en un píxel P1, la fase en otro píxel P2, se puede desenvolver contando el número de 2π discontinuidades a lo largo de un camino que va del píxel P1 al píxel P2. La secuencia de los valores de fase a lo largo del camino se denota como $\varphi(i)$ ($i = 0, 1, 2, \dots, N$), el número de discontinuidades $d(i)$ ($i = 0, 1, 2, \dots, M$) entre los dos píxeles $(i - 1)$ e (i) se pueden calcular por medio de la ecuación (Ballesteros, 2019):

$$d(i) = \left[\frac{\varphi(i) - \varphi(i-1)}{2\pi} \right]. \quad (16)$$

Los cambios de fase entre dos píxeles vecinos están en el rango de $-\pi$ a π , cambios abruptos de valores dentro de este rango, indican que hay una discontinuidad presente dentro de estos dos píxeles.

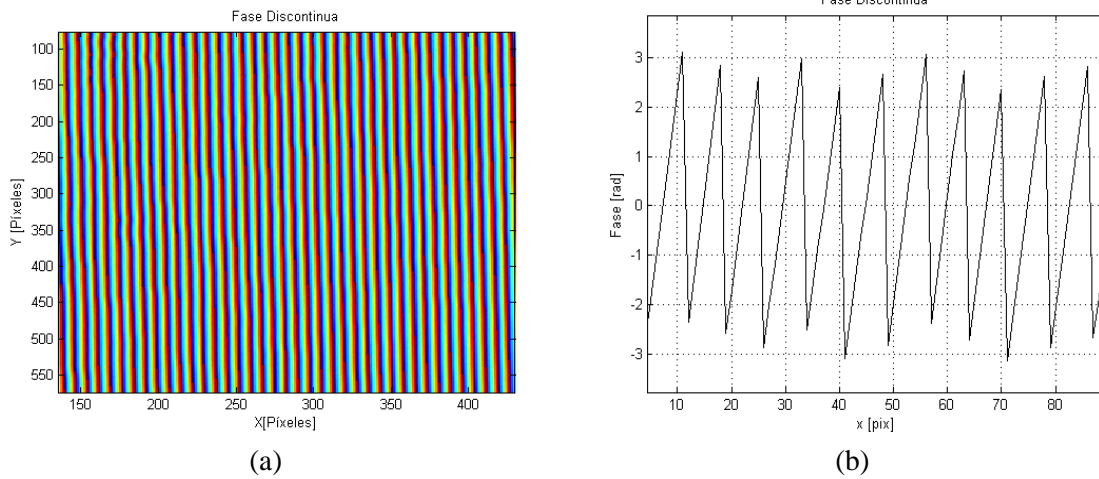


Figura 5. Fase discontinua: (a) De una sección de una imagen de franjas de Young; (b) Fracción de un perfil horizontal de la imagen en (a). Fuente: (Ballesteros, 2019).

El algoritmo entonces se encarga de ajustar estas discontinuidades de 2π según sea el caso a partir de:

$$\phi_{continua} = \phi_{discontinua} \pm 2\pi W, \tag{17}$$

donde W hace referencia a cada una de las discontinuidades presentadas en la Figura 5.

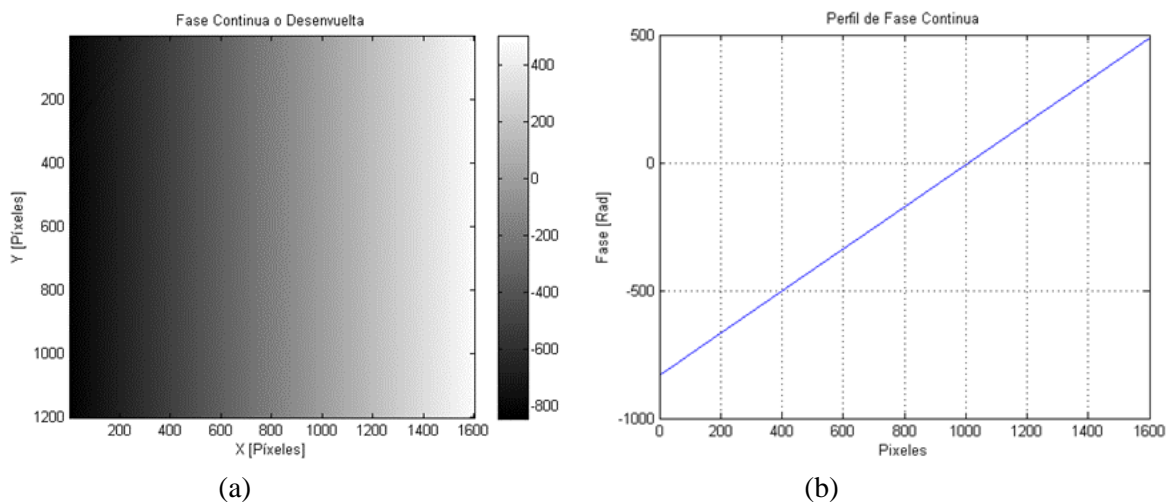


Figura 6. (a) Imagen de fase desenvuelta; (b) Perfil de fase desenvuelta en un corte al centro.

Desde la Figura 6 inicia el proceso donde estos algoritmos son adaptados a las señales temporales de la ecuación (15) para poder observar los cambios de fase en la señal adquirida y su variación es tomada en cuenta para el cálculo de la turbulencia, según se muestra en la sección de metodología.

2.5 Técnicas Implementadas

Diferentes técnicas se han diseñado en algunos trabajos en donde utilizan interferometría (Feldkhun & Wagner, 2010) y reconstrucción a partir de proyección de franjas a diferentes frecuencias para mejorar la resolución en imágenes de microscopía, de la cual se tiene una descripción básica en la siguiente figura.

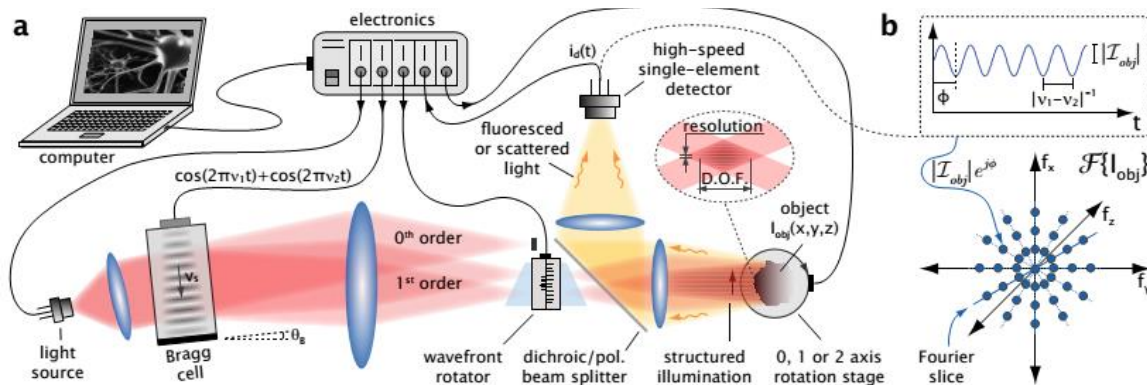


Figura 7. a) Elementos básicos del microscopio DEEP (del inglés “Doppler Encoded Excitation Patterning”): Se utiliza iluminación con dispositivos acústico-ópticos produciendo franjas de interferencia a distintas frecuencias espaciales en paralelo. b) Representación de la amplitud y fase en el plano de Fourier de la frecuencia espacial de las franjas adquirida por un detector de alta velocidad. Fuente: (Feldkhun & Wagner, 2010).

Además, en algunos trabajos se han diseñado técnicas en donde utilizan elementos generadores de calor para la caracterización de la turbulencia, en algunos casos acompañados con una técnica llamada interferómetro de difracción puntual (del inglés “The point diffraction interferometer” (J. Millerd et al., 2005)) mostrada a continuación.

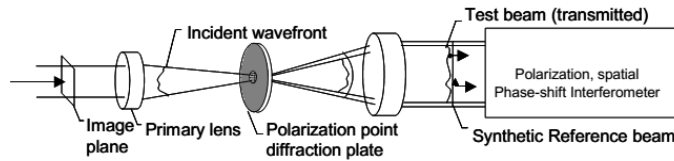


Figura 8. Diagrama experimental de PDI (*Point Diffraction Interferometer*). Fuente: (J. Millerd et al., 2005).

La técnica de la Figura 8 tiene muchas ventajas por su bajo costo, su eficiencia y su reducido tamaño; pero la implementación a grandes distancias no es muy clara, pues el dispositivo aún es muy vulnerable a la contaminación y seguramente requiere gran energía luminosa.

A distancias horizontales cortas utilizando otro tipo de generador de calor, se observan trabajos en dónde usan montajes robustos como en (Augustine & Chetty, 2014), o rendijas para producir interferencia (Funes & Garavaglia, 2011) a partir de dos ranuras de 50 μm de ancho diseñadas sobre películas fotográficas a diferentes separaciones y midiendo la longitud de coherencia (parámetro de Fried), los cuales son visualizados seguidamente.

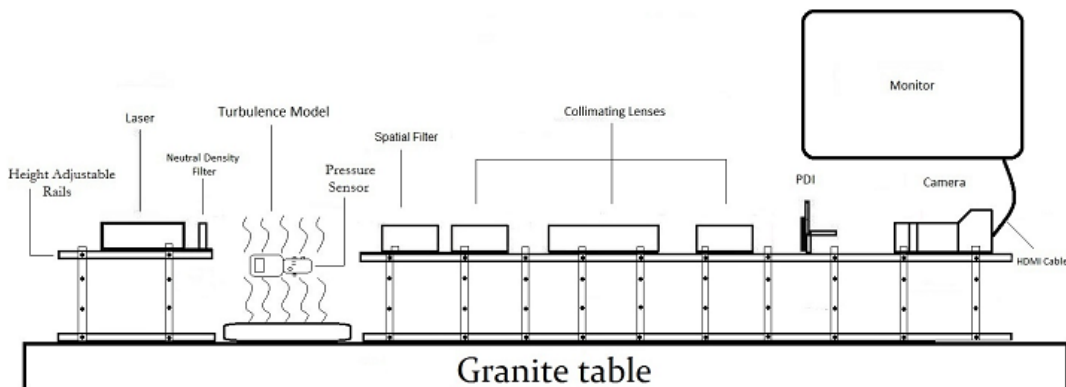


Figura 9. Vista lateral de montaje experimental implementado en la referencia (Augustine & Chetty, 2014). Fuente: (Augustine & Chetty, 2014).

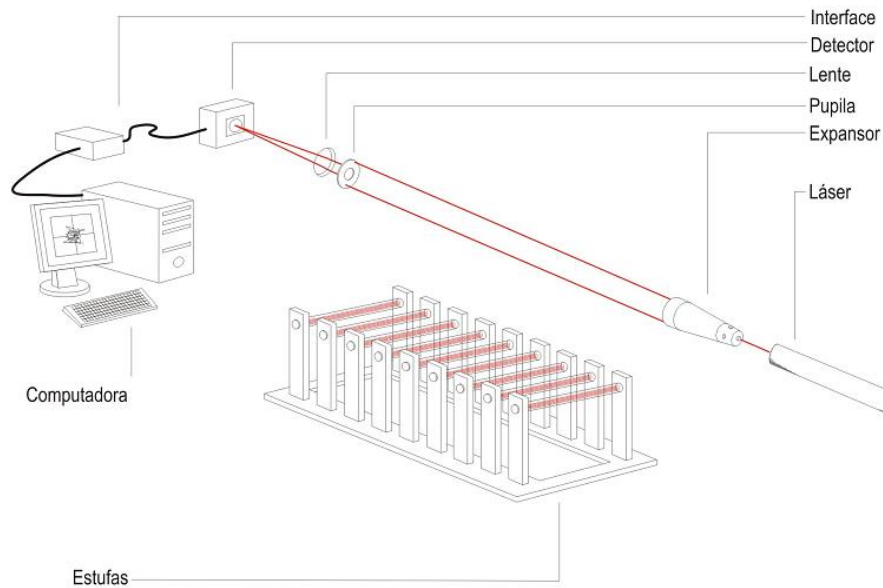


Figura 10. Diagrama experimental implementado por Funes. Fuente: (Funes & Garavaglia, 2011).

En la Figura 10 los autores debieron construir las diferentes ranuras físicamente, y para realizar las medidas, debieron cambiar cada una de las ranuras, lo que hace un prototipo poco eficiente.

En aplicaciones en el área de las comunicaciones se utilizan otros tipos de configuraciones llamados enlaces ópticos en espacio libre (FSO del inglés *Free Space Optical*), en donde se han realizado medidas en distancias horizontales a partir de SLODAR (del inglés *Slope detection and ranging*) (Love et al., 2005), las cuales son técnicas que se han desarrollado generalmente con óptica adaptativa y para mediciones verticales. De igual manera, la telescopía de Fourier también se ha usado con óptica adaptativa para reconstruir imágenes tal como lo muestra Lu y sus colaboradores en la referencia (Lu et al., 2012), con la que se ha compensado por medio de esta técnica la iluminación de los objetos (estrellas) centralizando mejor el haz, optimizando la inclinación dada por la turbulencia atmosférica y compensando sus aberraciones ópticas y la de los sistemas ópticos. Otros sistemas conocidos como SCIDAR (del inglés *scintillation detection and ranging*) también han sido reconocidos por la caracterización de la turbulencia en diferentes distancias verticales como se reporta en la referencia (Avila, Vernin, & Masciadri, 1997). Así

cómo estas técnicas se han usado para la medición de parámetros, también se han implementado diferentes algoritmos para la simulación que se discuten en la siguiente sección.

2.5.1 Simulaciones. Por su parte, en simulación de turbulencia se han construido modelos para transmisión en canales ópticos no guiados (Jurado Navas, 2009) y algunos otros para formación de imágenes (Randunu Pathirannehelage, 2015) con posibles y futuras implementaciones a cortas distancias, en donde se ha propuesto a partir de pantallas delgadas aleatorias de fase un modelo del comportamiento de la fase en instantes entre los cuales cambia la turbulencia y también en donde no lo hace (usan la hipótesis de turbulencia congelada), lo cual genera muestras estadísticamente independientes o dependientes, respectivamente. De esta manera, y como conclusión importante se encontró que la fase se debe seguir para poder encontrar los cambios que ésta sufre, lo cual ha sido el principal desafío y el más importante en el modelo.

En el modelo planteado por Rhodes para la formación de imágenes (Rhodes, 2012), se hacen suposiciones sin atmósfera y con atmósfera tal como lo muestran las ecuaciones 10 a 15 en la sección 2.3, sin embargo que no se habían podido comprobar experimentalmente bajo condiciones ambientales (fuera del laboratorio a largas distancias), realizándose algunas pruebas a escala de laboratorio, lo cual condujo a conocer la caracterización de la turbulencia necesariamente con dicha técnica, para poder entender la metodología a seguir en su implementación con el promediado temporal, en trabajos futuros.

2.5.2 Progreso internacional y local. En los desarrollos que se han presentado en recientes investigaciones, se ha encontrado una implementación de un laboratorio para generar turbulencia de larga distancia, alcanzando 180 m de distancia entre el transmisor y receptor óptico (DiComo et al., 2016) (distancia reportada hasta ahora, como la más larga para realizar pruebas de

turbulencia en el mundo), para la comparación de la técnica allí utilizada usan dos equipos para la medición de los parámetros de la turbulencia, un centellómetro (en inglés *scintillometer*) y un anemómetro óptico.

En el Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS) de la UIS, y en aras de investigar sobre los efectos que se producen por la turbulencia a escala de laboratorio, se han concluido cinco trabajos de pregrado en los que se han tenido en cuenta las variables físicas temperatura (Contreras, 2016), humedad (Herreño Vanegas & Villamizar Conde, 2016), velocidad de aire (Hernández Quintero & Rincón Correa, 2016) y presión (Pinzon Sierra, 2017), independientemente, además de un trabajo para integrar la medición de tales variables en un mismo sistema embebido (Reyes Aparicio & Vásquez Caicedo, 2018). En estos trabajos se hizo seguimiento de la evolución temporal a un sólo haz, para verificar el comportamiento de los centros de masa del frente de onda. La primera variable física estudiada en éstas condiciones fue la humedad relativa (Herreño Vanegas & Villamizar Conde, 2016), que fue cambiada desde un 57% a un 99% dentro de un tubo metálico hueco (que se llamó Turbulador), obteniendo las funciones de estructura en las coordenadas “x” y “y” independientemente.

Por su parte, la segunda variable física estudiada fue la temperatura (Contreras, 2016) en dónde las variaciones van desde 24°C hasta 105 °C. Para este caso se usaron dos sistemas de control de temperatura; uno de ellos, un reóstato implementado dentro del mismo tubo de las pruebas de humedad y otro donde había lugar a mayor convección del aire debido a la temperatura.

En el trabajo de grado relativo al estudio de la velocidad del aire se inyectaron velocidades, mediante un ventilador centrífugo (ubicado en una posición externa a la mesa de trabajo), que estuvieron entre los 0 a los 14 m/s (Hernández Quintero & Rincón Correa, 2016) dentro del mismo

Turbulador realizando adaptaciones para mantener un perfil de aire que no distorsionara el movimiento del haz en su ingreso al Turbulador.

Para variable de presión se instalaron dos placas de vidrio para mantener la presión dentro del Turbulador y la inyección de ésta se hizo mediante un compresor, para el control de esta variable fue importante utilizar también un nanómetro analógico y válvulas para expulsar el aire, de tal manera que la vibración de la operación del compresor no afectara la estabilidad del haz ni del montaje óptico en general.

El último trabajo de pregrado finalizado en esta área fue llevado a cabo en colaboración con esta tesis para el desarrollo del hardware de medida integrado todas las variables físicas anteriormente expuestas, que, a pesar de estar midiéndose independientemente, sus resultados fueron almacenados directamente en un dispositivo de memoria en un sistema embebido.

De la misma manera, un trabajo de maestría también se desarrolló al interior del GOTS en esta área. Allí, en escala de laboratorio se capturaron imágenes estáticas de los patrones de franjas propios de un interferómetro de Young en los cuales uno de sus dos brazos fue propagado por el medio turbulento (dentro del Turbulador) donde fueron controladas cada una de las variables físicas calibradas en los proyectos de pregrado. Los sensores para la comparación fueron una cámara CCD y un medidor de potencia óptica, en donde se estudiaron los parámetros espaciales como el contraste, la periodicidad, la inclinación de las franjas entre otros.

3. Metodología

Dentro de los diferentes métodos que se han utilizado para la estimación de la turbulencia, muchos de ellos han sido usados para aplicaciones en Astronomía, imágenes oceánicas y óptica

adaptativa como en (Kanaev, Hou, Restaino, Matt, & Gładysz, 2014; Lu et al., 2012) entre otras más que en la caracterización de la turbulencia, han sido importantes en aplicaciones de seguridad. En este capítulo se mostrará el diagrama experimental, en el cual se plasma el método para generar las franjas y la forma de detección, la siguiente sección conduce a la caracterización que el láser debe tener para la ejecución del experimento incluyendo los efectos del bandeo, se sigue con las características de medición de la señal temporal y de los sensores de las variables físicas, por lo que se sugiere revisar el Apéndice A, en donde están los diagramas generales del proceso, los diagramas de flujo y algunos esquemas que se consideraron importantes citar si se desea replicar esta tesis. De allí se presenta el diagrama de flujo para análisis y presentación de los datos.

3.1 Diagrama experimental

Para el desarrollo de la técnica de Telescopía de Fourier se utiliza un esquema experimental que se compone básicamente de una fuente láser que ilumina un interferómetro de Young, un modulador acústico-óptico (AOM) una rendija ajustable y un tubo fotomultiplicador (PMT del inglés *Photo-Multiplier Tube*).

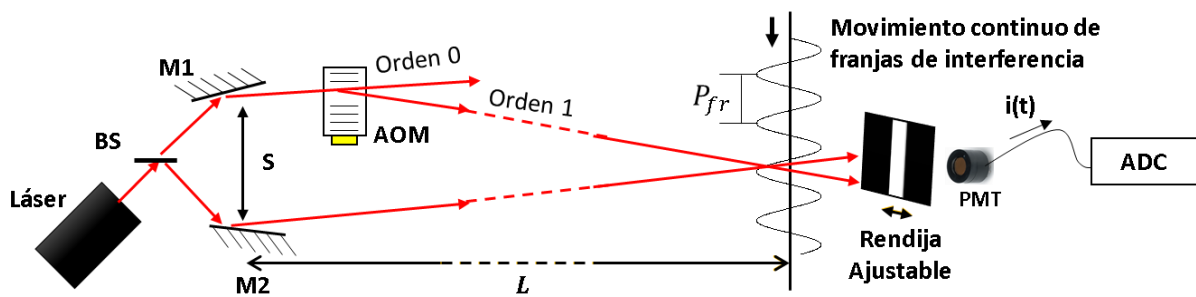


Figura 11. Diagrama experimental del interferómetro de Young a través de un modulador acústico-óptico. BS: Divisor de Haz. M#: Espejo #. AOM: Modulador acústico-óptico. PMT: Tubo foto multiplicador. ADC: Conversor Analógico a Digital. S: Distancia de Separación entre espejos. L: Distancia de separación entre fuente y objetivo. P_{fr} : Periodo de las franjas.

En el esquema de la Figura 11, el periodo fundamental espacial de las franjas P_{fr} es bien conocido por el patrón de interferencia producido por el interferómetro de Young (dado por la configuración de los espejos M1, M2 y la distancia en donde vuelven a reunirse los haces), así (Goodman, 2005):

$$P_{fr} = \frac{\lambda L}{S}, \quad (17)$$

donde: λ corresponde a la longitud de onda del haz láser, L y S a las distancias de separación ilustradas en la Figura 11.

Desde el patrón de franjas y su periodo espacial, el movimiento continuo de tales franjas se da por el efecto del modulador acústico-óptico, el cual a partir de una celda de Bragg difracta y modula una frecuencia de la luz por medio de la propagación de ondas de sonido, usualmente de radiofrecuencias en un material cristalino, su operación y caracterización es descrita en (Ortiz León & Jiménez Mier y Terán, 2011), donde la representación de una aplicación se observa a continuación.

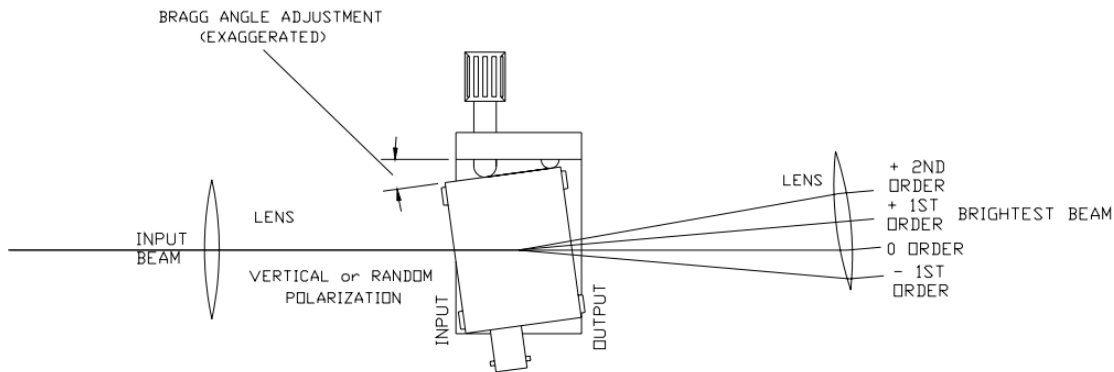


Figura 12. Diagrama de un modulador acústico-óptico. Fuente (Neos Technologies, 2006).

En esta tesis son utilizados el primer orden principalmente (que lleva la frecuencia fundamental eléctrica proporcionada por su controlador) y el orden cero (véase Figura 12) que se comenta en la sección 4.2. Después de la aplicación del diagrama mostrado, en la ubicación donde los dos haces interfieren se instala una rendija ajustable que sólo deja pasar la cantidad de luz que sea

configurada, de esta manera el PMT utiliza únicamente la región correspondiente a una fracción de franja, para que el movimiento en el tiempo sea detectado y la corriente adquirida sea llevada a un dispositivo de adquisición de datos donde se almacenan las señales temporales. En la siguiente figura se muestra una representación de la detección.

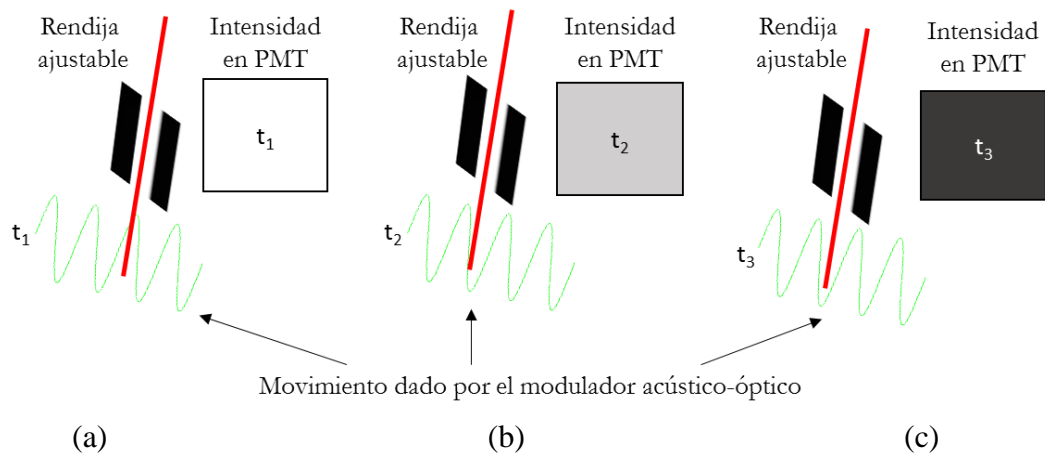


Figura 13. Movimiento de las franjas de interferencia dadas por el modulador acústico-óptico acompañado por la intensidad medida en el PMT: (a) Mayor paso; (b) Paso parcial; (c) Paso más bajo; respecto al tiempo.

De la misma manera, la ilustración y reconstrucción de la onda son presentadas seguidamente, donde no sólo se observa cómo se propagan las ondas sino los parámetros que la acompañan.

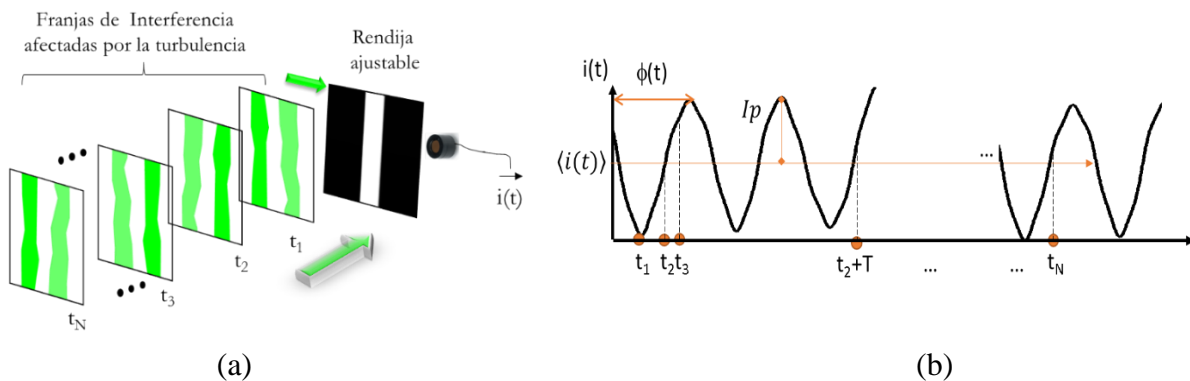


Figura 14. Reconstrucción temporal de la onda eléctrica incluyendo la turbulencia: (a) Ilustración del fenómeno. (b) Señal transducida por el PMT.

Es interesante hacer notar que en la Figura 14 (a) la frecuencia espacial de las franjas ideales es conocida a partir de la Ecuación 17, la rendija ajustable es utilizada para no dejar pasar más luz de

la necesaria y poder reducir la intensidad lumínica dada por el sol o en general el ruido del ambiente. Adicionalmente, la frecuencia temporal también se puede ajustar electrónicamente, por lo tanto, es conocida y, la longitud de onda también es conocida. Los filtros interferenciales fueron utilizados para mitigar el ruido por longitudes de onda diferentes a la de la fuente y, los parámetros de la Figura 14 (b) son los parámetros medibles en una onda en el tiempo comúnmente. Los métodos para el cálculo de estos incluyen transformación de Fourier entre otros y están ligados a la Ecuación 15. De esta forma, la fuente láser se caracteriza garantizando que el ruido producido sea mínimo, como se muestra en la sección 3.2 y para la implementación del experimento son tomadas tres distancias “ L ” y tres separaciones “ S ” en la Figura 11 para la evaluación de la teoría.

El método propuesto es importante por su simplicidad frente a las técnicas expuestas en la sección 2.5, pues no utiliza lentes y, por lo tanto, la propagación natural del haz no toma en cuenta aberraciones o correcciones adicionales que afectan el cálculo de la medición de la turbulencia.

3.2 Caracterización del láser

Para la caracterización de un láser, en el caso de propagación horizontal y medición de la turbulencia es necesario identificar el tipo de láser que se utiliza. Fenómenos como el bandeo estudiados en (Kaushal et al., 2011; Tijero Rojas, Galeano Traslaviña, & Torres Moreno, 2016; Zhao & Liao, 2011) son entre otros los que generan algún tipo de ruido que no permiten la reconstrucción de la señal de la Figura 14 (b). Así, uno de los primeros efectos del hecho de utilizar dos haces estuvo en evitar que el bandeo afectase la proyección de las franjas.

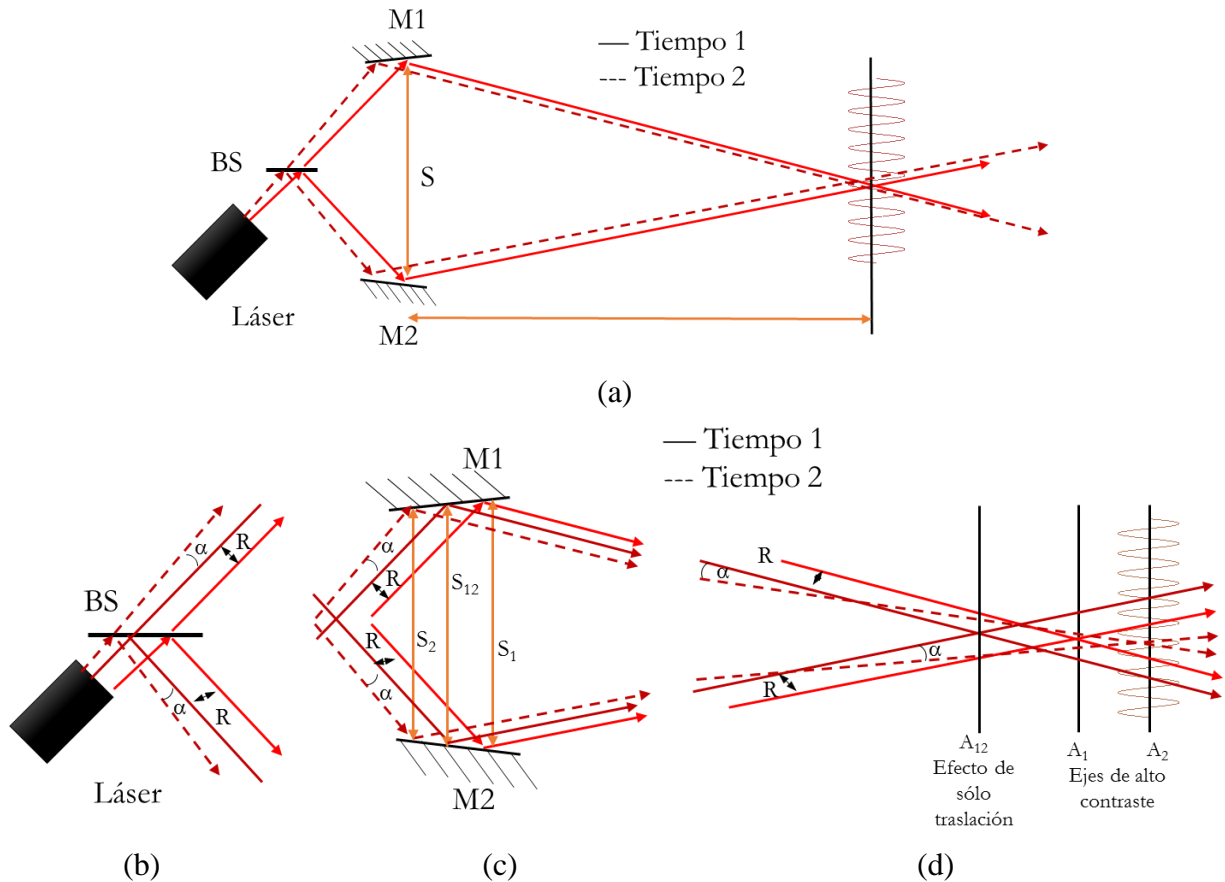


Figura 15. Descripción del fenómeno del bandeo intracavidad en el esquema base del interferómetro de Young. (a) Esquema general. (b) Descripción a la altura del divisor de haz. (c) Interacción con los espejos M1 y M2. (d) Efecto de la llegada en el plano objeto.

En la Figura 15 se indican paso a paso los efectos que tiene el bandeo sobre cada uno de los componentes ópticos del sistema generador de franjas del interferómetro de Young. En la parte (a), se muestra el esquema general en dos tiempos distintos, en la (b) el ángulo de inclinación y la traslación que se produce en la intracavidad láser, en la parte (c) el efecto que se produce a la altura de los espejos. Para entender este efecto, se toma como referencia la cara de recepción de cada uno de los espejos donde se observa un movimiento invertido (en M1 el haz se desplaza hacia la izquierda entre el tiempo 1 y el 2, mientras que en M2 el desplazamiento en el mismo tiempo es a la derecha).

También se puede observar en la Figura 15 (c) que las distancias S_1 y S_2 son similares, siendo S_1 (relativa a la distancia entre los haces divididos en el tiempo 1) un poco mayor que S_2 (medida de distancia en el tiempo 2), a su vez se señala una distancia S_{12} debido sólo al movimiento de traslación (los movimientos de inclinación y traslación están sumados en S_2), por tal razón se analiza en la Figura 15 (d) la interferencia a la altura del blanco, la cual corresponde a un desplazamiento que se da entre los planos transversales A_1 y A_2 que son los referentes a los tiempos 1 y 2 respectivamente, sin embargo en la Figura 15 (d) sólo se presentan las franjas generadas en el tiempo 2 para evitar traslapes de visualización, además hay que tomar en cuenta que se introduce una ligera modificación a la periodicidad de las franjas, por tanto a su frecuencia espacial. El plano de transición A_{12} hace referencia a los cambios que se ven en el plano del objeto si sólo tiene afectación por la traslación.

De la ecuación 17, se puede observar el periodo espacial en condiciones ideales, sin embargo, debido a la Figura 15(c) y (d) la separación entre las distancias S_1 , S_2 , A_1 y A_2 por lo tanto, se puede observar que:

$$S_1 = S \quad S_2 = S_1 \pm (\epsilon_1 + \epsilon_2) \quad (18)$$

$$L_1 = L \quad L_2 = L_1 \pm (\xi_1 + \xi_2) . \quad (19)$$

Dónde L_1 y L_2 son las distancias desde los espejos hasta los planos A_1 y A_2 en los tiempos 1 y 2 respectivamente, el valor ϵ_1 es el desplazamiento debido a la distancia de separación entre espejos sólo por efecto de la traslación en el bandeo y ϵ_2 es únicamente el debido a la inclinación y, el valor ξ_1 es la variación en la distancia entre los espejos y el plano objeto producidas por sólo la traslación en el bandeo, mientras que el valor ξ_2 es únicamente por la variación debido a la inclinación. A partir de la ecuación 17, se observa que los cambios teniendo en cuenta las ecuaciones (18) y (19) son:

$$P_{fr1} = \frac{\lambda L_1}{s_1} = \frac{\lambda L}{S}; \quad P_{fr2} = \frac{\lambda L_2}{s_2} = \frac{\lambda(L \pm (\epsilon_1 + \epsilon_2))}{S \pm (\xi_1 + \xi_2)}; \quad (20)$$

debido a que ϵ_1 y ξ_1 son desplazamientos pequeños referidos a la traslación, es fácil ver en esta ecuación que la distancia del movimiento generado por el bandeo no será perceptible ni a largas distancias, ni a altas frecuencias en la aproximación al primer orden:

$$\begin{aligned} f_{fr2} &= \frac{\lambda L(1 \pm (\epsilon_1 + \epsilon_2)/L)}{S[1 \pm (\xi_1 + \xi_2)/S]} \cong \frac{\lambda L(1 \pm (\epsilon_1 + \epsilon_2)/L)}{S} [1 \mp (\xi_1 + \xi_2)/S] \\ &\approx \frac{\lambda L}{S} [1 \pm \epsilon_1/L \pm \epsilon_2/L \mp \xi_1/S \mp \xi_2/S] \approx \frac{\lambda L}{S} [1 \pm \epsilon_2/L \mp \xi_2/S]. \end{aligned}$$

Sin embargo, para la inclinación se tiene que: ϵ_2 y ξ_2 estarán afectados por la distancia de propagación. Por lo tanto:

$$\epsilon_2 = L_p \cdot \alpha; \quad \xi_2 = L \cdot \alpha; \quad (21)$$

donde, L_p es la distancia entre el espejo de salida del láser y los espejos (M1 y M2). Este razonamiento indica que, dada la cercanía, este desplazamiento se hace poco notable, mientras que ξ_2 se hace más notable en cuanto L es mayor y el ángulo de divergencia del haz láser también lo es, por tal razón, durante el desarrollo de este trabajo se hicieron trabajos alternos que buscaban evaluar una técnica para medir el impacto del bandeo (Contreras, 2016; Galeano Traslaviña, Tíjaro Rojas, & Torres Moreno, 2015; Hernández Quintero & Rincón Correa, 2016; Pinzon Sierra, 2017), y se diseñó una técnica que tuviera en cuenta sólo al láser pues para medir las ecuaciones 18-21, las variaciones estaban influenciadas por la estabilidad de los espejos y a partir de los tiempos que podría proporcionar una cámara no sería notable el efecto. En (Tíjaro, Ramírez, & Torres, 2019) entonces, se propuso un experimento que pudiera llegar a las velocidades de conmutación que pudieran verse afectadas en el experimento sin la necesidad de utilizar una matriz. El diagrama experimental de éste se presenta de una manera sencilla así:

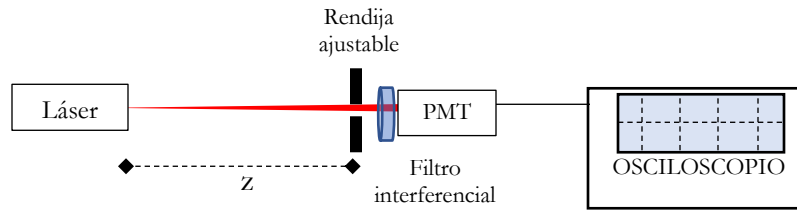


Figura 16 Esquema experimental de caracterización del movimiento intracavidad del láser. Fuente: (Tíjaro et al., 2019).

En la Figura 16, la rendija se ajusta para que pase solo una parte del haz, en una sola dirección, así, si hay cambios de posicionamiento del haz por un movimiento traslacional o de inclinación, el PMT (al ser un dispositivo sensible) cambia la corriente o tensión de salida que se registra en el osciloscopio. De este modo, se obtienen medidas de amplitud y frecuencia temporal básicamente, que son relacionadas con este fenómeno y se evalúan para la medición de los parámetros de turbulencia.

3.3 Adquisición de señales temporales

Dentro de las mediciones realizadas fue necesario tener en cuenta tanto el sistema para la detección de luz como el de las variables físicas de temperatura, humedad relativa, velocidad del aire y presión, pues los sensores tienen una respuesta temporal y de tensión diferente, y los equipos utilizados tienen limitaciones físicas, tal que se seleccionaron basado en su mejor adaptación. La Tabla 1 muestra los dispositivos utilizados y los tiempos de operación (si aplican).

Desde la Figura 11 y en general en la sección 3.1, se mostró el recorrido de la luz y las modificaciones que se presentan, según los dispositivos utilizados. A partir de la Tabla 1 se presentan los tiempos y las frecuencias más importantes para sincronizar el sistema. Así, si la frecuencia de operación del modulador acústico-óptico es de 80 MHz, entonces, el ancho de banda del PMT y del osciloscopio deben superar esta frecuencia.

Tabla 1.
Tecnología utilizada en la implementación

DISPOSITIVO	CARACTERÍSTICAS RELEVANTES
Láser reo	λ : 632,8 nm. Potencia máxima de salida: 3 mW. Diámetro del haz: 0.7 mm a 10 cm del puerto de salida. Estabilizado en intensidad o frecuencia (Research Electro-Optics Inc. & Newport, 2012).
Tubo fotomultiplicador (PMT)	Longitud de onda: 230-920 nm. Tensión de entrada: 11.5 a 15.5 V. Radio de área efectiva: 8mm. Ancho de banda: 0 a 800 MHz aproximadamente. Temperatura de operación: +5 a +50 °C. Sensitividad: 500 μ A/lm. Eficiencia: 20%(Hamamatsu Photonics K. K., 2013).
Modulador acústico-óptico	λ : 632,8 nm. Apertura activa: 3,962 mm ² . Frecuencia de desplazamiento: 80 \pm 10MHz. Ángulo de deflexión: 14.4 mrad. Modelo 24080 (Neos Technologies, 2006).
Sensor presión absoluta.	Presión absoluta de 0 a 100 psi. Tensión de salida: -12 a 12 V. Tensión de entrada: 12 V. Temperatura de operación: -40 °C a 85°C.Tiempo de respuesta: 5ms. Precisión: \pm 0.15 psi (Honeywell, 2017).
Sensor de humedad relativa y temperatura.	Humedad relativa de 0 a 100%. Tensión de salida: -4.5 a 4.5 Vdc. Tensión de entrada: 10 V. Temperaturas de operación: -60 °C a 140°C.Tiempo de respuesta: 0.1 ms. Precisión: \pm 1% (Measurement Specialties, 2008).
Sensor de velocidad de flujo de aire.	Velocidad de aire: \pm 300 SLPM (<i>Standard Litre Per Minute</i>). Tensión de salida: 10 Vac (máximo). Tensión de entrada: 9 V. Temperaturas de operación: -25 °C a 85°C.Tiempo de respuesta: 10 ms. Precisión \pm 0.360 SLPM (Máximo) (Honeywell, 2015).
Osciloscopio fluke 190-504	Frecuencia de muestreo 5 GSPS (Giga Samples Per Seconds) ajustable. Ancho de banda 500 MHz. Filtros bloqueadores de frecuencia DC. Comunicación vía USB con el PC a 9600 Baudios (FLUKE, 2011).
Sistema de Desarrollo STM32F7 Discovery	Frecuencia de muestreo del módulo ADC: 2.5 MSPS (12 bits). Almacenamiento de datos en MiniSD. LCD táctil, Protocolos disponibles utilizados: I2C, ADC, LCD, DCIM, Timmer, entre otras (ST Microelectronics, 2016).

El osciloscopio fue escogido por la versatilidad del sistema (protecciones a tensiones altas, disparo controlado y portabilidad), sin embargo, los límites que acotaron este proyecto se basaron en la toma de 10.000 muestras en una realización independiente a una frecuencia mucho mayor que la frecuencia fundamental, además se tomaron cien (100) realizaciones cada 4 segundos debido a las limitaciones que tiene el osciloscopio en la velocidad de envío al computador (la cual se realizaba por puerto USB) y el problema de comunicación que se presenta cuando se toma un número mayor respecto al espacio en disco y al sistema de gestión de memoria, el cual espera el llenado de los buffers para el envío de la información respectiva. De esta manera, se asignaron algunos parámetros como:

$$T_{acq} = N_{samp}/f_s \quad (22)$$

$$N_{Tfund} = T_{acq} * f_{fund} \quad (23)$$

Donde:

T_{acq} : Tiempo de adquisición total.

f_s : Frecuencia de muestreo. f_{fund} : Frecuencia fundamental (de la señal ~80 MHz).

N_{samp} : Número de muestras. N_{Tfund} : Número de periodos de la señal f_{fund} .

De esta forma cada muestra de esta señal será una muestra dependiente si T_{acq} en la ecuación 22 es menor al tiempo de la hipótesis de turbulencia congelada (entre 50-100 ms) (Holm, 2005). Así, cada realización debe tomarse dentro del periodo independiente para poder verificar los cambios en el medio dados por la turbulencia y por ende se deben tomar varias realizaciones.

Para la adquisición de datos del ambiente, en un dispositivo de desarrollo se programaron los algoritmos y se diseñó el hardware en colaboración con S. E. Reyes Aparicio y A. F. Vásquez Caicedo (Reyes Aparicio & Vásquez Caicedo, 2018). En este sistema la frecuencia de muestreo no fue tan rápida debido a que la mayoría de los sensores tenían una respuesta lenta y los datos del ambiente fueron tomados durante el experimento, pero con muestras tanto en el periodo independiente como en el dependiente (después de 100 ms). Este dispositivo no contaba con restricciones en el número de muestras almacenadas pues estaba abierto para el diseño de los algoritmos dependiendo del programador, el límite estaba en el tamaño del archivo en la tarjeta mini-SD para el almacenamiento de los datos.

3.4 Diagrama de análisis de datos

La metodología para el análisis del flujo de datos de la señal es basada en el desenvolvimiento de fase, donde se calculan los efectos de la turbulencia y los cambios que tiene la fase tanto en las muestras independientes como dependientes. De este modo, se muestra el diagrama de bloques del proceso en la figura a continuación.

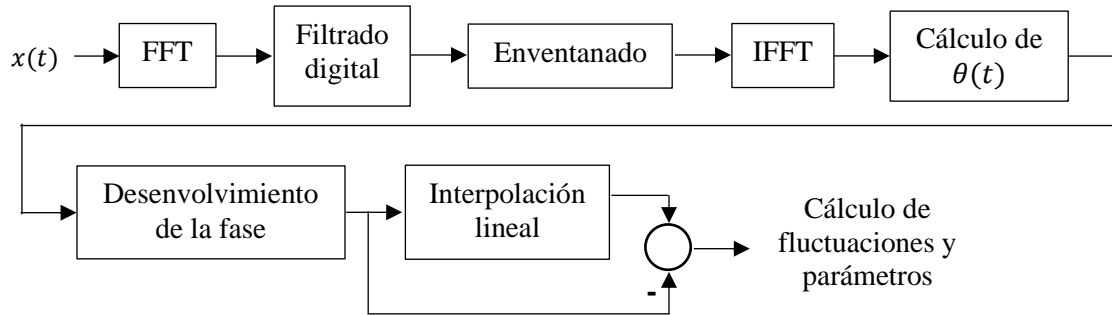


Figura 17. Diagrama de bloques del procesamiento de la señal de fase.

En la Figura 17 se ilustra que la técnica de desenvolvimiento de fase es ejecutada a partir de la transformada de Fourier, en el filtrado digital se utiliza una ventana cuadrada que busca sólo las muestras de interés que se sintonizan en la frecuencia fundamental f_{fund} y el ancho es $2 * f_{fund}/3$, para evitar solapamientos en frecuencias armónicas y encontrar en su fase la información relevante. Los datos son tratados para cada realización, donde el método es interesante debido a que el ruido electrónico de baja frecuencia y algunas variaciones de temperatura no son evidentes en la frecuencia fundamental, ya que solo se ven fenómenos ópticos y la turbulencia. El método de interpolación lineal mostrado al final del sistema de la Figura 17 utiliza la pendiente como una característica y, debido a que la variable de su dominio es el tiempo el análisis de unidades indica:

$$m_{\theta} = [rad]/[seg]. \quad (24)$$

En este caso, m_{θ} tiene unidades de frecuencia angular ω , la ecuación que se desprende de ésta genera diferentes inclinaciones que son la representación de los cambios de fase en cada realización.

En la ecuación interpolada de la recta se encuentra la fase desenvuelta, se reemplaza en la variable independiente (tiempo), es restada de los datos de fase originales (desenvueltos también) y tal resta representa las fluctuaciones de primer orden de la fase local. Esto quiere decir que la resta de estas dos funciones (la recta interpolada y los datos originales) muestran una diferencia en

fase que debe acoplarse al periodo de la señal (f_{fund}). Por consiguiente, la frecuencia de muestreo es utilizada para conocer la fase mínima entre muestras detectadas en un periodo:

$$\Delta\theta = 2\pi * f_{fund}/f_s, \quad (25)$$

$\Delta\theta$: Fase mínima entre muestras.

Es importante recordar que en estas fluctuaciones se pueden encontrar una resolución submuestra por la naturaleza de la técnica de desenvolvimiento de la fase. Así $\Delta\theta$ puede tomar valores por debajo de lo reportado en la ecuación 25. Si se presenta una variación mayor, las fluctuaciones de la fase son considerables y generan cambios fuertes en la señal. Así, para estas pruebas son almacenados tanto el promedio como la desviación estándar, las cuales evalúan la fluctuación de fase que predominó y su variación a la interpolación lineal respectivamente. La desviación estándar determina entonces una variación de segundo orden de la fase. Este último parámetro se utilizó para comparación indirecta con datos de simulación de la teoría utilizada en la sección 3.1 de la tesis (Randunu Pathirannehelage, 2015) para encontrar la desviación estándar de la fase a partir de la turbulencia generada.

4. Resultados

En este capítulo son recopilados los diferentes hallazgos de esta tesis, que permitieron cumplir cada uno de los objetivos. Inicialmente, se presenta la caracterización de las fuentes que se utilizaron y el fenómeno dado por la intracavidad del láser. Luego, se muestra la forma de implementación en campo del montaje experimental. Posteriormente, las primeras aproximaciones de la técnica a una simulación que condujeron los algoritmos de tratamiento de señal al punto de

ser fundamentales para poder estimar el grado de turbulencia. Después se muestra la técnica a las diferentes distancias tanto entre la fuente y el objetivo, como en las frecuencias espaciales dadas por los espejos M1 y M2 de la Figura 11, paralelamente los resultados de la medición de las variables físicas y las comparaciones con el modelo diseñado en FAU (Randunu Pathirannehelage, 2015).

4.1 Caracterización para el movimiento intracavidad.

Alterna a la técnica mostrada en la sección 3.2, se desarrolló un método (Tíjaro Rojas et al., 2016) con la intención de separar el efecto del movimiento intracavidad del láser del movimiento dado por la turbulencia, así, era posible estimar con cierta precisión a partir de la óptica geométrica que podría pasar con el movimiento del centro de masa del haz propagado. Con el resultado de este método se hicieron estimaciones incluyendo algunas variables físicas y de donde se obtuvieron resultados tanto experimentalmente (Contreras López, Ballesteros Diaz, Tíjaro Rojas, & Torres Moreno, 2017; Villamizar, Herreño, Tíjaro, & Torres, 2019) como haciendo su comparación en simulación (Buenahora, Tíjaro, Ballesteros, & Torres, 2018). Sin embargo, los alcances de esta tesis y de los trabajos previos fueron limitados por los equipos adquiridos, pues la estimación temporal no se podía separar de acuerdo con la hipótesis de turbulencia congelada (Holm, 2005) donde se asumen alrededor de 100 ms de separación temporal promedio a cada realización.

Esto impulsó a utilizar lo formulado en la sección 3.2, que fue un paso previo importante para identificar que la frecuencia detectada coincidiera con la enviada por el modulador acústico-óptico. A partir de la Figura 16, se utilizó un filtro interferométrico sintonizado a la longitud de onda de 632.8nm (igual que el láser) y un ancho de 2 nm, la rendija se configuró a una apertura cercana a

100 μm . De esta manera, y siguiendo el comportamiento del láser que se planeó utilizar en el desarrollo de la tesis, se corroboró que el movimiento intracavidad varía si este no es estabilizado en intensidad, por lo tanto, las variaciones en la intensidad recibida son registradas en paquetes de 10.000 muestras en un osciloscopio operando a una frecuencia de muestreo de 8.3 MHz.

En la siguiente página, se presenta un barrido aleatorio por varias de las señales independientes (a)-(d), que visualizan tanto el cambio en la frecuencia como en la amplitud, en contraste, es importante el acompañamiento de las figuras (e) y (f) para poder tener una visión general del comportamiento en las 100 señales registradas y verificar que este tipo de láseres podrían incluir ruido al sistema de medición de turbulencia, motivo por el cual se descartaron los láseres Verdi V2 (estado sólido bombeado por diodos a 532 nm y 2W), REO 31005 (HeNe a 632.8 nm y 3 mW), para las medidas en campo.

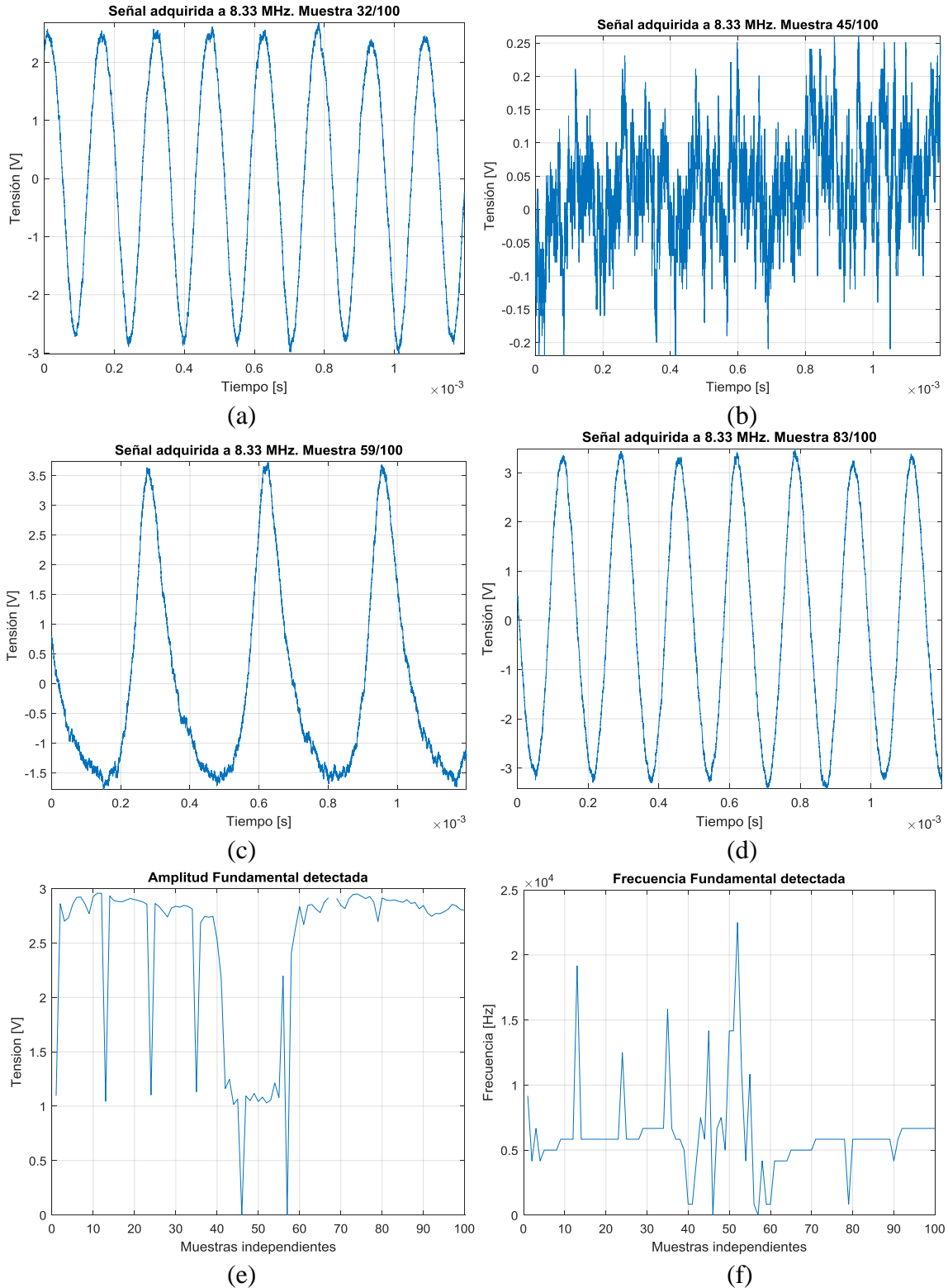


Figura 18. Representación del comportamiento del movimiento intracavidad en Láser no estabilizado (de la Figura 16). Realización: (a) 32 (b) 45 (c) 59 (d) 83. (e) Amplitudes y (f) Frecuencias, de las fundamentales detectadas.

En la Figura 18 (b) se observa que la amplitud del ruido óptico bajó a niveles de tensión cercanos a los 20 mV, y la frecuencia aumentó, pero estos no se mantuvieron a pesar de haber encendido el láser una hora antes (tiempo en donde se espera estabilidad en un láser).

Para solucionar la dificultad del ruido de la fuente láser, se cambió en el montaje el láser por uno de He-Ne a 632.8 nm de longitud de onda, estabilizado en intensidad (de la Tabla 1), observando con parámetros similares a los obtenidos con el láser caracterizado en la Figura 18, esto mostró resultados en donde la variación además de ser más lenta, se adaptaba más a los valores de ruido encontrados por la electrónica, lo que se evidencia a continuación.

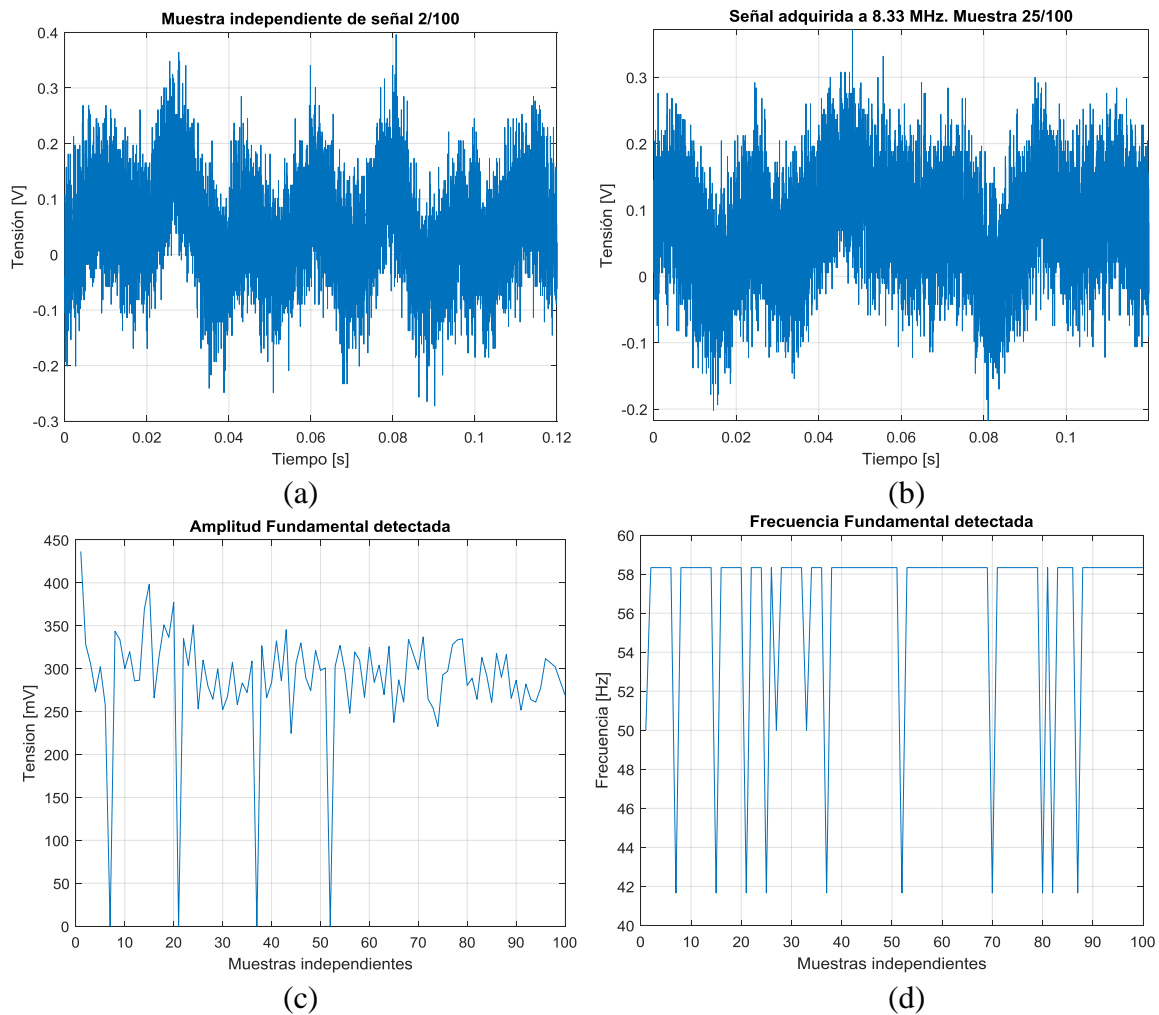


Figura 19. Representación del comportamiento del movimiento intracavidad en el Láser estabilizado. Realización: (a) 2 (b) 25 (c) Amplitudes y (d) Frecuencias, fundamentales detectadas.

De la Figura 19 se observan dos cosas importantes, la primera, que la amplitud de la tensión en la Figura 19 b), c) y d) es mucho menor y más estable que en los otros casos (por tal motivo fueron descartados, véase Figura 18), las discontinuidades que se presentan son por inconvenientes en la cuantización, donde la señal fue muy pequeña. La segunda, en frecuencia algunos de los cambios coinciden con las discontinuidades en tensión y otros son atribuidos al valor de frecuencia más baja detectable, pues la componente de frecuencia continua no se analiza en este caso. Retomando con las ecuaciones 18, 19 y 20 (referentes a la caracterización del bandeo para las distancias entre espejos, objetivo y periodo de las franjas), el movimiento intracavidad se expresa a partir del cambio aleatorio en la frecuencia temporal mostrado en los resultados de la Figura 18 y la Figura 19, los cuales son la representación de las modificaciones en la frecuencia espacial. Con esta evidencia, se usó un filtro electrónico analógico para mitigar el efecto en la adquisición de la señal, sobre todo en el primer caso (Figura 18) donde la amplitud de la tensión es grande por la aleatoriedad, sin embargo, esta misma aleatoriedad afecta por igual la amplitud de las frecuencias indeseadas y las deseadas, por lo cual la utilización del filtro también fue descartada.

La intensidad es el factor determinante en la estabilidad del láser, ya que, tiene que ver con la estadística de las fuentes de luz cuasi monocromáticas, que se modelan con una variable aleatoria Gaussiana. Sin embargo, la estadística compleja Gaussiana no es circular en general (la magnitud de su componente imaginario no es igual a la de su componente real), la media no es cero y sus varianzas no son iguales (Goodman, 2000).

Ahora, específicamente la distribución de la intensidad en el láser obedece a la estadística de Poisson, se requiere, y es lo ideal, que las franjas de Young sean lo más contrastadas posible, lo que mejora sensiblemente el muestreo con el fotomultiplicador, para ello es mejor que los dos

trenes de onda que interfieren sean lo más estables posible en amplitud, por lo menos durante el tiempo de adquisición, de lo contrario se corre con el riesgo de perder la señal.

En la práctica fue verificado que el control de la intensidad generó el menor movimiento en la cavidad y redujo significativamente el bandeo, pues, en los experimentos llevados a cabo afectó muy poco a la variación de tensión registrada en el medidor, que por su rango dinámico lo hace bastante sensible a estos cambios.

4.2 Implementación de experimentos en campo

Los experimentos fueron desarrollados en el parque tecnológico de Guatiguará, instalando los equipos, fuente (láser y óptica) en el laboratorio de Microscopía localizado en el Edificio De Investigaciones (EDI-102), el detector incluyendo el filtrado interferencial y la rendija ajustable se ubicaron en un trípode en campo con los sensores muy cerca del experimento. En la Figura 20 se muestra cada uno de los elementos que intervinieron en el montaje (del diagrama experimental mostrado en la Figura 11).

En la Figura 20 (a) se muestran algunos elementos no citados en el esquema de la Figura 11, pero que son importantes para garantizar la viabilidad del experimento como son: el periscopio y los atenuadores, un atenuador gradual para regular la potencia de salida del láser y no saturar el PMT a su llegada y el otro atenuador para que los dos haces que llegan al PMT (del orden uno del modulador acústico-óptico y del espejo), tengan una intensidad similar. El periscopio fue usado por la geografía del terreno, pues había un desnivel considerable a medida que el detector se alejaba de la fuente y se hizo necesario inclinar el haz. Asimismo, el espejo M2 de la Figura 11 no aparece en el montaje, se utilizó el divisor de haz como M2.

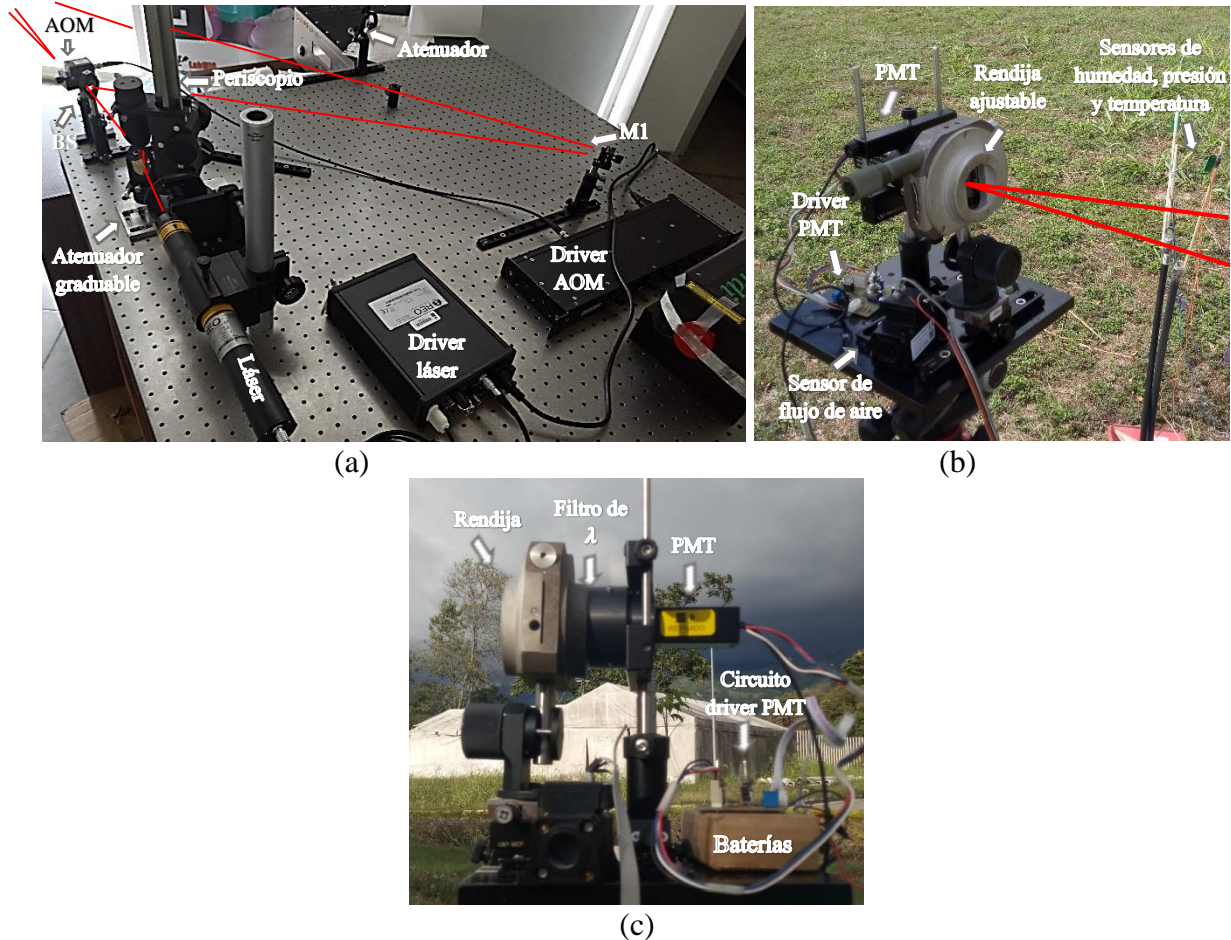


Figura 20. Implementación en campo (de la Figura 11). (a) Fuente y montaje óptico. (b) Detector y sensores. (c) Vista horizontal PMT y montaje completo de detección. AOM: Modulador Acústico-Óptico, BS: Divisor de haz, M1: Espejo 1. PMT: Tubo fotomultiplicador.

De otro lado, en la propuesta presentada para iniciar el trabajo de tesis fue aprobado utilizar una red de Ronchi calibrada, sin embargo, en esta tesis fue usada una rendija ajustable debido a inconvenientes tecnológicos de alineación que se describen a continuación:

1. El orden 1 del AOM no se encuentra en la misma ubicación que el orden 0. Es decir, cuando el orden 1 es aplicado aparece otro haz de propagación desplazado a un ángulo pequeño, pero cuando se propaga a una distancia cercana a 1 m es fácilmente perceptible. Así, la alineación de la red de Ronchi se realiza en el orden 0, el cual genera un patrón de interferencia espacial estático con el otro haz propagado a través del espejo M1 de la Figura 20 (a), entonces a partir

de una cámara instalada detrás de la red se verifica que el ángulo de inclinación de las franjas sea acorde con la red, para que la alineación sea correcta. Sin embargo, el inconveniente de implementación se presenta al desplazar la distancia de la red del orden 0 al orden 1 (y también la inclinación del espejo M1), pues se generan movimientos inherentes a la fricción de los materiales que desacoplan tal alineación angular, que luego no es posible visualizar debido a la frecuencia temporal de operación del AOM al orden 1 (las franjas se desplazan), y se debe utilizar un detector rápido como el PMT (véase Figura 21). Por lo tanto, para que la utilización de redes de Ronchi mejore los niveles de SNR, la alineación hace parte fundamental de una buena operación.

2. El conjunto de redes de Ronchi son estáticas, es decir, la calibración está dada para que cada una tenga un periodo espacial bien conocido y, las adquiridas para esta tesis permiten tanto la transmisión como la reflexión. Esto es bastante interesante, pues es una buena forma de tomar muestras a las franjas, el inconveniente radica en que teóricamente, lo mejor sería ajustar el periodo espacial con el espejo M1 al periodo de la red, o un periodo espacial múltiplo para que la alineación no sea tan complicada en la parte experimental.

En la práctica, no fue posible acoplar, a pesar de incluir varios dispositivos micromecánicos tanto en desplazamiento como en rotación.

3. Finalmente, el trabajo en campo implica condiciones de la propia naturaleza (árboles, limitaciones del tamaño en ventanas de salida del edificio donde se encuentra el haz láser, entre otras) que en muchos casos no permite el ajuste de ciertas frecuencias espaciales (como el hacer coincidir el patrón de interferencia generado a ese patrón de Ronchi) y la precisión es mucho más difícil de alcanzar (véase Figura 22).

La figura a continuación muestra que tanto el desplazamiento por inclinación dado en el espejo y la red de Ronchi generan un problema en la medición pues la alineación se pierde fácilmente.

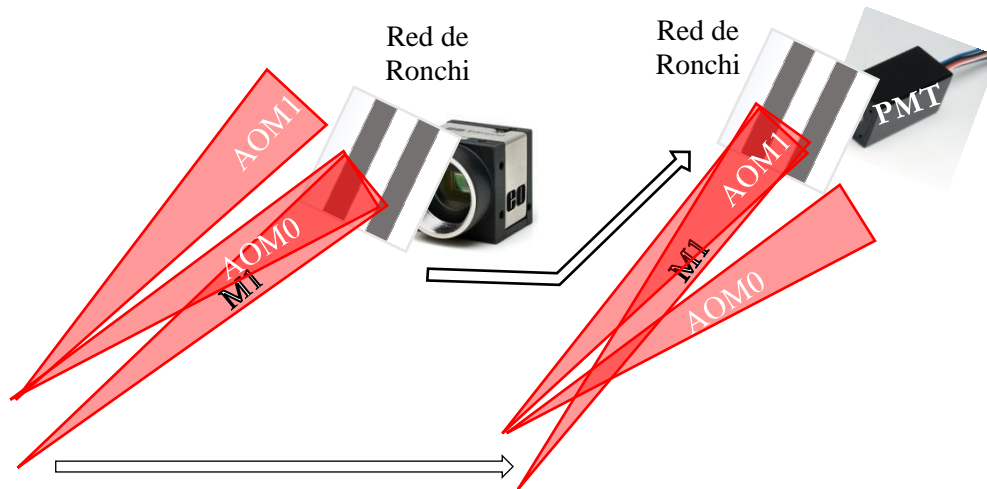


Figura 21. Desplazamiento de la red de Ronchi y del haz que viene de M1.



Figura 22. Limitaciones dadas por la vegetación.

4.2.1 Medición de distancia.

Para llevar a cabo la medición de la distancia, se utilizó el orden 0 del modulador acústico-óptico como un interferómetro común de Young, es decir, la ecuación 17 es utilizada como base para medir indirectamente, ya que se utiliza una cámara para visualizar el patrón de franjas. Así,

de la cámara se tiene el tamaño del píxel ($5.3 \mu\text{m}$), del diagrama experimental las medidas de separación de los haces y, la longitud de onda de la fuente de luz es conocida. La cámara registra varios periodos del patrón de interferencia, se calcula uno de ellos y en la ecuación se despeja la distancia " L ". La cámara utilizada tiene tamaño de píxel de $5.3 \mu\text{m}$ (Edmund Optics, 2012). En la siguiente figura, la rendija ajustable es utilizada para evitar que la luz del sol produzca ruidos adicionales o sature la cámara (cuando los datos fueron tomados de día), también fue insertado el filtro interferencial, para evitar el ruido coloreado en general.



Figura 23. Configuración de la cámara para medidas de distancia.

Los órdenes 0 y 1 que salen de la celda de Bragg (del AOM) son separados por un ángulo muy pequeño como lo indica la Figura 12, que son casi imperceptibles visualizados a una distancia de unos pocos centímetros del AOM (se observa solo un haz). A una distancia de 30 m, la separación de los dos haces fue de 50 cm aproximadamente, por lo tanto, la medida de la distancia entre los puntos A y B de la siguiente figura, incluyen una estimación dada por la hipotenusa generada en el ángulo de Bragg. Es de recordar, que la cámara no se puede instalar para encontrar el patrón de interferencia en el orden 1 debido a que la frecuencia de muestreo de cada fotograma es muy

inferior a la frecuencia de operación del AOM y al intentar registrar, no es posible encontrar las franjas.

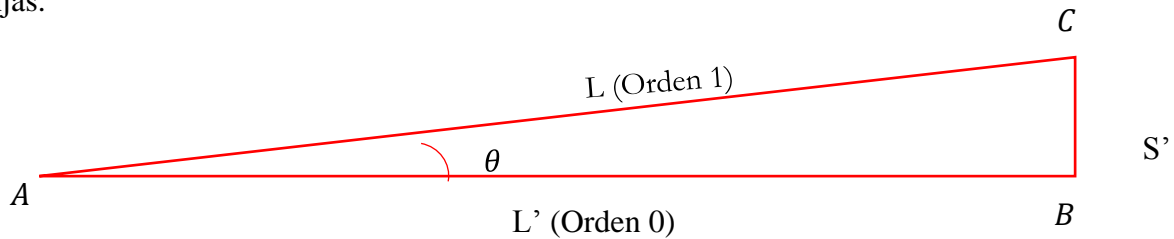


Figura 24. Estimación de la medida de la distancia. Los órdenes hacen referencia al fenómeno descrito en AOM.

Midiendo entonces la distancia S' , se tiene una mejor percepción de la distancia L' que a pesar de tener el error humano por la alineación de los haces y dispositivos se estimó para L a partir de la ecuación bien conocida del triángulo de Pitágoras por:

$$L = \sqrt{L'^2 + S'^2}. \tag{26}$$

Es evidente que el ángulo θ de la Figura 24 está dado por el ángulo de deflexión del AOM, por lo tanto, S' está definido por la ecuación del seno $L \sin(\theta) = S'$. Dado al valor pequeño de θ , se puede asociar:

$$S' = L\theta. \tag{27}$$

De esta forma, se configuraron tres distancias en campo, en donde fueron capturadas imágenes en una cámara EO - 1312C de (Edmund Optics, 2012) que describen las franjas que se generan a distancias y frecuencias diferentes (dadas por la distancia S separación de espejos) como se muestra a continuación.

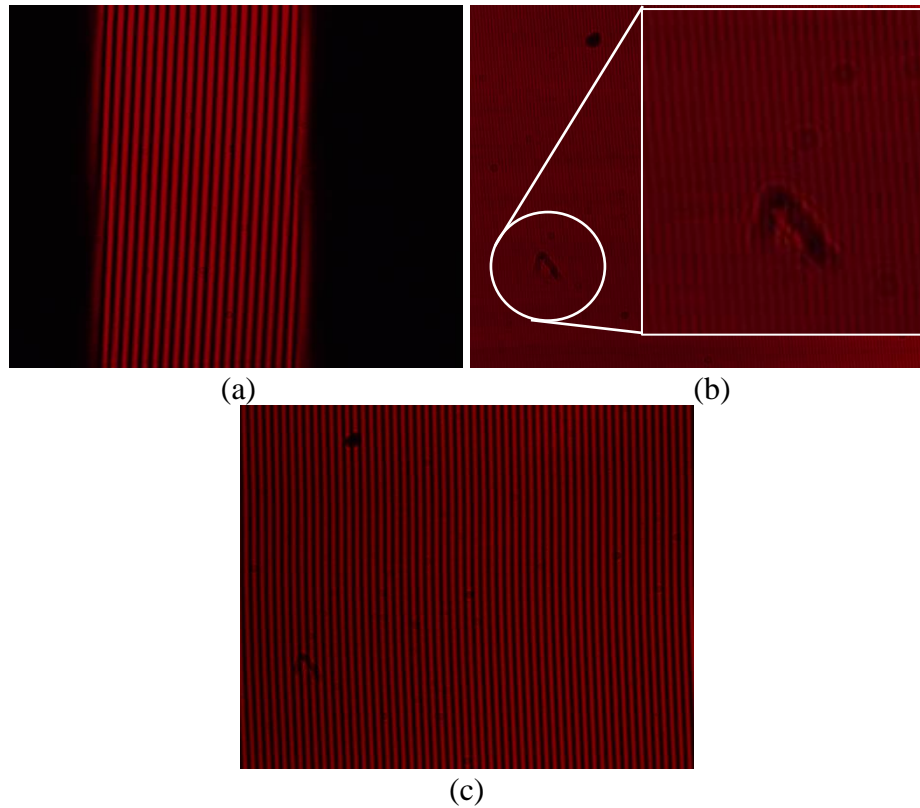


Figura 25. Imágenes de los patrones de franjas adquiridos a: (a) Distancia $L=30.88$ m, $S=12.5$ cm. (b) Distancia $L= 50.28$ m, $S=66.7$ m. (c) Distancia $L=133.89$ m, $S=69.5$ cm.

En la parte (a) fue utilizada la rendija (como en la Figura 23). En la Figura 25 (b) fue necesario hacer un zoom de la imagen pues con la resolución de esta y la frecuencia espacial configurada, las franjas no eran perceptibles a simple vista. El motivo por el cual se tomaron así fue porque durante la prueba (a), las franjas a la frecuencia más alta estaban casi al límite de la resolución de la cámara ($27 \mu\text{m}$) y sólo se visualizaba para un conjunto de cinco franjas sobre el sensor.

A partir de las imágenes de la Figura 25, se escogió la capa roja (de la imagen de la cámara CMOS) y se analizó un perfil en el centro de la imagen que cortaba perpendicularmente la imagen, de esta manera se observaron las ondas senoidales y se calculaba su periodo espacial en píxeles, que luego se convertían a metros por una ecuación lineal dada por el tamaño de pixel.

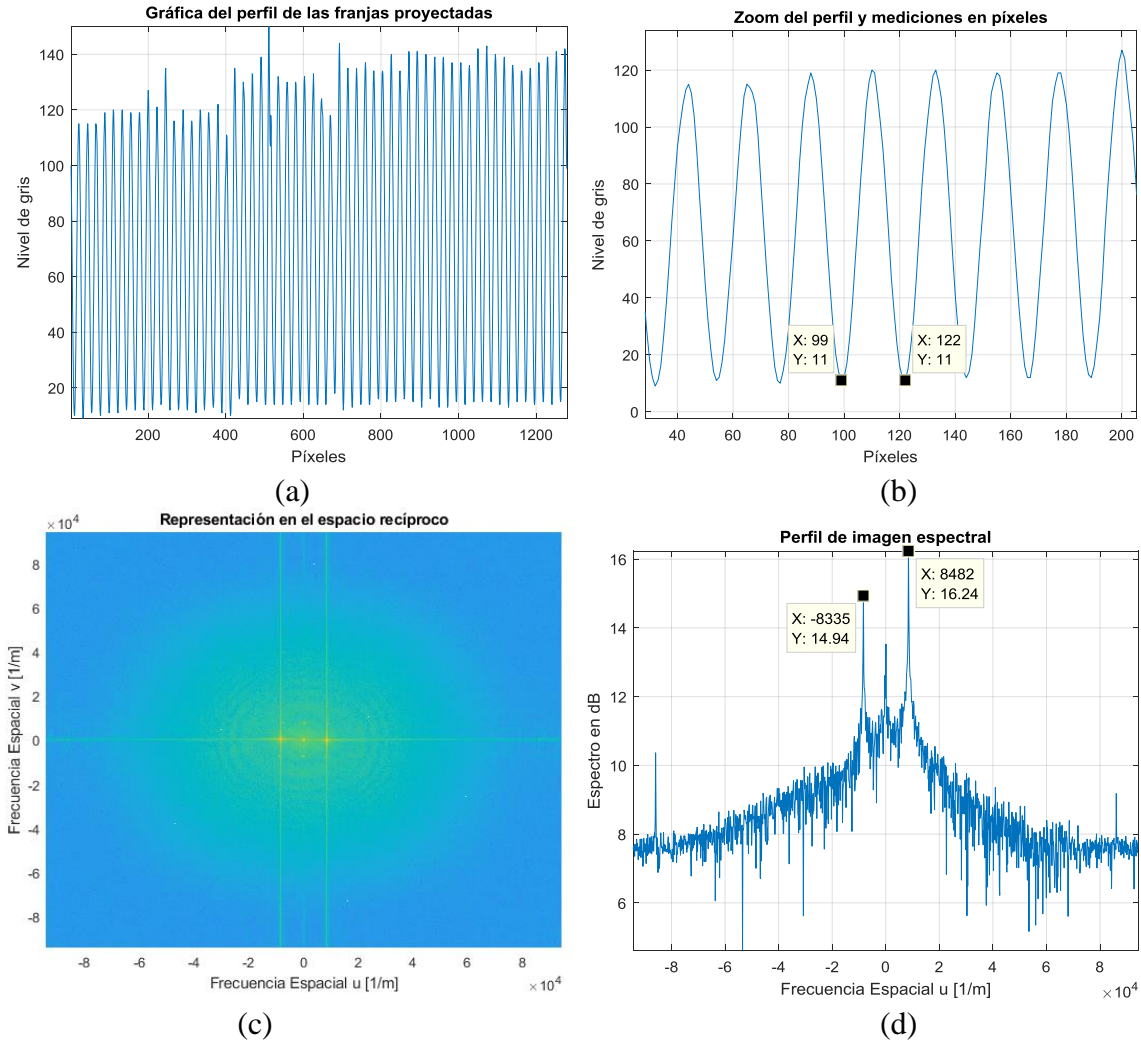


Figura 26. Perfil de franjas adquiridos a 133.88 m: (a) Perfil completo. (b) Zoom de (a) para observar su separación. (c) Representación en el espacio recíproco de la imagen de franjas completa. (d) Perfil de (c) en coordenada central horizontal.

Un ejemplo de ello es la Figura 26, donde se muestran los 1280 píxeles de resolución horizontal de la imagen y un zoom para observar la separación en píxeles de un período. En este ejercicio, se calcula la distancia entre píxeles (Figura 26 (a)) luego, su periodo espacial el cual es de 121.9 μm y a partir de allí la distancia L' de la Figura 24 (133.88 m), y con referencia a la ecuación (26) el valor L calculado es de 133.89 m. Adicionalmente, se hizo un análisis global de la imagen para verificar que la frecuencia espacial calculada se conservara globalmente. Así, se aplicó una transformación de Fourier y según los parámetros de la Figura 26 (c y d), se obtuvo un resultado

de periodo espacial de 119.2 μm , el cual confirmó que el periodo calculado directamente en el perfil del espacio directo era correcto, pues el tamaño de píxel de la cámara es 5.3 μm y el error entre las dos medidas fue de 2.7 μm , el cual está dentro del rango de error del tamaño de un píxel. El mismo método fue utilizado en cada una de las distancias de medición.

La recopilación de cada una de las configuraciones de las medidas es mostrada en la Tabla 2. En una de las distancias S (en general S_3) se tomó la imagen de referencia que fijó el lugar predeterminado en cada caso para tomar las pruebas con el PMT, y luego el espejo M1 de la Figura 20 se desplazaba encontrando el punto en donde se tenía una medida cercana a la utilizada en los casos anteriores. De ese modo, se intentó cambiar lo menos posible las distancias, pues las condiciones dadas por el tiempo que tomaba la implementación exigieron que la hora de cada prueba fuera diferente. A pesar de encontrar casos muy similares, algunos no pudieron acoplarse por completo dados los inconvenientes de la naturaleza (un árbol que se interponía o algo similar como se muestra en la Figura 22) que impedía cumplir con los objetivos de distancia de separación S estipulados en cada experimento, igualmente, la ubicación del laboratorio donde estaban instalados los equipos tampoco permitía que se obtuvieran distancias cercanas a los 100 m en cualquier dirección de propagación de los haces.

Tabla 2.
Configuraciones experimentales implementadas en campo.

Tipo de Prueba	S_1[cm]	S_2[cm]	S_3 [cm]
Distancia 1 (30.88 m)	12.5	55.5	72.5
Distancia 2 (50.28 m)	17.4	56.5	66.7
Distancia 3 (133.89 m)	10.4	46.4	69.5

Consecuentemente, al utilizar dos espejos en la técnica, su separación es la clave para la formación de un patrón de franjas de interferencia con buena resolución ($121.9 \pm 5.3 \mu\text{m}$ a 133.88 m), por lo tanto, es pertinente incluir la comparación con la resolución clásica (criterio de

resolución de Rayleigh), la cual indica que para resolver dos puntos, se deben utilizar lentes que obedezcan la ecuación 4.36 de la referencia (McKechnie, 2016): $\theta \approx 1.22\lambda/D$, donde λ es la longitud de onda, D el diámetro de la lente que se necesita para discriminar dos puntos separados un ángulo θ . Según lo encontrado en las mediciones y los cálculos realizados, el diámetro estimado para una lente equivalente es de 1.43 m y si se quisiera aumentar la distancia para mantener la resolución, se debería instalar otra lente.

Teniendo el montaje experimental para las mediciones, se implementaron alternamente simulaciones y experimentos en laboratorio para hacer la medición del parámetro C_n^2 , lo cual se describe en la siguiente sección.

4.3 Simulaciones y primeras pruebas en laboratorio

El primer paso en las simulaciones fue comprobar la robustez de la técnica de desenvolvimiento de fase, primero para señales ideales y luego agregando un poco de ruido a la señal $x(t)$ del diagrama de bloques de la Figura 17. Las señales simuladas estuvieron en contextos muy similares a las características dadas por defecto en el osciloscopio y los dispositivos que intervienen en el experimento, tal como lo muestra la Tabla 3. El ancho de banda que se indica en esta tabla hace referencia al filtrado digital que se utiliza para discriminar solo la frecuencia a estudiar y está centrado en la frecuencia fundamental.

Tabla 3.

Variables dadas por los equipos tomadas para la simulación.

Variable	Valor	Equipo utilizado
Frecuencia de muestreo	2.5 GHz	Osciloscopio Fluke 190-504
Frecuencia fundamental	80 MHz	Modulador acústico-óptico
Número de muestras	10.000	Osciloscopio Fluke 190-504
Ancho de banda	40 MHz	PC-Matlab ®

En el algoritmo desarrollado, se va generando una señal que representa una ventana de adquisición como lo muestra la Tabla 3 y que se va desplazando cada 4 segundos (esto corresponde al tiempo de comunicación entre el osciloscopio y el software de adquisición en el PC dado por el fabricante), en los cuales la fase inicial puede variar dependiendo del tiempo en donde se haya tomado la muestra. El resultado de aplicar el diagrama de la Figura 17 son las fluctuaciones de fase, que en términos ideales debe ser menor a lo calculado con los parámetros dados en la ecuación 25, que en este caso, $\Delta\theta = 2\pi * \frac{8e7}{2.5e9} = 0.2 \text{ rad}$. La figura siguiente describe una iteración del algoritmo en donde se observa la señal de entrada en la parte superior (las 200 primeras muestras de las 10.000 enviadas), en la parte inferior, las fluctuaciones a partir del algoritmo (interpolación de primer orden) aplicado a las 10.000 muestras.

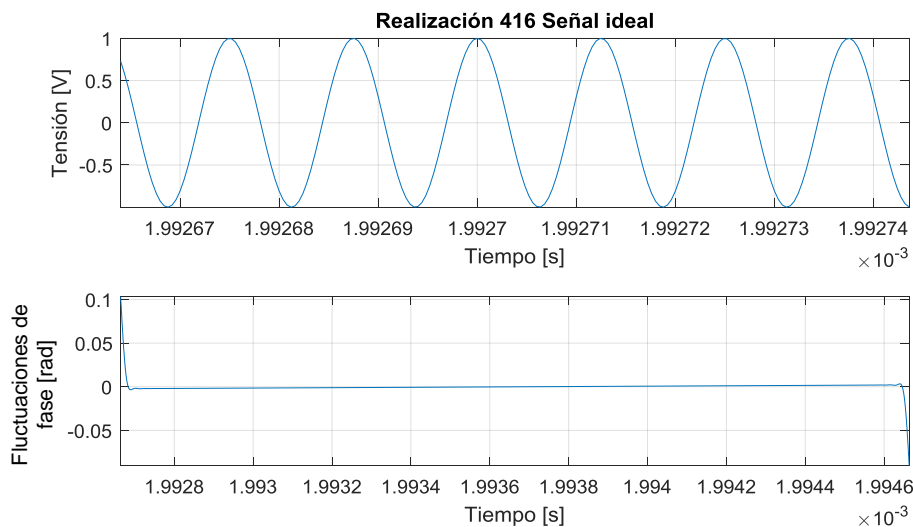
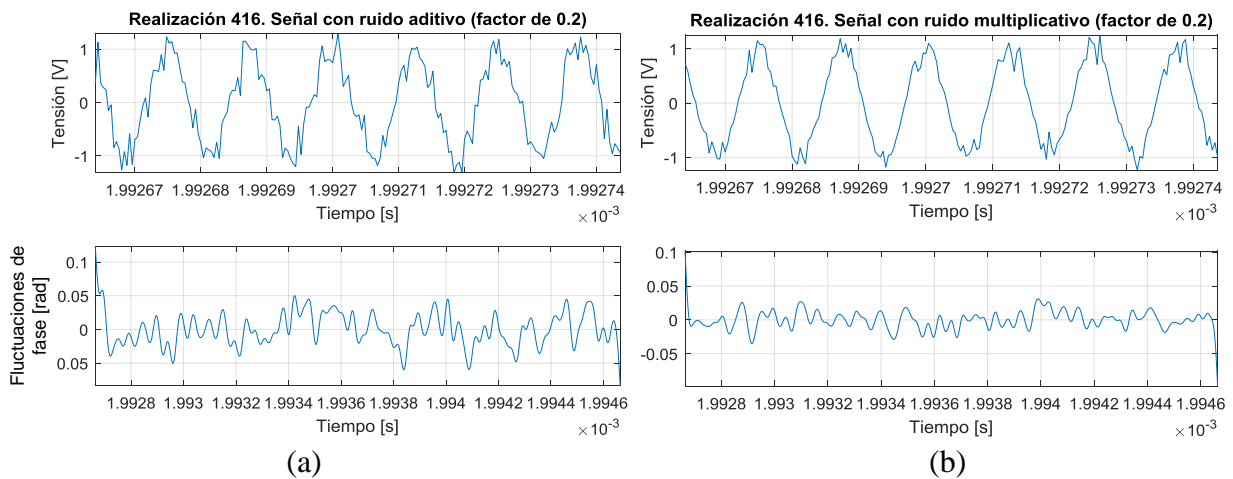


Figura 27. Simulación de la técnica de desenvolvimiento de fase. Arriba: Señal. Abajo: Fluctuaciones de fase.

En la Figura 27 es interesante observar que las fluctuaciones son muy mínimas y están por debajo del límite que observamos con el $\Delta\theta = 0.2 \text{ rad}$ calculado, lo cual indica que las fluctuaciones de fase son mucho menores, y adicionalmente que las condiciones de los bordes generan algunos inconvenientes por el enventanado “cuadrado” dado por encontrar un número no

entero de periodos y que su fase inicial siendo una onda senoidal, no inicie en cero (0), en este caso no es tenido en cuenta un valor de offset. Entonces, a partir de la ecuación 15 se generó ruido aditivo, multiplicativo y su combinación (dando valores aleatorios de ruido Gaussiano a las variables a y b) mostrado en la siguiente figura, con el procedimiento usado en la Figura 27 (señal arriba y fluctuaciones abajo). El factor de 0.2 hace referencia a la amplitud del ruido utilizada.

Es interesante observar en la siguiente figura, la inmunidad al ruido aditivo y multiplicativo de la técnica, los cuales no generaron una desviación mayor a la presentada por la ecuación 25. A partir de este primer análisis a los algoritmos, se hizo una primera aproximación a pequeña escala en el laboratorio, donde se utilizó una distancia L de propagación de 13 m (entre fuente y detector), longitud de onda de 632.8 nm y una separación de haces de 2.2 cm con referencia a la Figura 11. Debido a que el tiempo de adquisición total es de 4 μ s, las variaciones en cada realización no son independientes estadísticamente según la hipótesis de turbulencia congelada (>100 ms). Sin embargo, cada toma corresponde a una muestra independiente de la atmósfera.



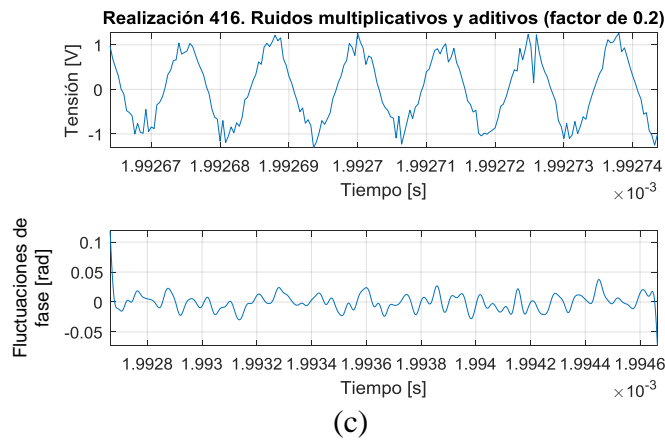


Figura 28. Simulación de la técnica de desenvolvimiento de fase a señales ruidosas. (a) Ruido aditivo. (b) Ruido multiplicativo. (c) Combinación de ruidos aditivo y multiplicativo.

La siguiente figura es una representación de cada una de las muestras adquiridas y de las diferentes realizaciones. Los datos en el eje de las abscisas representan el tiempo de adquisición (4 μ s), el color hace referencia al valor de tensión recibido en el osciloscopio (enviado por el PMT) y el eje de las ordenadas representa cada una de las realizaciones. Para las adquisiciones en el osciloscopio se activó el modo AC.

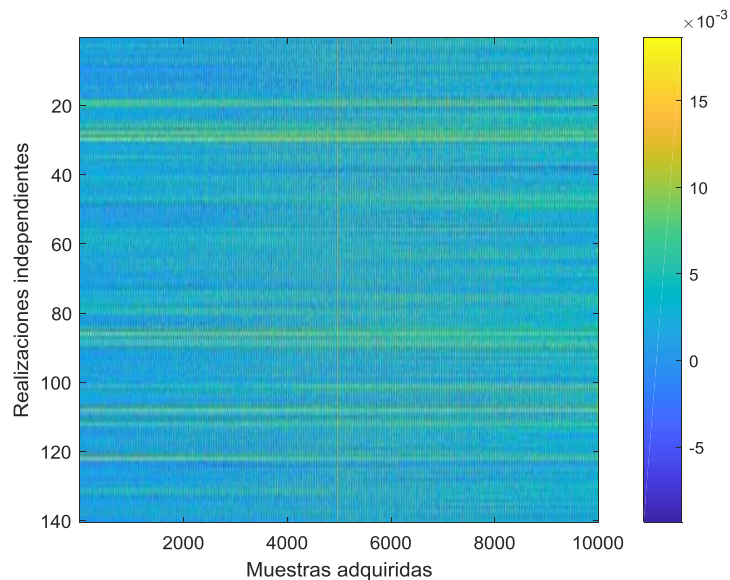


Figura 29. Representación en dos dimensiones de las muestras adquiridas. La barra lateral describe la escala de tensión en Volts.

A pesar de las pequeñas variaciones en la amplitud de la señal presentadas en la Figura 29, el análisis de cada una de las señales se ejecutó para corroborar que la amplitud desplegada tuviera un contenido acorde a lo esperado, por ejemplo, según la frecuencia de operación, entre otras. De esa manera se toma una realización independiente como se muestra a continuación.

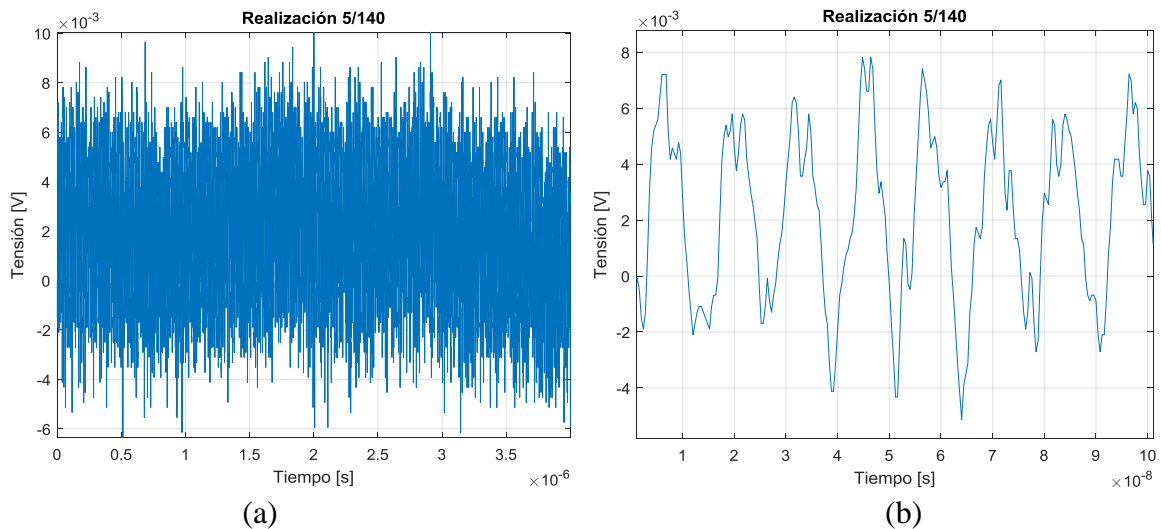


Figura 30. Realización 5 de 140 adquirida del PMT. (a) Representación completa de la señal. (b) Acercamiento a los primeros 10 ns.

En la figura siguiente, son mostrados los parámetros de frecuencia fundamental detectada y la amplitud a dicha frecuencia, estos cálculos se hacen a partir de la búsqueda de la mayor magnitud en los vectores encontrados a partir de los algoritmos de FFT y evaluando la correspondencia con el índice de dicho vector en donde está ubicada la frecuencia temporal continua de la señal.

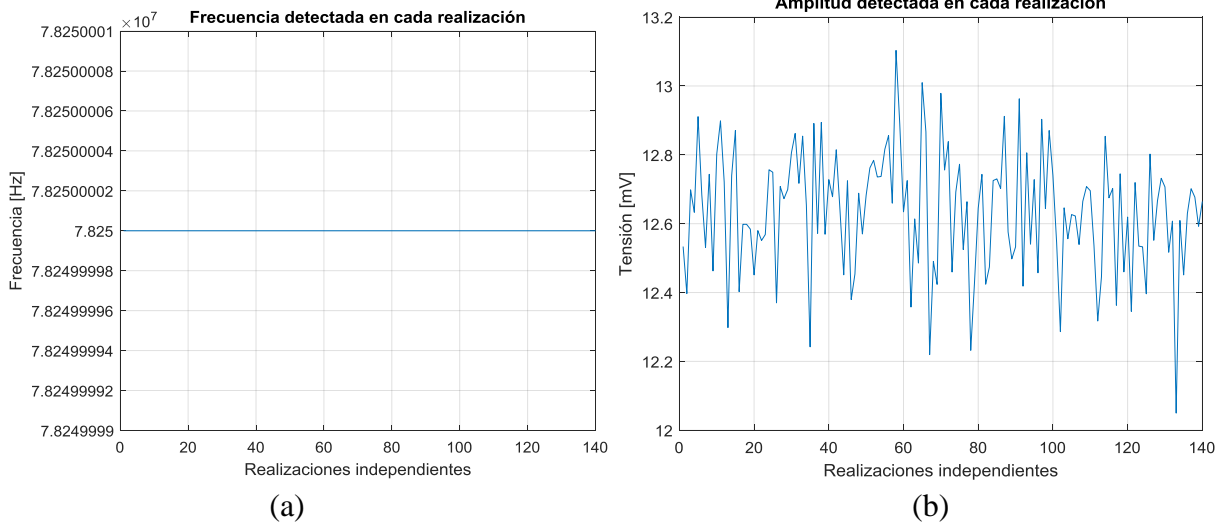


Figura 31. Detección calculada. (a) Frecuencia fundamental. (b) Amplitud a la frecuencia fundamental.

Después de corroborar las señales adquiridas, el método de desenvolvimiento de fase es aplicado. Es de aclarar que en este caso sólo se muestran $2 \mu\text{s}$ debido a que el método sólo toma la mitad de las muestras desde la FFT como se describe en la siguiente figura. Allí es claro que, en la realización experimental, la fase alcanza a tomar unos pocos valores que pasan del $\Delta\theta = 0.2 \text{ rad}$, sin embargo, son muy cercanos a tal valor, motivo por el cual la fase pudo tener una leve variación debida al medio, o por un pequeño movimiento del aire durante la toma de datos.

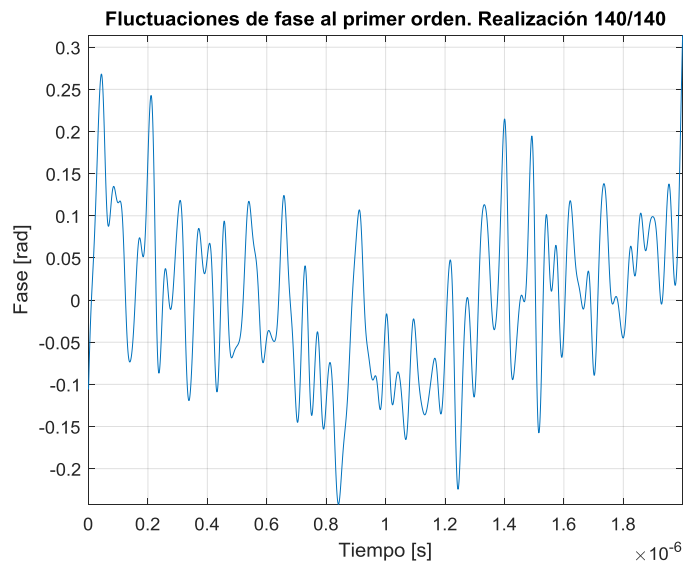


Figura 32. Fluctuaciones de fase al primer orden en la última realización.

Sin embargo, a pesar de las estimaciones dadas para este primer orden se hace necesario sintetizar cada uno de los datos obtenidos, siendo así que se toman valores como el promedio y la desviación estándar de cada realización. El primero de ellos arrojará un valor cercano a cero según lo cercana que sea la aproximación de la línea recta a la fase desenvuelta (algo que también se podría inferir visualmente de la Figura 32), si la aproximación no es lineal, entonces, los valores promedio no serán cercanos a cero. Por su parte, con la desviación estándar se hallan variaciones locales de segundo orden como es mostrado seguidamente.

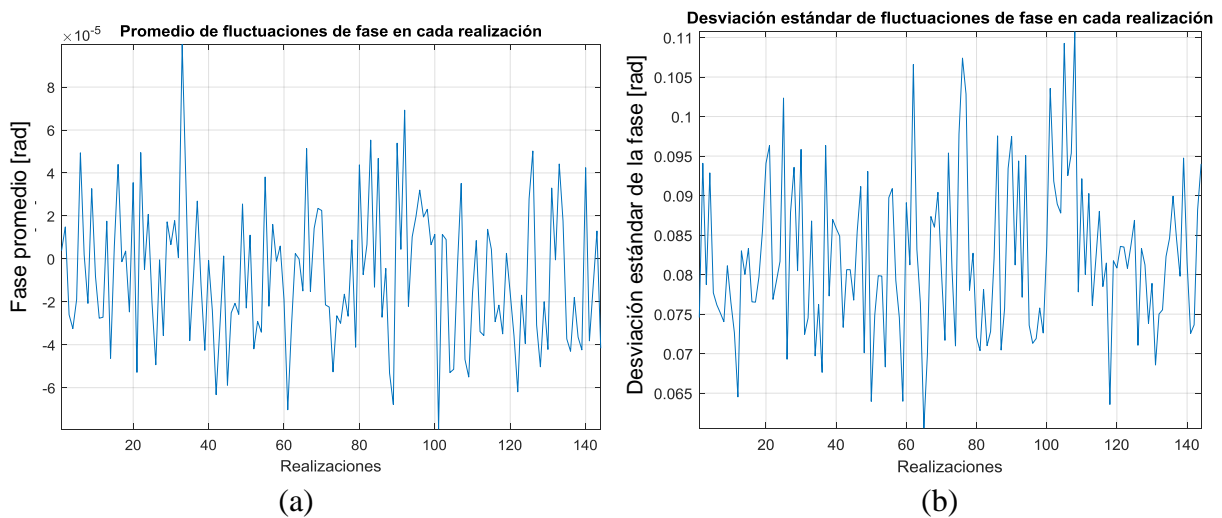


Figura 33. Valores por realización. (a) Fase promedio (Promedio global: -7.6×10^{-16} rad).

(b) Desviación estándar de la fase (Promedio de las desviaciones: 0.0821 rad).

Teniendo en cuenta el análisis de la desviación estándar de la fase, en la ecuación 5.35 de la referencia (Labeyrie et al., 2006) y de una forma más general en la ecuación 8.5-39 de la referencia (Goodman, 2000) teóricamente se muestra:

$$D_{\phi}(\theta) = 2.91k_0^2\theta^{5/3} \int_0^h C_n^2(z)z^{5/3} dz, \quad (28)$$

donde el ángulo θ indica que hay una pequeña desviación angular en la propagación del haz, z es la variable referente a la distancia de propagación del haz. Ahora, para modificar la función

estructura de un solo haz hacia las franjas de interferencia de Young en un camino horizontal cercano a la tierra, se incluye la ecuación 18, de la referencia (Randunu Pathirannehelage, 2015):

$$D_{\phi}(\theta) = 43.1 C_n^2(0) \frac{S^{5/3} L}{\lambda^2}, \quad (29)$$

donde $C_n^2(0)$ es el parámetro estructura del índice de refracción a nivel del suelo. La siguiente figura muestra el método llevado a cabo para identificar esta función estructura.

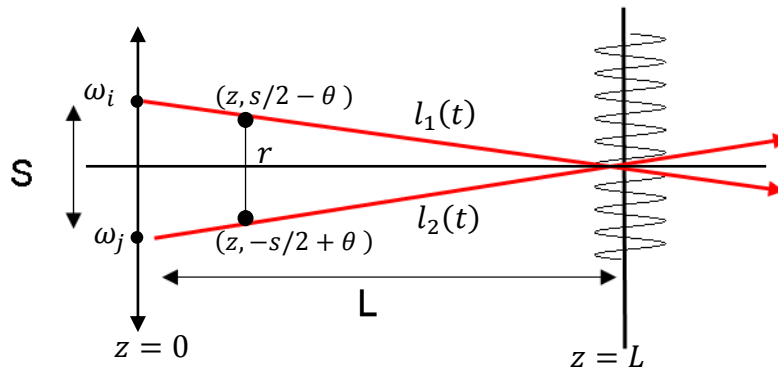


Figura 34. Configuración de las variables identificadas en el interferómetro de Young para modificar la función estructura de la fase.

En la Figura 34 son descritos los elementos utilizados, esto es, los puntos de donde es tomado el radio r propio de la función estructura y que está referido a la distancia S de separación de los espejos en la Figura 11, la variable z que describe la distancia de propagación que va desde la fuente de luz ($z = 0$) hasta el punto en donde se produce el patrón de interferencia ($z = L$). Los caminos de propagación de cada haz son descritos por $l_1(t)$ y $l_2(t)$.

Luego, retomando los resultados de la Figura 33, debido a que el problema se basaba en el seguimiento de la fase, en la referencia (Randunu Pathirannehelage, 2015) (ecuación 20) era importante intentar reducir el número de realizaciones a partir de un modelo que tiene en cuenta la desviación estándar de la fase:

$$\sigma_{\phi}(z) = \left\{ \frac{4\pi^2 C_n^2(0)}{\lambda^2} \int_0^L \left\{ \int_0^z \left[(z''^2 + [2L - (2z - z'')]^2 \theta^2)^{\frac{1}{3}} - z''^{\frac{2}{3}} \right] dz'' \right\} dz \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (30)$$

En esta ecuación hay tres variables, la primera L que se relaciona la distancia de propagación (z), la segunda correspondiente al parámetro estructura del índice de refracción C_n^2 y la tercera la desviación estándar de la fase. Entonces, a partir del parámetro de desviación estándar de la fase calculado en la Figura 33 y los parámetros ya conocidos como la distancia de propagación y la longitud de onda de la fuente, se lanzaron simulaciones para estimar el comportamiento del C_n^2 que se presentan a continuación.

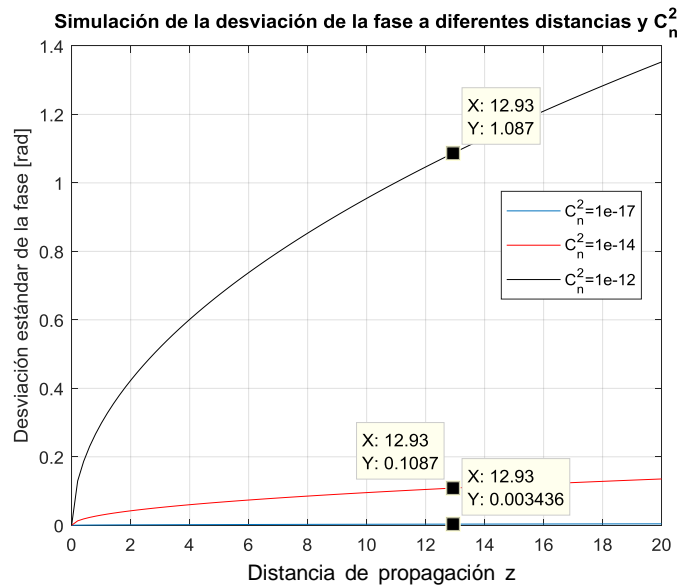


Figura 35. Aplicación de la solución de la ecuación 30 a diferentes $C_n^2(0)$.

La Figura 35 muestra la iteración de tres (3) valores de C_n^2 , para los cuales se integró respecto a la distancia en cada uno de ellos y la desviación estándar de la fase que se espera según la ecuación 30. Se hizo énfasis en la distancia de propagación de 13 m para observar en qué valores se podría estimar la turbulencia, dónde el valor de desviación de fase describe un C_n^2 un poco menor a $1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ (valor cercano al promedio global de las desviaciones 0.0821 encontrado en la Figura 33) y mucho mayor que $1 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ que se clasifica como moderada según (Kwieceń, 2019), sin embargo, se observa que para C_n^2 múltiplos de 100, la desviación en la fase se desvía en 10 rad como se puede visualizar en la Figura 35 los valores $C_n^2 = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ y

$C_n^2 = 1 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ (los valores de desviación de fase fueron de 1.087 y 0.1087 rad). La separación entre espejos S fue de 2.7 cm y la distancia L de 6.2 m. Un resumen de los resultados comparados es mostrado a continuación.

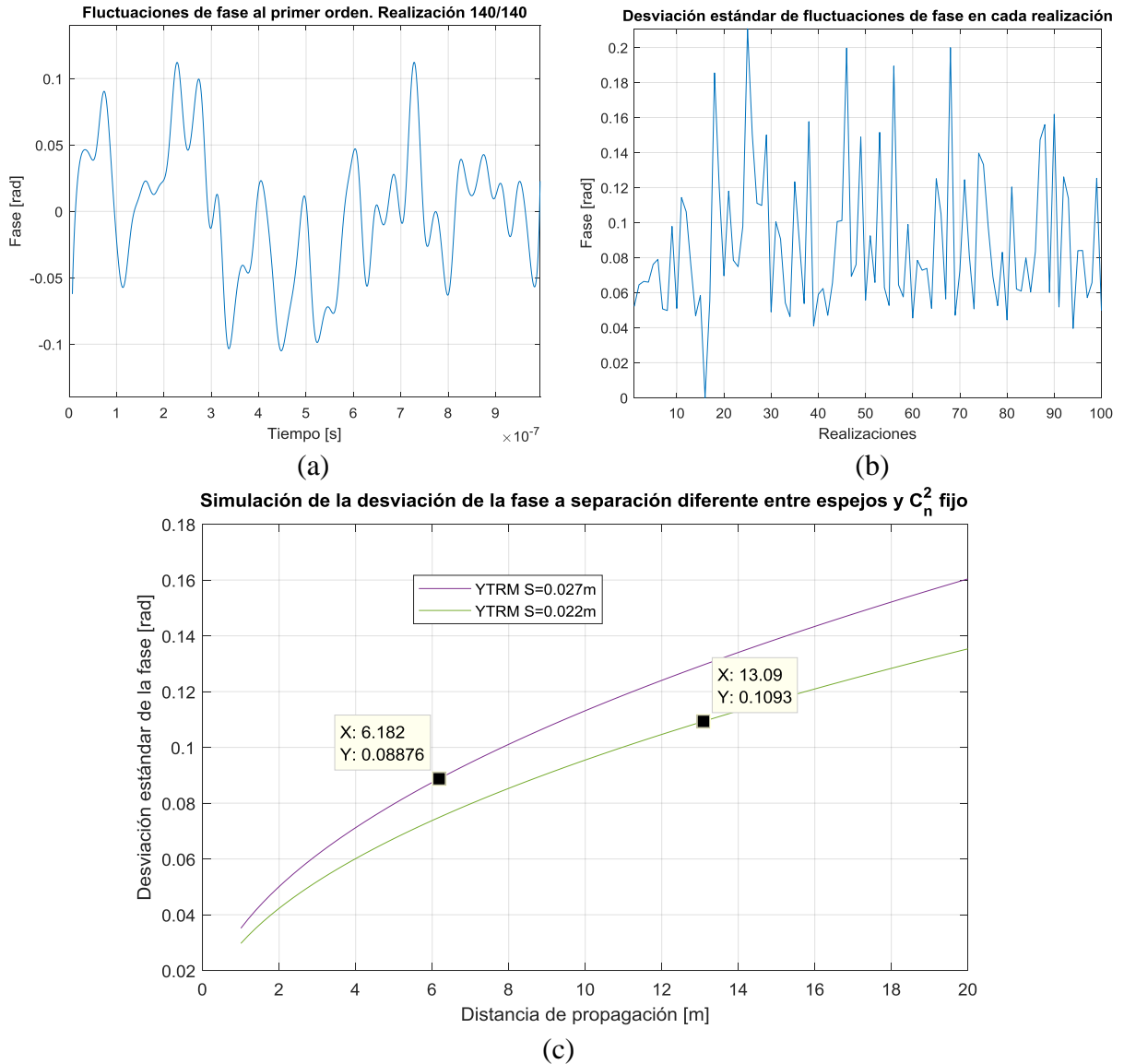


Figura 36. Cálculo de las fluctuaciones y sus desviaciones. (a) Fluctuaciones de primer orden. (b) Desviación estándar de las fluctuaciones de primer orden (promedio de las desviaciones 0.08806 rad). (c) Simulación para encontrar curvas de separación de espejos S de 2.2 y 2.7 cm para un $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} m^{-2/3}$

En la Figura 36 se observa la importancia de la distancia S , pues según la estimación del modelo los valores distan muy poco a pesar de ser prácticamente el doble de la distancia horizontal, pues

la curva describe una desviación de la fase mayor si la separación entre espejos S es más grande, claramente asociado a la disminución de la correlación de la turbulencia entre los dos caminos recorridos por las ondas electromagnéticas que conforman el interferómetro de Young. Es decir, para una distancia fija de propagación, si los espejos están más separados, la medida de la desviación de fase es más sensible a pesar de tener el coeficiente C_n^2 fijo. De igual manera, el objetivo de la técnica se adapta muy bien al resultado.

4.4 Ejecución de experimentos en campo

Con los experimentos diseñados en laboratorio, se pusieron a punto los algoritmos y el hardware para la ejecución en campo, las partes del hardware para mediciones de las variables físicas referentes al diseño de los circuitos electrónicos, diseño de tarjetas, simulaciones, pruebas de laboratorio, entre otras actividades administrativas para la selección y compra de los elementos, fueron desarrolladas en colaboración con (Contreras, 2016; Hernández Quintero & Rincón Correa, 2016; Herreño Vanegas & Villamizar Conde, 2016; Pinzon Sierra, 2017; Reyes Aparicio & Vásquez Caicedo, 2018) donde fueron calibrados los sensores de humedad, velocidad de aire, presión y temperatura respectivamente (en (Reyes Aparicio & Vásquez Caicedo, 2018) se integraron los sensores en una sola tarjeta electrónica), que son mostrados a continuación.

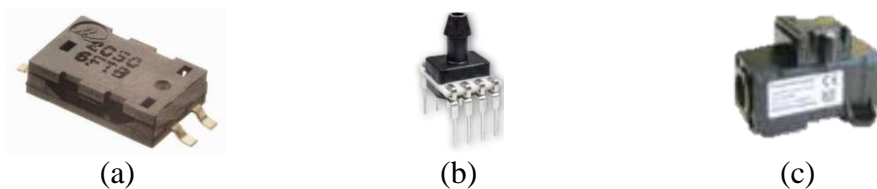


Figura 37. Sensores utilizados. (a) Humedad relativa y temperatura. Fuente: (Measurement Specialties, 2008). (b) Presión. Fuente: (Honeywell, 2017). (c) Velocidad de flujo de aire. Fuente: (Honeywell, 2015).

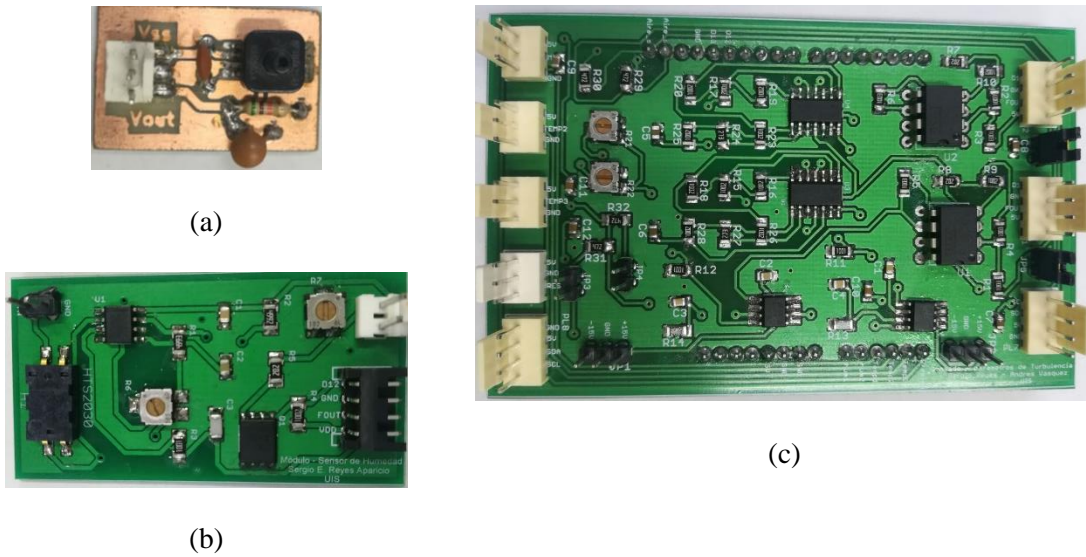


Figura 38. Tarjetas implementadas para: (a) Sensor de presión. Fuente: (Pinzon Sierra, 2017). (b) Humedad relativa y temperatura. Fuente: (Reyes Aparicio & Vásquez Caicedo, 2018). (c) Tarjeta de comunicación entre los sensores y el sistema de desarrollo. Fuente: (Reyes Aparicio & Vásquez Caicedo, 2018).



Figura 39. (a) Sistema de desarrollo utilizado. Fuente: (STMicroelectronics, 2015). (b) Software implementado para pruebas.

La electrónica para la medición de estos sensores tuvo varias etapas, tanto en hardware como en software, lo cual se resume en las tarjetas mostradas en la Figura 38, toda fue montada en un solo sistema de desarrollo que fue programado para obtener los resultados de esta tesis como lo muestra la Figura 39. El sistema de desarrollo se escogió por los diferentes protocolos, el costo y las facilidades de visualización en pantalla, lo cual era versátil a la hora de realizar las

adquisiciones ya que, si ocurría alguna falla en cualquier medida, se podía verificar o reparar antes de iniciar las pruebas.

Es de aclarar que, para la implementación en campo, la alimentación de los circuitos fue con baterías para poder transportar los circuitos a cualquier lugar; el software fue adaptado para almacenar las variables en archivos de texto con un formato específico en una tarjeta extraíble en el sistema embebido y ajustar los tiempos a los utilizados en las ventanas de pruebas tomadas en campo.

Así, empezaron los experimentos, en dónde se presenta un registro fotográfico de una de las distancias medidas (50.27 m), la traslación que debía hacerse del detector y la importancia de tener las cámaras portátiles (en celulares) para poder estimar que tan separados estaban los haces o simplemente instalar el trípode y los demás elementos (para después alinear con mayor detalle), es de recordar que la potencia de salida del láser fue de 3 mW (láser que operó correctamente para las pruebas de bandeo mostradas en la sección 4.1), por lo tanto, encontrar el haz de día era bastante difícil pues las reflexiones en la naturaleza o en las pantallas que se utilizaban eran fácilmente saturadas por la luz solar, siendo la cámara una herramienta eficaz para saber si el haz se encontraba en la dirección correcta, y pues a pesar de que este tipo de tareas era más sencilla hacerla de noche, era más riesgoso, pues debido a la oscuridad era más fácil encontrar obstáculos que podrían generar accidentes y la instalación de los sensores de las variables físicas y demás equipos de noche era también más difícil por el número de conexiones que eran necesarias, y el cuidado que se debía tener con los equipos.

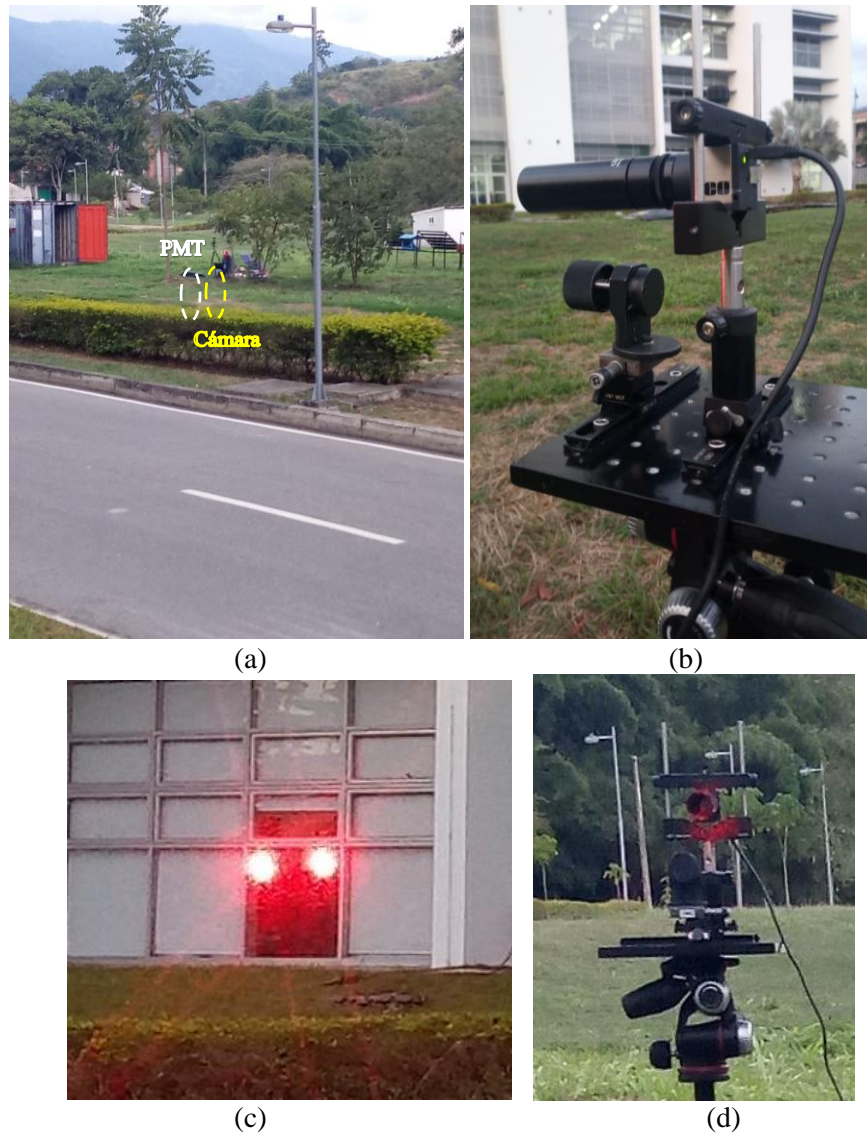


Figura 40. Sistema de medición en campo. (a) En amarillo: Cámara instalada. En blanco: Lugar donde debía ser instalado el PMT por la desviación del primer orden de AOM. (b) Cámara acoplada a tubo para evitar en lo posible ruido coloreado del sol (vista lateral). (c) Haces propagados a 47 m (antes de llegar a la cámara o en el proceso de alineación). (d) Los dos haces apuntando al sensor de la cámara (afinando su posicionamiento).

Después de la primera distancia, se intentó hacer este tipo de labores en el horario en que el sol se ocultaba, sin embargo, a veces la lluvia impedía hacer las mediciones. En la Figura 40, se observan los pasos que se siguieron para hacer una medición. En la Figura 40 (a), se muestra en

amarillo la posición actual del trípode en donde se verificaba la distancia, en blanco se muestra el siguiente paso, que corresponde al corrimiento del sistema de detección, para medir con el PMT.

En la Figura 40 (c) se observan los dos haces separados una distancia, en donde no hay interferencia, la separación S en esta figura corresponde a la más larga, la cual está dada por las limitaciones de la mesa de trabajo y el ángulo de inclinación (que a su vez está limitado por el ancho del marco de la ventana de salida del laboratorio, en donde estaba instalada la fuente de luz) para llegar a la ubicación del detector. Debido a que después de la primera medición se cambiaba la separación S (dejando fijo el haz con el primer orden del AOM) moviendo el espejo M1, la imagen del spot se debía visualizar en la cámara portátil como una referencia para estimar la nueva alineación.

Por otra parte, las condiciones ambientales son de gran importancia debido a que son una de las principales causas, sino la principal, del cambio del índice de refracción tal como lo denota la ecuación 3.6 en la referencia (Mckechnie, 2016)

$$n_{TPM} = n_{TP} + P_M \left(3.7345 - 0.0401 \frac{1}{\lambda_0^2} \right), \quad (31)$$

donde n_{TPM} , hace referencia al índice de refracción del aire húmedo, λ_0 es la longitud de onda experimental en un rango de 0.2 a 2 μm , P_M es la presión parcial debida al vapor de agua expresado en mbar y n_{TP} está expresado en la ecuación 3.3 de (Mckechnie, 2016) así:

$$n_{TP} = 1 + (n_s - 1) \left(\frac{P[1+P(60.1-0.972T)(10^{-8})]}{960.9543(1+0.003661T)} \right), \quad (32)$$

donde la temperatura T está en $^{\circ}\text{C}$, la presión P está en mbar y n_s es un valor que está entre 1.000277838 y 1.000277848 dependiendo de la longitud de onda utilizada para realizar la medición.

De esta manera, las condiciones ambientales registradas se presentan con sus fechas de pruebas y el orden en que se tomaron cada una de las mediciones resumidas en la Tabla 4, allí se muestran

las variables físicas medidas (valor medio \pm desviación estándar) para poder estimar su comportamiento.

Tabla 4.

Variables físicas del ambiente medidas durante las pruebas.

Fecha	L[m]	S[cm]	T °C	P [psi]	RH [%]	$\overline{v_{aure}}$ [m/s]
23/08/2019	30.88	12.5	27.65 \pm 0.37	13,03 \pm 0,06	83.01 \pm 10.56	3,02 \pm 0,16
11/09/2019	30.88	55.5	30.54 \pm 1.11	12.90 \pm 0.34	81.44 \pm 1.23	2.92 \pm 0.81
11/09/2019 ⁵	30.88	72.5	26.54 \pm 0.86	13.11 \pm 0.32	81.77 \pm 0.73	2.86 \pm 0.41
13/09/2019	50.28	17.4	20.88 \pm 0.35	13.22 \pm 0.03	83.92 \pm 0.86	2.86 \pm 0.01
13/09/2019	50.28	56.5	21.65 \pm 0.37	12.96 \pm 0.04	82.85 \pm 0.79	2.86 \pm 0.01
13/09/2019	50.28	66.7	22.73 \pm 0.26	13.11 \pm 0.13	79.97 \pm 0.77	2.86 \pm 0.01
20/09/2019	133.89	69.5	28.85 \pm 0.83	12.68 \pm 0.33	81.13 \pm 0.53	2.89 \pm 0.07
02/10/2019	133.89	46.4	27.63 \pm 0.38	13.20 \pm 0.05	84.10 \pm 0.68	2.89 \pm 0.11
02/10/2019 ¹	133.89	10.4	20.52 \pm 2.84	13.10 \pm 0.18	82.76 \pm 0.36	2.85 \pm 0.01

Evidentemente en la Tabla 4, la segunda fila fue la que tuvo mayor variación en los parámetros medidos, y según las ecuaciones 31 y 32 era de esperarse, para los valores de presión y temperatura que impactaran con mayor incidencia la variación del índice de refracción y por lo tanto de la turbulencia, pero en esta técnica no es directa la afectación en el valor de las variables físicas.

Mientras que las variables físicas prácticamente no cambian para la tecnología disponible, esto por la escala de su medición utilizada y/o el sensor de medida, la atmosfera exhibe realizaciones del orden del tiempo estimado para la atmósfera congelada, es decir entre 50 y 150 ms.

Por lo tanto, para cada una de estas pruebas, fueron ejecutados los algoritmos para el cálculo del centelleo (σ_I^2), el parámetro de estructura del índice de refracción C_n^2 y de la escala interna l_0 a partir de las ecuaciones (7-9), recordando que $\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1$, $\sigma_I^2 = 1.23 C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}}$ y $l_0 = \left(\frac{\sigma_I^2}{12.8 C_n^2 L^3} \right)^{-\frac{3}{7}}$. Los valores son también resumidos en la Tabla 5, la cual indica cada una de las distancias de propagación L , las distancias de separación de los haces S y los valores de los parámetros de turbulencia antes mencionados.

⁵ El cambio de temperatura es debido a la hora del día de la captura de los datos.

Tabla 5.

Parámetros de turbulencia calculados.

L[m]	S[cm]	$C_n^2 \left[m^{-\frac{2}{3}} \right]$	σ_I^2	l_o [mm]
30.88	12.5	$2.1(10)^{-15} \pm 0.16(10)^{-15}$	$2(10)^{-4} \pm 0.12(10)^{-4}$	7.2 ± 0.67
30.88	55.5	$6.2(10)^{-15} \pm 0.88(10)^{-15}$	$6(10)^{-4} \pm 0.81(10)^{-4}$	3.2 ± 0.028
30.88	72.5	$2.4(10)^{-15} \pm 0.05(10)^{-15}$	$2.3(10)^{-4} \pm 0.05(10)^{-4}$	5.2 ± 0.06
50.28	17.4	$2.9(10)^{-15} \pm 0.07(10)^{-15}$	$6.8(10)^{-4} \pm 0.17(10)^{-4}$	5.2 ± 0.067
50.28	56.5	$1.9(10)^{-15} \pm 0.05(10)^{-15}$	$4.5(10)^{-4} \pm 0.12(10)^{-4}$	5.3 ± 0.068
50.28	66.7	$1.4(10)^{-15} \pm 0.04(10)^{-15}$	$3.2(10)^{-4} \pm 0.09(10)^{-4}$	2.7 ± 0.025
133.89	69.5	$2(10)^{-16} \pm 0.04(10)^{-16}$	$2.8(10)^{-4} \pm 0.06(10)^{-4}$	10 ± 0.27
133.89	46.4	$9.5(10)^{-17} \pm 0.22(10)^{-18}$	$1.4(10)^{-4} \pm 0.03(10)^{-4}$	10 ± 0.098
133.89	10.4	$2.2(10)^{-16} \pm 0.29(10)^{-16}$	$3.1(10)^{-4} \pm 0.67(10)^{-4}$	10 ± 0.47

Es interesante observar que los datos de la Tabla 5 registraron turbulencias moderadas, débiles y muy débiles según (Kwiecień, 2019), pero también es de anotar que las temperaturas reportadas en la Tabla 4 no tuvieron cambios muy fuertes como para poder haber obtenido turbulencias mayores. En el caso en el que más se pudo observar y medir tal variación, no sólo de la temperatura sino de las demás variables físicas, fue en donde se evidenció que la medida de la turbulencia fue mayor (indicada en la segunda fila de la Tabla 5). Los demás valores de turbulencia fueron muy similares, y esto está acorde con los valores encontrados en una de las caracterizaciones a partir de la humedad publicada en (Villamizar et al., 2019) que se puede observar en el Apéndice B, en cuanto a la velocidad del aire, que fue otro de los factores más influyentes, se pudo observar y medir que los valores no sobrepasaron los rangos caracterizados, que fueron publicados en (Hernandez, Rincon, Ballesteros, Tíjaro, & Torres, 2019) y que hace parte del Apéndice C.

Como se evidenció en la Tabla 4 y Tabla 5 (fila 2) existe correlación entre las variables físicas asociadas a la turbulencia atmosférica y las realizaciones de la atmósfera, en los experimentos conducidos la escala de tiempo es muy diferente, mientras que en las fluctuaciones teóricamente se considera que ellas están en el rango de la hipótesis de turbulencia congelada, escala de algunas decenas-centenas de los milisegundos, las mediciones con la tecnología disponible de las variables

físicas están en la escala de los segundos; sería muy interesante conducir los mismos experimentos utilizando sensores con respuesta en la misma escala de tiempo, además de no estar disponibles, este tema escapa del alcance inicial que se le dio al trabajo en esta tesis.

Las gráficas del comportamiento de los parámetros de turbulencia son ampliadas en la Figura 41, Figura 42 y Figura 43, en las cuales se muestra cada una de las distancias de separación de haces S en correspondencia con la distancia de propagación (en el título de cada figura) en dos tomas distintas del mismo experimento para efectos de comparación.

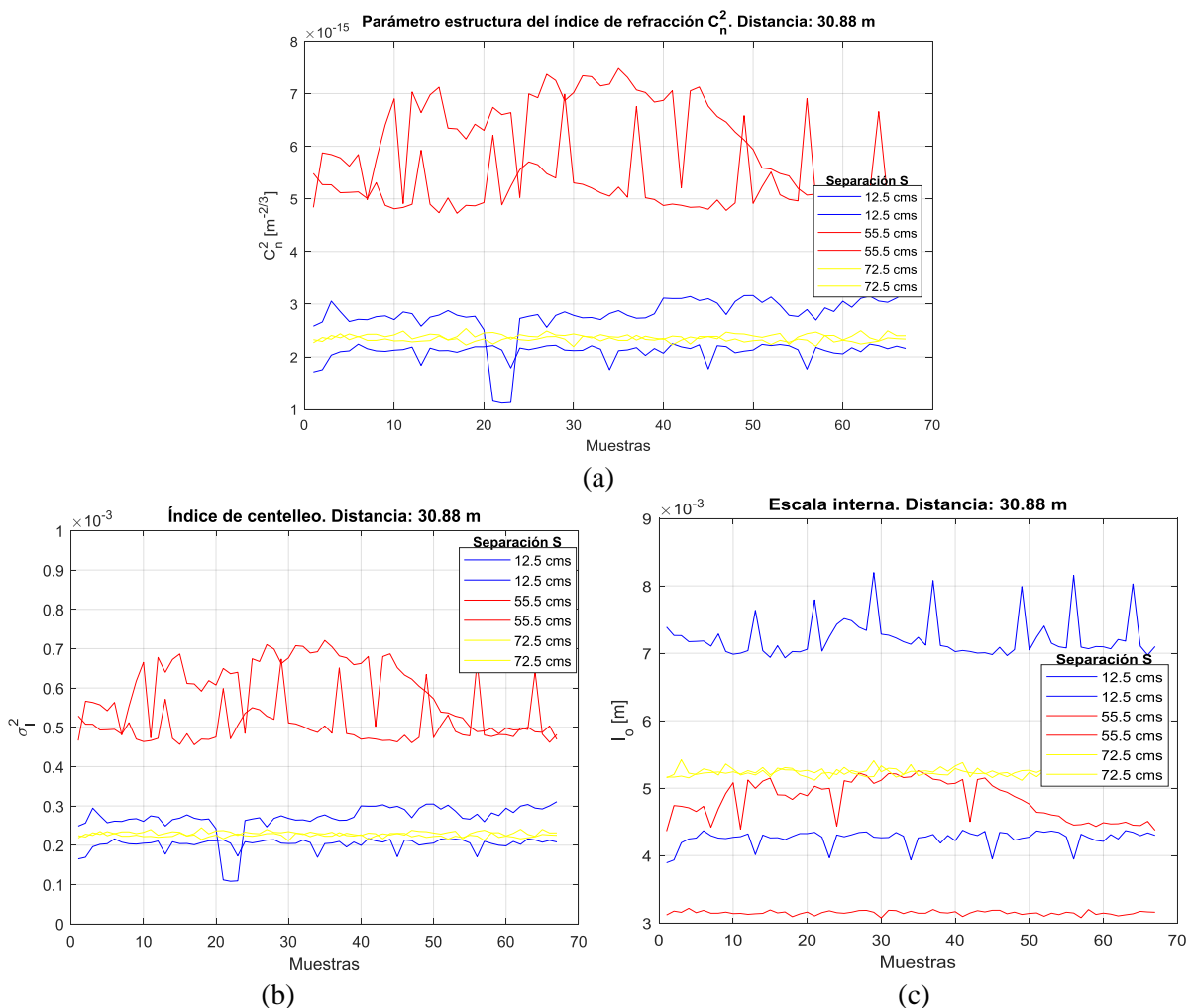


Figura 41. Parámetros de turbulencia calculados a una distancia de propagación de 30.88 m. (a) Parámetro estructura del índice de refracción C_n^2 . (b) Índice de Centelleo σ_I^2 . (c) Escala interna l_0 .

De manera similar, se siguió la sección 2.4 del marco teórico y 3.4 de la metodología para observar la simulación de la desviación de la fase y los valores obtenidos a partir de la técnica de desenvolvimiento de fase en la Tabla 6, tomando los valores de las distancias proporcionados en la Tabla 2, y los valores de C_n^2 a partir de los resultados encontrados en la Tabla 5. La Tabla 6 entonces muestra los valores de desviación de fase obtenidos ($\sigma_{\phi m}$) según los experimentos en campo, del resultado de aplicar el algoritmo de desenvolvimiento de fase de la Figura 17, y los simulados con la ecuación 30 ($\sigma_{\phi s}$) a través de la técnica descrita en la sección 4.3. Adicionalmente, en la tabla fue agregada una columna al final que lleva los valores simulados de desviación de fase (mediante la operación de módulo 2π) a valores entre 0 y 2π para efectos de comparación.

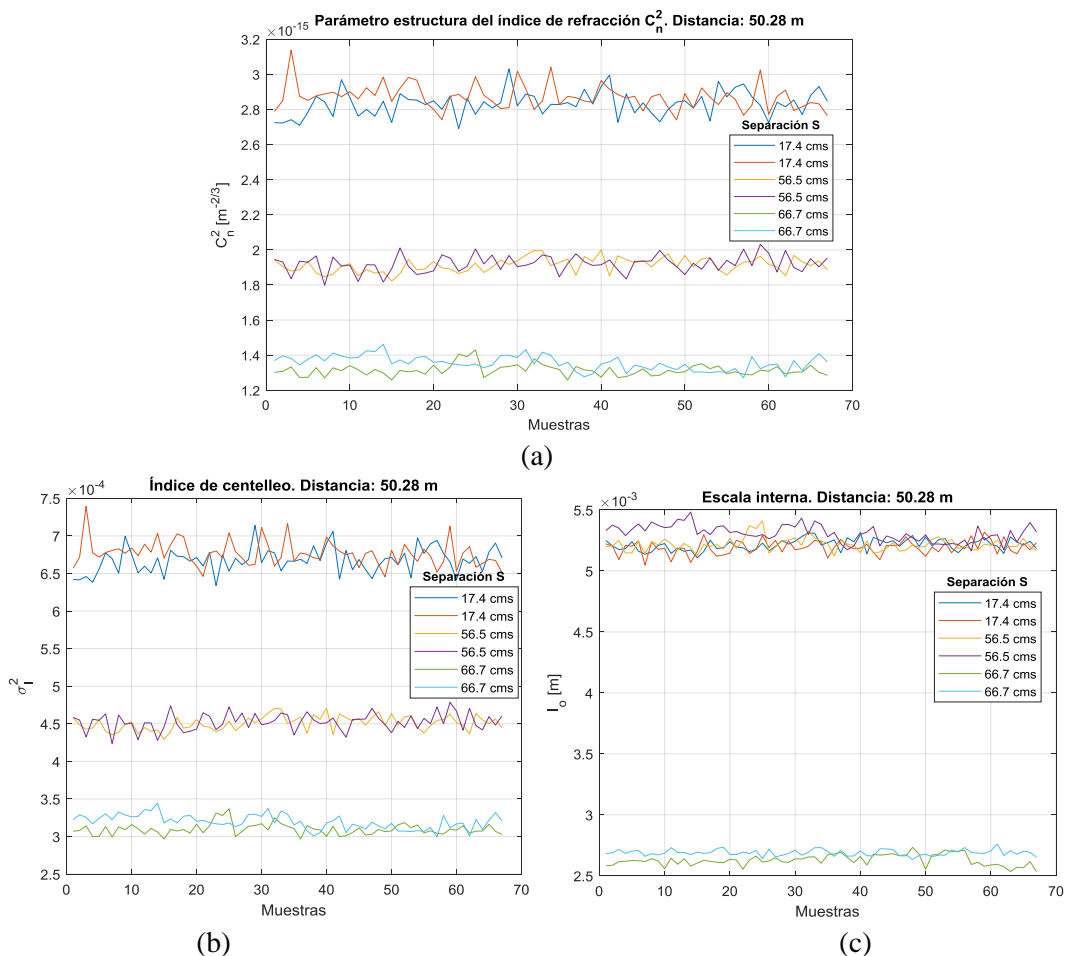


Figura 42. Parámetros de turbulencia calculados a una distancia de propagación de 50.28 m.

(a) Parámetro estructura del índice de refracción C_n^2 . (b) Índice de Centelleo σ_I^2 . (c) Escala interna l_0 .

Tabla 6.

Desviaciones de fase estimadas y simuladas a partir de las distancias y C_n^2 encontrados.

Distancia de propagación		S[cm]	$C_n^2 [m^{-2/3}]$	$\sigma_{\phi_m}[\text{rad}]$	$\sigma_{\phi_s}[\text{rad}]$	$ \sigma_{\phi_s} _{2\pi}[\text{rad}]$
Distancia (30.88 m)	1	12.5	2.1e-15	2.5 ± 0.86	13	3.6
		55.5	6.2e-15	3 ± 0.92	55	1.6
		72.5	2.4e-15	3.1 ± 1	39	4.4
Distancia (50.28 m)	2	17.4	2.9e-15	2.6 ± 0.92	26	4
		56.5	1.9e-15	2.7 ± 0.95	46	5.2
		66.7	1.4e-15	3 ± 1.1	43	2.2
Distancia (133.89 m)	3	10.4	2e-16	2.7 ± 1	34	5.7
		46.4	9.5e-17	2.7 ± 1.1	5.6	2.5
		69.5	2.2e-16	2.7 ± 0.9	27	5

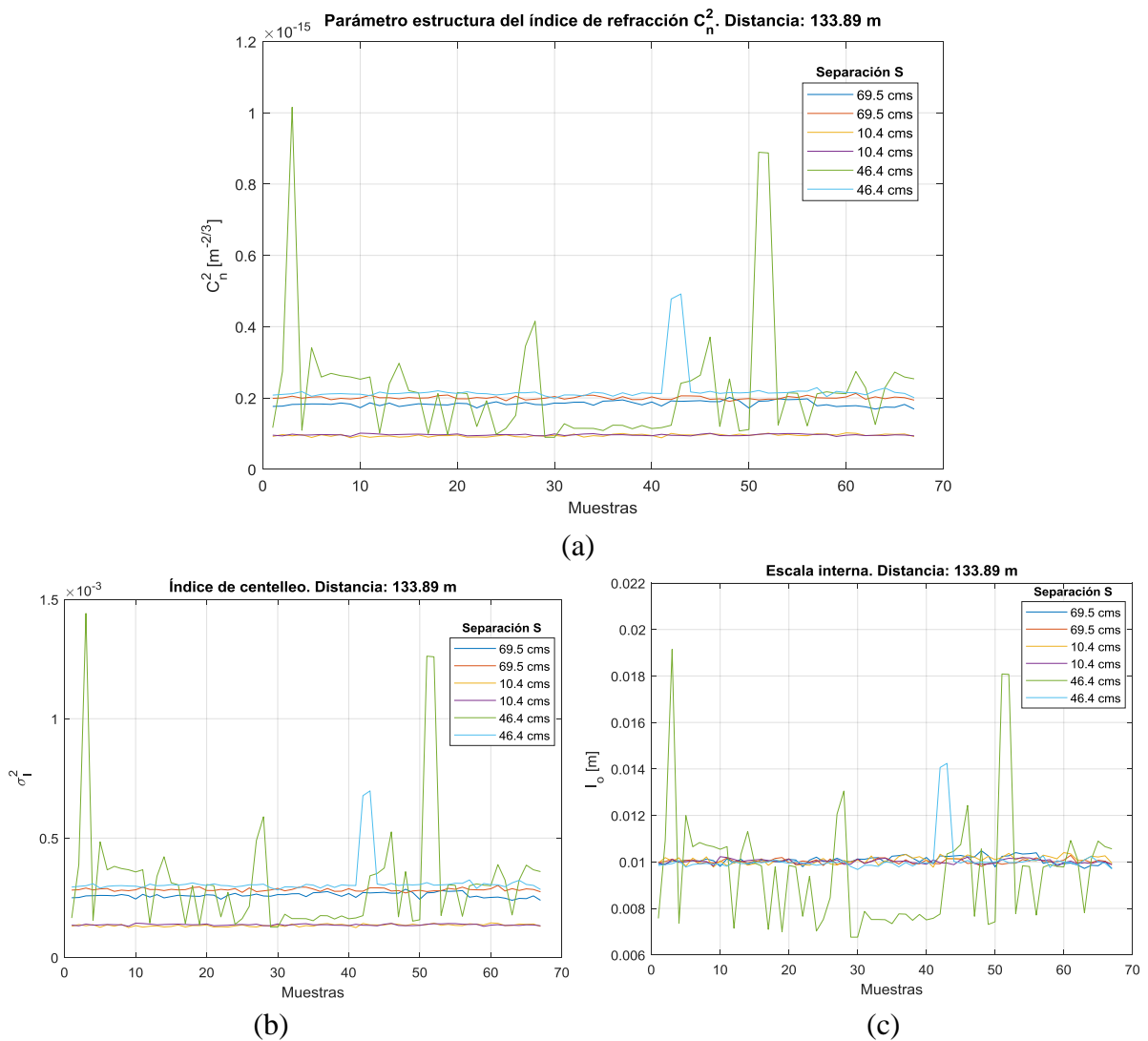


Figura 43. Parámetros de turbulencia calculados a una distancia de propagación de 133.89 m.

(a) Parámetro estructura del índice de refracción C_n^2 . (b) Índice de Centelleo σ_I^2 . (c) Escala interna l_0 .

En la Tabla 6, los resultados encontrados a partir del algoritmo de desenvolvimiento de fase aplicado a las señales adquiridas en campo han tenido variaciones de fase considerables en comparación con lo obtenido en laboratorio (véase la ampliación en la siguiente figura), las cuales pueden estar dadas debido a las mismas condiciones del ambiente ya que al propagarse la luz y estar en contacto con la naturaleza hay muchos factores que son difíciles de controlar debido a la misma evolución.

De esta manera, intentando implementar las ecuaciones 31-32, y la Tabla 4 conllevan a lanzar una hipótesis donde el valor de la magnitud de las variables físicas puede no ser tan significativo como su variación, pero es necesario mejorar el prototipo con técnicas de medición de las variables físicas más sofisticadas y en lo posible más rápidas que puedan utilizarse en campo (como se mencionó previamente).

Para la comparación hecha en esta tabla con el modelo descrito en 4.3 fue necesario llevar los valores a una escala comparable, sin embargo, la inclusión del parámetro estructura del índice de refracción dado por la ecuación 30 es proporcional a la desviación de fase, pues, la función de la ecuación 30 fue estimar el número de muestras que se necesitaban para hacer un seguimiento riguroso de la fase, por lo que la variación de este valor podría ser interesante en distancias cortas, para la cual los experimentos fueron consistentes, sin embargo para distancias largas, los experimentos no correspondieron con los cálculos estimados.

De las aplicaciones de seguridad, en esta tesis es fundamental observar que la técnica utilizada arroja resultados de algunos parámetros de turbulencia atmosférica en concordancia con las condiciones climáticas, por lo tanto, si el espacio libre es usado como canal de comunicaciones, la técnica de Telescopía de Fourier puede utilizarse para hacer un enlace óptico ya sea como base para la medición de la turbulencia atmosférica, como para verificar el mejoramiento de la

resolución de una imagen (estimada en alrededor de cien veces más que cada dimensión que la resolución clásica) como lo plantea Rhodes en la referencia (Rhodes, 2012) y previamente probado por Feldkhun en un nuevo microscopio basado en esta técnica (Feldkhun & Wagner, 2010). La adquisición de equipos especializados para medir los parámetros de turbulencia en equivalencia aproximada con los que en esta tesis se midieron tiene un costo de aproximadamente €70.000 (*scintillometer* cotizado a la empresa Scintec), y éste tiene muchas restricciones para medir a cortas distancias (<100 m) y no es aconsejable para medidas mayores a 6 km. Aunque en esta tesis no fue posible probar experimentalmente, la técnica propuesta a tal distancia, no hay evidencia ni estimación que indique que no puede operar.

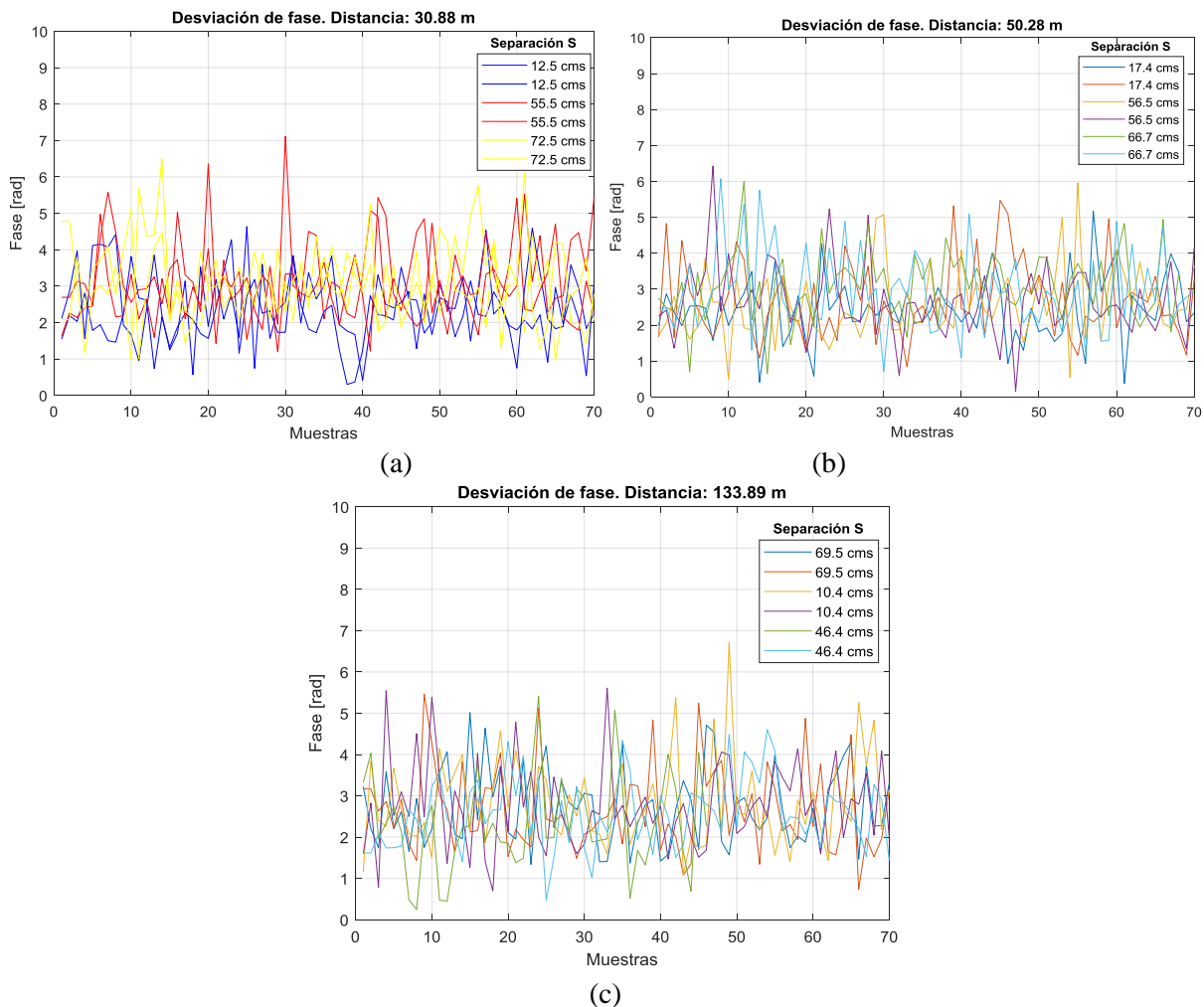


Figura 44. Desviación de fase calculada a la distancia de: (a) 30.88 m. (b) 50.88 m. (c) 133.89 m.

Respecto a la estimación de la fase, el seguimiento de ésta depende del número de muestras que se puedan registrar, el cual es derivado del análisis realizado en la ecuación 30. Por su parte, los osciloscopios tienen limitaciones de almacenamiento propias del diseño de hardware, que el usado en esta tesis es máximo de 10.000 muestras (véase Tabla 1), y a pesar de que sus características en frecuencia son pertinentes, los cálculos respecto al número de muestras expresados en la ecuación 22 ($T_{acq} = N_{samp}/f_s$) corresponden a un tiempo muy inferior a 100 ms (hipótesis de turbulencia congelada). Desde ese punto de vista, el tiempo de análisis de la turbulencia atmosférica se produce desde señales en una dimensión, lo cual requiere menor costo computacional y postprocesamiento que, al hacerlo con imágenes como lo planteó (Ballesteros, 2019).

Finalmente, es importante observar los resultados en simulación a partir del trabajo realizado en FAU (Randunu Pathirannehelage, 2015), pues fue uno de los trabajos que motivó el desarrollo de esta tesis. Por esta razón, los datos obtenidos en campo con la mayor turbulencia (fila 2 de la Tabla 5) fueron usados como insumo en simulación y su ejecución generó los resultados espaciales mostrados a continuación, donde el espacio directo corresponde a lo obtenido en un sensor 2D y el espacio recíproco corresponde a la magnitud de su transformada de Fourier.

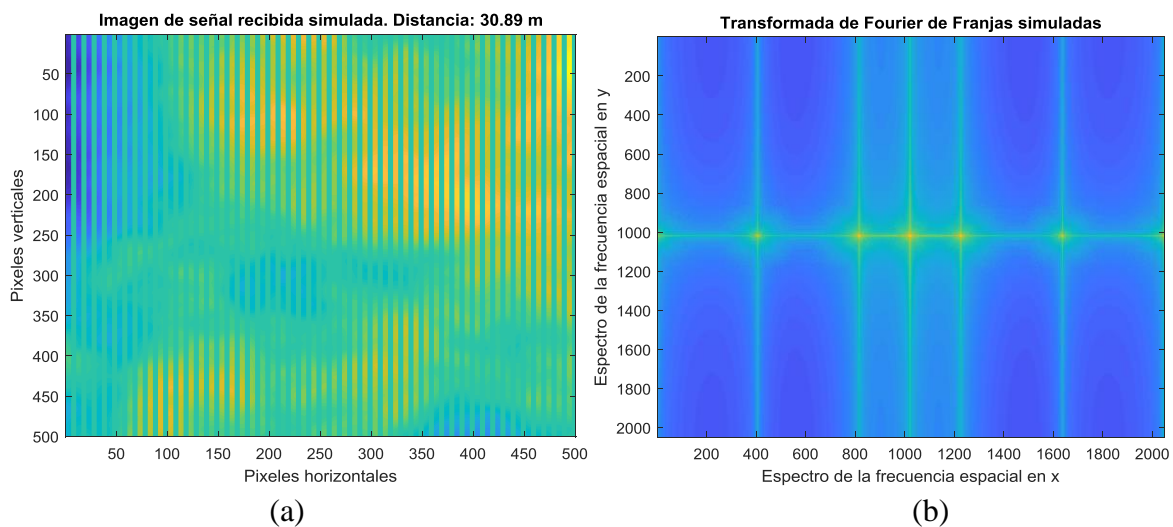


Figura 45. Imágenes generadas a partir de software de simulación. (a) Espacio directo. (b) Espacio recíproco.

Debido a que la turbulencia generada es moderada, las franjas no presentan una distorsión considerable o al menos no es notable a la vista, sin embargo, este resultado sólo se podría comparar con la imagen adquirida en la Figura 25 (a). Por tal motivo, en el software se hace una integración comparable a la detección que haría el PMT durante el tiempo en el que las franjas desfilan frente a él y se tiene la rendija ajustable. De este modo, se hace una comparación con la señal adquirida en campo y que se visualiza seguidamente.

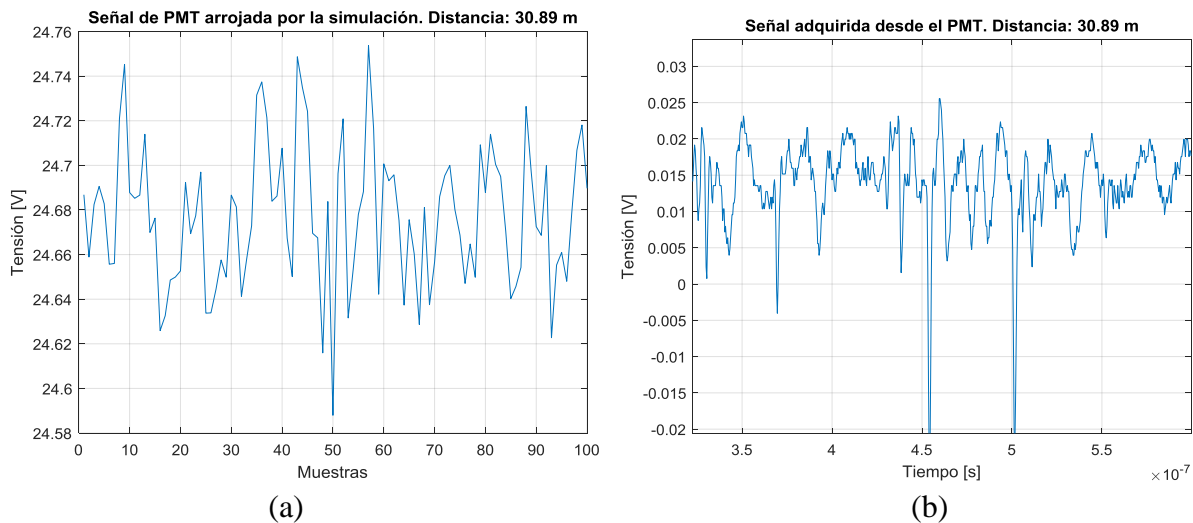


Figura 46. Comparación entre las señales adquiridas: (a) Por simulación (FAU). (b) En experimento en campo.

Dentro de las características más importantes de la Figura 46, se buscan el valor DC y la variación de la onda, obteniéndose por software un valor DC de aproximadamente 24.68 V y sus variaciones están aproximadamente en 120 mVp, el tiempo de adquisición no es especificado en la Figura 46 (a), por lo tanto, los datos se presentan como muestras. Por su parte en la Figura 46 (b) es presentada la señal adquirida en campo (realización 67), donde se utilizó el tipo de acople AC en el osciloscopio para que la cuantización (resolución en amplitud), dada por el número de bits utilizado en la digitalización, no afectara los valores obtenidos, el nivel DC para esta señal fue de 15.7V. Debido a la cuantificación las señales debían adquirirse por dos canales y poder así

obtener las pequeñas variaciones comparadas con el valor DC, pues al cambiar la cuantización automáticamente para no saturar la escala, se pierden tales variaciones.

De esta manera, es interesante observar que la señal tiene variaciones que son identificables siempre y cuando sean bien configurados los elementos de adquisición y la tensión DC es comparable también con lo obtenido en la simulación.

5. Conclusiones

Con la técnica de Telescopía de Fourier implementada se demostró por primera vez en este trabajo que sirve para medir turbulencia, lo cual permitió medir diferentes parámetros característicos de ésta a lo largo del camino óptico recorrido por la onda electromagnética al propagarse. La técnica se basa en la disposición de un interferómetro de Young donde el sistema de franjas se desplaza por la configuración acústico-óptica descrita y que toma en cuenta las frecuencias tanto temporales como espaciales para poder hacer la estimación de los parámetros centelleo (σ_I^2), escala interna (l_o) y el parámetro estructura del índice de refracción C_n^2 . Fue a través de la medida del centelleo realizada en campo que fueron calculados los parámetros l_o y C_n^2 para tres distancias de propagación y a su vez tres diferentes separaciones en los espejos. El diagrama experimental evaluado proporcionó resultados que presentan concordancia con las condiciones ambientales observadas en campo abierto.

El movimiento intracavidad del láser fue estudiado para intentar modelar su comportamiento, se implementó un montaje alterno para caracterizar este movimiento sin intervención de óptica adicional, con los equipos adquiridos que se utilizaron expresamente durante el desarrollo de esta tesis. De ese estudio salió un requerimiento importante que debe tener el láser para medir la

turbulencia, que el haz debe estar estabilizado en intensidad, pues en caso contrario se generan frecuencias temporales aleatorias adicionales acompañadas de tensiones considerables, lo cual generó una distorsión de la onda en donde se obtuvieron hasta 2 Volts pico, perturbación fuerte para el sistema digital de muestreo debido a que la señal de la onda modulada por el AOM arrojó tensiones con valores de las decenas de milivolts. Como este ruido tiene características aleatorias y se genera en cualquier momento el equipamiento utilizado no permitía su ajuste manual y el disparo automático tampoco se adaptaba fácilmente.

El hecho de utilizar un montaje óptico sin incluir lentes ni colimar el haz, aprovecha la ventaja de la propagación natural del haz láser en el espacio libre para hacer caracterizaciones de la turbulencia, en este caso, los costos de los materiales que se necesitan para la construcción de estas herramientas son mucho menos elevados (gracias a la inclusión de dos ramas importantes de la ciencia: la óptica y la electrónica) que los instrumentos actuales a nivel comercial y según los resultados encontrados en esta tesis, están acordes a lo reportado en la literatura. En los métodos observados en el estado del arte, la sensibilidad de la medición de turbulencia atmosférica implica un estudio adicional de las aberraciones de las lentes que deben ser tenidos en cuenta en los cálculos de los parámetros, o en algunos casos se utilizan implementos o montajes sencillos pero que implican ser tenido un banco de ellos en físico (por ejemplo, un conjunto de agujeros micrométricos) (Funes & Garavaglia, 2011; J. E. Millerd, Brock, Hayes, & Wyant, 2003), no son configurables a medidas a gran distancia y no permiten almacenamiento directo en dispositivos digitales.

La ventaja de utilizar un modulador acústico-óptico es poder hacer medidas de distancia en campo con alta precisión, este dispositivo ahorró bastante tiempo en horas de experimentación, pues la alineación de las franjas estáticas visibles para la cámara, en un primer paso, fue muy

cercana a la posición donde estaba el primer orden de difracción del modulador (con la frecuencia del AOM) y en general en la misma dirección vertical. De esto se pudo verificar que a una distancia de 133.88 metros se lograron visualizar en el sensor 2D de la cámara los patrones de franjas de interferencia bien definidos con un periodo espacial horizontal de $121.9 \mu\text{m} \pm 5.3 \mu\text{m}$, de esta manera, la técnica de Telescopía de Fourier representa una resolución muy buena a grandes distancias, comparada con la resolución clásica.

Para la implementación del experimento fueron utilizados elementos ópticos como el periscopio para inclinar el haz dadas las condiciones en el Parque Tecnológico Guatiguará, al exterior del edificio EDI; elementos mecánicos como el trípode de alta estabilidad y las placas de adaptación especialmente construidas, que fueron fundamentales para la instalación de los detectores (cámara y PMT); elementos electrónicos como los circuitos implementados, los cuales fueron construidos en esta tesis o en colaboración con algunos de los trabajos de grado que fueron ejecutados simultáneamente y de manera alternada. Para la alimentación eléctrica de cada uno fueron utilizadas baterías recargables. También fueron ejecutadas rutinas en lenguaje C++ para la programación del microcontrolador que recogió cada uno de los valores de las variables físicas medidas por los sensores, pues se debieron adecuar los datos para el procesado.

Las redes de Ronchi propuestas como compromiso en la etapa previa a la ejecución de la tesis, especialmente fabricadas para este proyecto, se instalaron con una base de rotación micrométrica adaptada para poder hacer una alineación del periodo espacial en el laboratorio, que en conjunto con la separación diseñada de los haces fuente que interfieren debía tener una correspondencia que permitiera que la señal temporal generase baja o alta intensidad en el detector, sin embargo, al no contar con los equipos con suficiente memoria de almacenamiento necesarios para observar tanto el periodo espacial y temporal generado en la configuración de la Figura 11, la mejora a la técnica

no pudo implementarse con las redes mencionadas (de Ronchi), sin embargo la rendija graduable utilizada operó correctamente.

La técnica de desenvolvimiento de fase presentó interesantes resultados en laboratorio, pues la comparación entre los cálculos del experimento y las simulaciones fueron lo suficientemente cercanas, sin embargo, al utilizar la técnica en las distancias ejecutadas en campo abierto, el desenvolvimiento de fase no se pudo implementar enteramente, pues el número de muestras adquiridas en cada realización fue muy pequeño respecto a lo enunciado en la hipótesis de turbulencia congelada para realizaciones independientes (~100 ms). De esta manera, se invita a emplear un dispositivo (o varios) que tenga(n) características en frecuencia similares al equipo usado, pero que el almacenamiento de las muestras independientes no se limite a ese número. Desde ese punto de vista, se podría hacer la transición entre atmósferas para estimar en cuánto tiempo se produce su cambio de una forma más sencilla que al hacerlo con imágenes implica un mayor costo computacional.

A partir de los resultados encontrados en campo, se observó que la turbulencia está afectada principalmente por los cambios sentidos en el ambiente durante la medición. Así, el caso donde se presentó el mayor valor en el parámetro estructura del índice de refracción fue precisamente cuando la desviación estándar en todas las variables físicas fue la mayor, aunque según los valores medidos de turbulencia (en la Tabla 5) fue clasificada como moderada, débil y muy débil.

6. Recomendaciones

Probar la técnica con otras fuentes láser estabilizadas de mayor potencia, que permitan encontrar los haces de una manera más rápida teniendo igualmente la protección necesaria para no afectar la salud de los investigadores y del personal de apoyo durante el desarrollo.

Utilizar sensores con módulos wi-fi o bluetooth que permitan el rápido acceso a las condiciones en campo y que estos puedan ser activados por el mismo dispositivo que mide la onda óptica para poder obtener los datos coherentemente y en el mismo dispositivo, verificando que no distorsionen la onda. De esta manera, se recomienda hacer un desarrollo a partir de un dispositivo robusto sea una FPGA o un microchip de dedicación exclusiva.

Utilizar los datos aquí encontrados para nutrir otras tesis en donde la propagación en el espacio libre sea utilizada para la prueba de protocolos de comunicaciones. De la misma forma, usar los desarrollos de hardware y software para apoyar en los casos en donde se haga necesario realizar este tipo de pruebas en campo o en laboratorio.

Utilizar la técnica en aplicaciones de reconocimiento y seguridad de objetos a largas distancias para medir su resolución mediante la onda reflejada con el ánimo de poder discriminar más allá del régimen clásico de resolución.

Cuando el detector realiza la medida, integra la energía de la onda electromagnética sobre toda su superficie y durante el tiempo de exposición, así que las variaciones locales debidas a la turbulencia atmosférica van promediadas por el área y el tiempo de detección. Así que un estudio importante a futuro es conducir experimentos utilizando detectores en estructura lineal o matricial para poder evaluar los efectos locales de la turbulencia sobre el haz láser. Otro de los aspectos importantes es que las bajas frecuencias espaciales a diferencia de las altas portan información relativa a la turbulencia en caminos ópticos muy próximos uno del otro, ya que el ángulo que permite la formación de las franjas de Young es muy pequeño. En caso de que el ángulo sea muy

grande, franjas de Young muy estrechas, es posible que los haces pierdan correlación, este es un estudio que habrá que conducir también. Lo que sí es seguro y necesario de experimentar es la evaluación del impacto del tamaño de la franja y la separación interfranja sobre los parámetros deducidos de la turbulencia por esta técnica, ya que podría convertirse en una herramienta para estudiar con mayor detalle la configuración espacio temporal de la turbulencia atmosférica.

Producción intelectual

Artículos científicos.

Título: Characterizing horizontal atmospheric turbulence from air velocity in an optical turbulence generator.

Estado: Publicado 1 de Marzo de 2020.

Revista: Optics Communications

Cuartil: Q1.

Título: Atmospheric Characterization Based on Relative Humidity Control at Optical Turbulence Generator.

Estado: Publicado 16 de Septiembre de 2019

Revista: Atmosphere.

Cuartil: Q2.

Título: Experimental study of atmosphere temperature and humidity under controlled conditions at laboratory scale.

Estado: Publicado 02 de Marzo de 2018

Revista: Óptica Pura y Aplicada.

Cuartil: Q3.

Título: Atmospheric turbulence temperature on the laser wavefront properties.

Estado: Publicado 2017

Revista: IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series.

Cuartil: Q4.

Conferencias

Internacionales

Method to measure effects of turbulence using CCD Sensors and Centroids. XIV Encuentro Nacional de Óptica y V Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones. Santiago de Cali – Colombia. Categoría: Póster. Noviembre 20 -20 2015.

Cambios controlados de temperatura en turbulencia atmosférica cercana al suelo y evaluando los efectos en el frente de onda de un haz láser. XIV Encuentro Nacional de Óptica y V Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones. Santiago de Cali – Colombia. Categoría: Póster. Noviembre 20 -20 2015.

Simple method to measure effects of horizontal atmospheric turbulence at ground level. SPIE International Symposium on SPIE Optical and Engineering + Applications, part of the SPIE Optics and Photonics 2016 Event. San Diego, California - USA. Categoría: Oral. 28 de Agosto – 1 de Septiembre de 2016. Proc. of SPIE Vol. #99790P. doi: 10.1117/12.2238045.

Measuring horizontal atmospheric turbulence at ground level from Optical Turbulence Generator (OTG) using a 1D sensor. World of Photonics Congress 2017 in conjunction with LASER World of PHOTONICS 2017, conference SPIE Optical Metrology. Munich - Alemania. Categoría: Poster. 25-29 de Junio de 2017. Proc. of SPIE Vol. #1032949. doi: 10.1117/12.2270380.

Effects of humidity and temperature in C_n^2 measurement using an Optical Turbulence Generator (OTG). XV Encuentro Nacional de Óptica y VI Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones. Bucaramanga– Colombia. Categoría: Póster. 20-24 de Noviembre de 2017.

Measuring parameters of ground-level atmospheric turbulence via Fourier telescropy. Conference SPIE Security + Defence. Berlin- Alemania. Categoría: Oral. 10-13 de Septiembre de 2018. Proc. of SPIE Vol. #107990F. doi: 10.1117/12.2323990.

Single sensor measurements based beam wander effects. X Iberoamerican optics meeting, XIII Latin-American Meeting on Optics, lasers and applications. Cancún-México. Categoría: Oral. 23-27 de Septiembre 2019.

Nacionales

Temperature effects on atmospheric turbulence about wavefront properties measured in a laser movement. V Conferencia Colombiana de Ingeniería Física. Medellín – Colombia. Categoría: Póster. 26-30 de Septiembre de 2016.

Turbulence characterization inside a device with controlled changes of temperature using Young fringes. XXVII Congreso Nacional de Física. Cartagena- Colombia. Categoría: Póster. 3-6 de Octubre de 2017.

Implemented of embedded system of acquisition fringes to study atmospheric turbulence. XXVII Congreso Nacional de Física. Cartagena- Colombia. Categoría: Póster. 3-6 de Octubre de 2017.

Locales

La Formación de Imágenes lejos de la Resolución Clásica, el Momento Angular Orbital & la Seguridad absoluta en Comunicaciones. Primer Encuentro Científico Facultad Ciencias. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga – Colombia. 25 – 26 de Noviembre de 2015.

Trabajos dirigidos de pregrado

Caracterización de los efectos de la turbulencia atmosférica sobre el camino de propagación de un haz láser a diferentes distancias horizontales y baja altura. Universidad Industrial de Santander. Estado: Trabajo de Grado concluido en Ingeniería Electrónica, 2018. Personas orientadas: Sergio Enrique Reyes Aparicio, Andrés Felipe Vásquez Caicedo. Dirigió como: Codirector.

Estudio de los efectos de la humedad en la caracterización de la propagación de un haz láser a través de la turbulencia atmosférica a bajas alturas en trayectorias horizontales. Universidad Industrial de Santander. Estado: Trabajo de Grado concluido en Ingeniería Electrónica, 2016. Personas orientadas: Jhonny Villamizar Conde, Manuel Fernando Herreño Vanegas. Dirigió como: Director.

Caracterización del efecto de la presión en la propagación de un haz láser a través de la turbulencia atmosférica en trayectorias horizontales a bajas alturas. Universidad Industrial de Santander. Estado: Trabajo de Grado concluido en Ingeniería Electrónica, 2016. Persona orientada: Wilson Yulián Pinzón Sierra. Dirigió como: Director.

Caracterización de un haz láser al propagarse en distancias horizontales y baja altura, para el estudio de los efectos de la temperatura sobre éste por la turbulencia atmosférica. Universidad Industrial de Santander. Estado: Trabajo de Grado concluido en Ingeniería Electrónica, 2015. Persona orientada: Juan Carlos Contreras López. Dirigió como: Director.

Caracterización de los efectos de la velocidad del aire en la turbulencia atmosférica por medio de la propagación de un haz láser a través de una trayectoria horizontal a bajas alturas. Universidad Industrial de Santander. Estado: Trabajo de Grado concluido en Ingeniería Electrónica, 2016. Personas orientadas: Jesús Omar Correa Rincón/Jhonatan Steven Hernández Quintero. Dirigió como: Director.

Caracterización global de la modulación en el régimen acoplado en amplitud de una matriz de cristal líquido por transmisión mediante el modelo retardador-rotor. Universidad Industrial de Santander. Estado: Trabajo de Grado concluido en Ingeniería Electrónica, 2017. Persona orientada: Cindy Jennifer Cuevas Cely. Dirigió como: Codirector.

Adquisición y Procesamiento de Imágenes provenientes de un Interferómetro a partir de un Sistema Embebido ARM CORTEX M7. Universidad Industrial de Santander. Estado: En proceso de revisión de la Propuesta de Trabajo de Grado en Ingeniería Electrónica, 2019. Persona Orientada: Anjher Gustavo Sandoval Vera. Dirige como: Director.

Referencias Bibliográficas

- Acevedo, C. H., Jérez, V. A., Diaz, C. F., Torres, Y., & Guzmán, Á. M. (2013). Recording a Beam with Integer Angular Orbital Momentum into a Photorefractive Crystal BGO. *Frontiers in Optics & Laser science, OSA Technical Digest*, 2.
- Andrews, L. C., & Philips, R. L. (2005). *Laser Beam Propagation through Random Media*. SPIE Press (SPIE Press). Washington; DC; USA.
- Augustine, S. M., & Chetty, N. (2014). Experimental verification of the turbulent effects on laser beam propagation in space. *Atmósfera*, 27(4), 385–401.
- Avila, R., Vernin, J., & Masciadri, E. (1997). Whole atmospheric-turbulence profiling with generalized scidar. *Applied optics*, 36, 7898–7905. <https://doi.org/10.1364/AO.36.007898>
- Ballesteros, A. (2019). *Parámetros de turbulencia atmosférica a escala de laboratorio utilizando telescopía de Fourier de tiempo promedio*. Trabajo de investigación para optar al título de Magíster en Geofísica. Universidad Industrial de Santander.
- Ballesteros Díaz, A., Tíjaro Rojas, O. J., & Torres Moreno, Y. (2017). Caracterización de la turbulencia al interior de un dispositivos con variaciones controladas de temperatura, utilizando franjas de Young. *Libro de resúmenes al XXVII Congreso Nacional de Física*, 715–716.
- Bertolotti, M. (2005). The History of the Laser. (T. Spicer & S. Laurenson, Eds.), 316. <https://doi.org/10.1201/9781420033403.fmatt>
- Buenahora, H. S., Tíjaro, O. J., Ballesteros, A., & Torres, Y. (2018). Experimental study of

- atmosphere temperature and humidity under controlled conditions at laboratory scale. *Optica Pura y Aplicada*, 51(49049), 12. <https://doi.org/10.7149/OPA.51.1.49049>
- Cassaing, F., Mugnier, L., Rousset, G., & Sorrente, B. (1997). Eléments-clés de la conception d'un instrument spatial à synthèse d'ouverture optique. *Proc. of SPIE, International Conferences on Space Optics - ICSO 1997*, 10570, 11. <https://doi.org/10.1117/12.2326465>
- Consortini, A., Sun, Y. Y., Innocenti, C., & Li, Z. P. (2003). Measuring inner scale of atmospheric turbulence by angle of arrival and scintillation. *Optics Communications*, 216(1–3), 19–23. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(02\)02294-0](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(02)02294-0)
- Contreras, J. C. (2016). *Caracterización de un haz láser al propagarse a distancias horizontales y baja altura: estudio de la temperatura atmosférica sobre las propiedades del frente de onda*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Contreras López, J. C., Ballesteros Diaz, A., Tijero Rojas, O. J., & Torres Moreno, Y. (2017). Atmospheric turbulence temperature on the laser wavefront properties. *IOP Conference Series: Journal of Physics*, 850(012001), 14. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/850/1/012001>
- DiComo, G., Helle, M., Peñano, J., Ting, A., Schmitt-Sody, A., & Elle, J. (2016). Implementation of a long range, distributed-volume, continuously variable turbulence generator. *Applied Optics*, 55(19), 5192. <https://doi.org/10.1364/AO.55.005192>
- Edmund Optics. (2012). EO - 1312C 1 / 1 . 8 \ " CMOS Color USB Camera. Recuperado el 1 de septiembre de 2019, de <https://www.edmundoptics.com/p/eo-1312c-118-cmos-color-usb-camera/26850/>
- Feldkhun, D., & Wagner, K. H. (2010). Doppler encoded excitation pattern tomographic optical

- microscopy. *Applied optics*, 49(34), H47–H63. <https://doi.org/10.1364/AO.49.000H47>
- FLUKE. (2011). Users Manual - ScopeMeter Test Tool 190 Series II, 152.
- Funes, G., & Garavaglia, M. (2011). *Determinación de la constantes de estructura del aire turbulento mediante interferometría Young*. Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires. Argentina.
- Galeano Traslaviña, Y. A., Tíjaro Rojas, O. J., & Torres Moreno, Y. (2015). Method to measure effects of turbulence using CCD sensors and beam centroids. *Libro de Resúmenes al XIV Encuentro Nacional de Óptica y V Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones*, 177–178.
- Goodman, J. W. (2000). *Statistical Optics*. Willey Classics Library (First). New York (USA): Library of Congress Catalog Card Number: 84-13160. <https://doi.org/10.1093/benz/9780199773787.article.b00076817>
- Goodman, J. W. (2005). *Introduction to Fourier Optics*. Mc Graw Hill. New York: Third Edition.
- Hamamatsu Photonics K. K. (2013). Metal Package PMT Photosensor Modules H11900-H11901 Series. Iwata, Japan: February.
- Hernandez, J., Rincon, J., Ballesteros, A., Tíjaro, O., & Torres, Y. (2019). Characterizing horizontal atmospheric turbulence from air velocity in an optical turbulence generator. *Optics Communications*. Available online November 5th 2019, no. 124870, In Press, Corrected Proof.
- Hernández Quintero, J. S., & Rincón Correa, J. O. (2016). *Caracterización de los efectos de la velocidad del aire en la turbulencia por medio de la propagación de un láser a través de la trayectoria horizontal a bajas alturas*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

- Herreño Vanegas, M. F., & Villamizar Conde, J. (2016). *Estudio de los efectos de la humedad en la caracterización de la propagación de un haz láser a través de la turbulencia atmosférica a bajas alturas en trayectorias horizontales*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga; Colombia.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Holm, D. (2005). Taylor's Hypothesis , Hamilton's Principle , and the LANS-Alpha Model for Computing Turbulence. *Los Alamos Science*, (29), 172–180.
- Honeywell. (2015). Airflow Sensors Datasheet Airflow Airflow Sensors. AWM700 Series, Compensated/Amplified. Golden Valley, USA.
- Honeywell. (2017). TruSTability Board Mount Pressure Sensors. Fort Mill, USA: November.
- Huntley, J. M., & Saldner, H. (1993). Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis. *Applied optics*, 32(17), 3047–3052.
<https://doi.org/10.1364/AO.32.003047>
- Jiménez, J. (2004). The contributions of A.N. Kolmogorov to the theory of turbulence. *Arbor*, 178(704), 589–606. <https://doi.org/10.3989/arbor.2004.i704.550>
- Jurado Navas, A. (2009). *Enlaces ópticos no guiados con técnicas de diversidad en canal atmosférico afectado por turbulencias*. Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad de Málaga, #1794756x.
- Kanaev, A. V., Hou, W., Restaino, S. R., Matt, S., & Gładysz, S. (2014). Correction methods for underwater turbulence degraded imaging. *Proceeding of SPIE*, 9242, 9.
<https://doi.org/10.1117/12.2066479>
- Karam, Z. N. (2007). *Computation of the one-dimensional. unwrapped phase*. 2007 15th International Conference on Digital Signal Processing, DSP 2007. Master of Science in

- Electrical Engineering. Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology. <https://doi.org/10.1109/ICDSP.2007.4288579>
- Kaushal, H., Kumar, V., Dutta, A., Aennam, H., Jain, V. K., Kar, S., & Joseph, J. (2011). Experimental Study on Beam Wander Under Varying Atmospheric Turbulence Conditions. *IEEE Photonics Technology Letters*, 23(22), 1691–1693. <https://doi.org/10.1109/LPT.2011.2166113>
- Kolmogorov, A. N. (1941). Dissipation of Energy in the Locally Isotropic Turbulence. *Proceeding of Royal Society London A*, 434(1890).
- Kwiecień, J. (2019). The effects of atmospheric turbulence on laser beam propagation in a closed space — An analytic and experimental approach. *Optics Communications*, 433(15), 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.09.022>
- Labeyrie, A., Lipson, S. G., & Nisenson, P. (2006). *An Introduction to Optical Stellar Interferometry*. Cambridge; UK: Cambridge University Press.
- López H, P. A., Reyes Q, Z. P., Guzmán, Á. M., Torres M, Y., & Mendoza C, J. H. (2017). Diffracted optical vortices by an angular aperture. *Proceedings of SPIE*, 10347, 7.
- López, P. A., Moreno, Y. T., & Rhodes, W. T. (2018). High dimensional Quantum key distribution based on coherence modulation and orbital angular momentum. *Laser Science, OSA, Technical Digest*, p. 2.
- Love, G. D., Dunlop, C. N., Patrick, S., Saunter, C. D., Wilson, R. W., & Wright, C. (2005). Horizontal turbulence measurements using SLODAR. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 5891, 1–6. <https://doi.org/10.1117/12.620599>
- Lu, C., Gao, X., Tang, J., & Wang, J. (2012). Adaptive optics technology for Fourier telescoping. *Proceedings of SPIE*, 8551, 8. <https://doi.org/10.1117/12.999256>

- Masciadri, E., & Vernin, J. (1997). Optical technique for inner-scale measurement: possible astronomical applications. *Applied optics*, 36(6), 1320–1327.
<https://doi.org/10.1364/AO.36.001320>
- Mckechnie, T. S. (2016). *General Theory of Light Propagation and Imaging Through the Atmosphere*. (W. T. Rhodes, Ed.) (Springer). Basel; Switzerland.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-18209-4>
- Measurement Specialties. (2008). HTS2030SMD – Temperature and Relative Humidity Sensor. Recuperado el 1 de septiembre de 2019, de <https://datasheet.octopart.com/HTS2030SMD-TE-Connectivity-datasheet-15992094.pdf>
- Meneses, J., Gharbi, T., & Humbert, P. (2005). Phase-unwrapping algorithm for images with high noise content based on a local histogram. *Applied optics*, 44(7), 1207–1215.
<https://doi.org/10.1364/AO.44.001207>
- Millerd, J., Brock, N., Hayes, J., Kimbrough, B., Novak, M., North-Morris, M., & Wyant, J. C. (2005). Modern Approaches in Phase Measuring Metrology. *Proc. of SPIE*, 5856, 14–22.
<https://doi.org/10.1117/12.621581>
- Millerd, J. E., Brock, N. J., Hayes, J. B., & Wyant, J. C. (2003). Instantaneous phase-shift, point-diffraction interferometer. *Proceedings of OSA*, 1.
- Neos Technologies. (2006). Acousto Optic Modulator Model Number 23080. Melbourne, Florida, USA.
- Ortiz León, G. N., & Jiménez Mier y Terán, J. I. (2011). *Caracterización De Moduladores Acustico-Ópticos*. Mexico. Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pava, D. F. (2014). *Transmitter-Receiver System For Time Average Fourier Telescopy*. Ph.D.

- Dissertation, The College of Engineering and Computer Science, FAU - Florida Atlantic University. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pinzon Sierra, W. Y. (2017). *Caracterización del efecto de la presión en la propagación de un haz láser a través de la turbulencia atmosférica en trayectorias horizontales a bajas alturas*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Randunu Pathirannehelage, N. (2015). *Imaging through ground-level turbulence by fourier telescoping: simulations and preliminary experiments*. Florida Atlantic University. Ph.D. Dissertation, The College of Engineering and Computer Science, FAU - Florida Atlantic University.
- Rasouli, S. (2010). Use of a moiré deflectometer on a telescope for atmospheric turbulence measurements. *Optics letters*, 35(9), 1470–1472. <https://doi.org/10.1364/OL.35.001470>
- Razi, E. M., & Rasouli, S. (2014). Measuring significant inhomogeneity and anisotropy in indoor convective air turbulence in the presence of 2D temperature gradient. *IOPscience. Journal of Optics*, 16(4), 8. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/16/4/045705>
- Research Electro-Optics Inc., & Newport. (2012). Frequency and Intensity stabilized Helium-Neon Laser System. User's guide to operation. Boulder (USA).
- Reyes Aparicio, S. E., & Vásquez Caicedo, A. F. (2018). *Caracterización de los efectos de la turbulencia atmosférica sobre el camino de propagación de un láser a diferentes distancias horizontales y baja altura*. Universidad Industrial de Santander. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico, Universidad Industrial de Santander.
- Reynolds, R. C., Talent, D. L., & Vilas, F. (1989). Observing orbital debris using space-based telescopes: I. mission orbit considerations. *Publication of the Astronomical Society of the*

Pacific, IOP Science, 101(645), 1055–1060.

Rhodes, W. T. (2012). Time-average Fourier telescoping: a scheme for high-resolution imaging through horizontal-path turbulence. *Applied Optics, 51(4), A11–A15.*
<https://doi.org/10.1364/AO.51.000A11>

Sánchez, J. de D. (2009). *Estudio teórico-experimental de un sistema de comunicaciones ópticas homodino utilizando el canal inalámbrico turbulento.* Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, México.

Schmidt, J. D. (2010). *Numerical Simulation of Optical Wave Propagation* (SPIE PRESS). Washington: SPIE.

Shor, P. W., & Preskill, J. (2000). Simple proof of security of the BB84 quantum key distribution protocol. *Physical review letters, 85(2), 441–444.*

Sjöqvist, L., Allard, L., Gustafsson, O., Henriksson, M., & Pettersson, M. (2011). Turbulence effects in a horizontal propagation path close to ground: implications for optics detection. *Proceeding of SPIE, 8187, 13.* <https://doi.org/10.1117/12.898171>

ST Microelectronics. (2016). STM32F745xx STM32F746xx datasheet. Shangai (China).

STMicroelectronics. (2015). STM32F746G Discovery. Shangai (China).

Stromqvist Vetelino, F., Young, C., Andrews, L., Grant, K., Corbett, K., & Clare, B. (2005). Scintillation: theory vs. experiment. *Proc. SPIE, 5793, 166–177.*
<https://doi.org/10.1117/12.603992>

Tatarski, V. I. (1961). *Wave Propagation in a Turbulent Medium* (Dover Publ). Toronto, Ontario. Canada.

Tíjaro, O. J., Ramírez, A. B., & Torres, Y. (2019). Single sensor measurements based beam wander effects. *Proceedings X RIAO – XIII OPTILAS – MOPM, 12–13.*

- Tíjaro Rojas, O. J., Galeano Traslaviña, Y. A., & Torres Moreno, Y. (2016). Simple method to measure effects of horizontal atmospheric turbulence at ground level. *Proceedings of SPIE*, 99790, 11. <https://doi.org/10.1117/12.2238045>
- Tíjaro Rojas, O. J., Rhodes, W. T., & Torres Moreno, Y. (2018). Measuring parameters of ground-level atmospheric turbulence via Fourier telescoping. *Proceedings of SPIE*, 10799, 12. <https://doi.org/10.1117/12.2323990>
- Tíjaro Rojas, O. J., Sandoval Vera, A. G., & Torres Moreno, Y. (2017). Implementación de sistema embebido de adquisición de franjas para el estudio de la turbulencia atmosférica. *Libro de resúmenes al XXVII Congreso Nacional de Física*, 720–721. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Tíjaro Rojas, O. J., Torres Moreno, Y., & Rhodes, W. T. (2017). Measuring horizontal atmospheric turbulence at ground level from Optical Turbulence Generator (OTG) using a 1D sensor. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X*, 10329, 6. <https://doi.org/10.1117/12.2270380>
- Villamizar, J., Herreño, M., Tíjaro, O., & Torres, Y. (2019). Atmospheric Characterization Based on Relative Humidity Control at Optical Turbulence Generator. *Atmosphere*, 10(550), 13. <https://doi.org/10.3390/atmos10090550>
- Voitsekhovich, V. V. (1995). Outer scale of turbulence: comparison of different models. *Journal of the Optical Society of America A*, 12(6), 1346–1353. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.001346>
- Zhao, Z., & Liao, R. (2011). Fading probability density function of free-space optical communication channels with pointing error. *Proceeding of SPIE*, 8038, 11. <https://doi.org/10.1117/12.884401>

Apéndices.

Apéndice A. Procesos, sistemas implementados y diagramas

Diagramas de procesos

Para el desarrollo de esta tesis fue necesario implementar diferentes procesos para ejecutar las mediciones en laboratorio y en campo tanto en los sistemas ópticos y electrónicos, que se muestran en las siguientes figuras respectivamente.

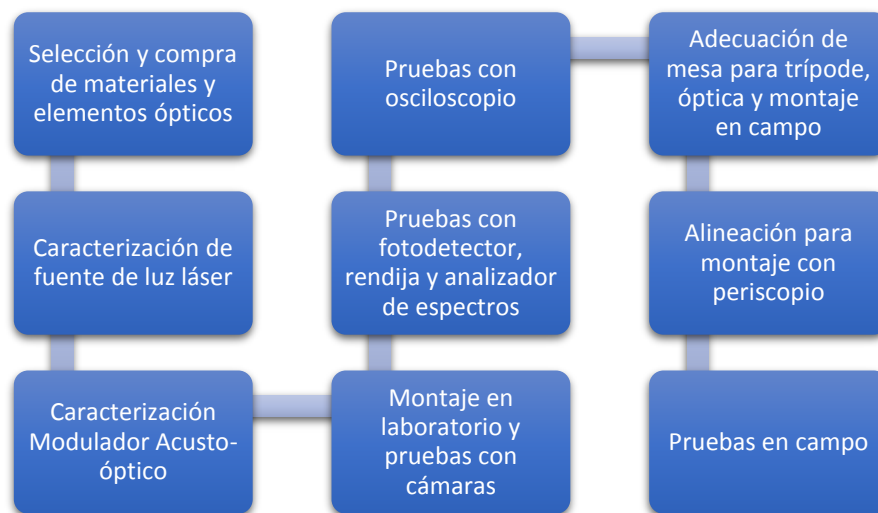


Figura 47. Diagrama de procesos del diseño del sistema óptico.

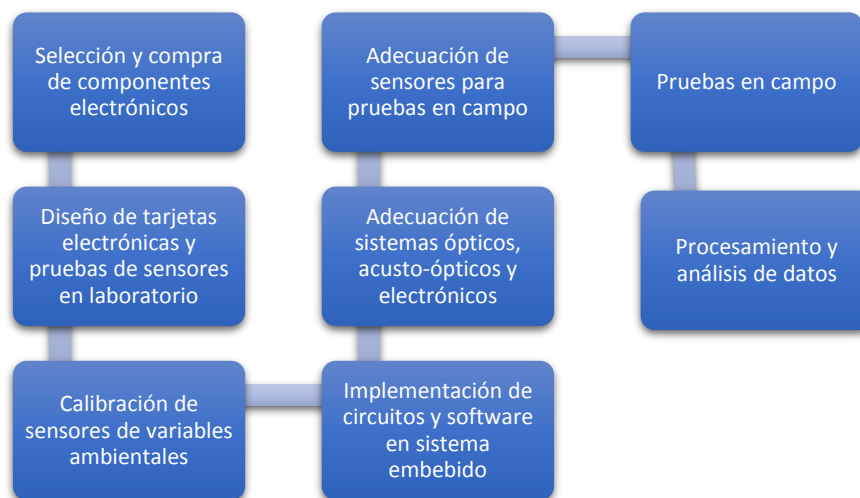


Figura 48. Diagrama procesos del diseño de los sistemas electrónicos.

Tanto en la Figura 47 como en la Figura 48 hay algunos bloques que son comunes, por ejemplo, la selección y compra de materiales, adecuaciones tecnológicas y pruebas en campo. En el sistema óptico (Figura 47), los bloques correspondientes a caracterización de fuentes de luz láser y pruebas en campo han sido descritos en el capítulo 3 y 4. En los pasos realizados para la verificación de la operación como la caracterización del modulador acústico-óptico (AOM del inglés *Acousto-Optic Modulator*), el montaje en laboratorio y las pruebas con cámaras; se verificaron la operación óptica del AOM, la producción del sistema de franjas de interferencia y su medición. Con este procedimiento, se estima la apertura de instalación de la rendija ajustable que, con el orden 1 del AOM y el haz láser propagado (del otro brazo del interferómetro) forman el sistema de franjas que se desplaza a una frecuencia dada por la portadora que viene del driver eléctrico del AOM, la que forma el patrón temporal en el PMT. Dicho patrón fue necesario visualizarlo en un analizador de espectros para verificar que la frecuencia recibida era la correspondiente a la generada en el driver eléctrico. Después de poder identificar esta señal, se instaló en laboratorio el osciloscopio para observar la forma de la señal en el dominio del tiempo, se hicieron las debidas adaptaciones mecánicas y micromecánicas dados en los bloques subsiguientes y se ejecutaron las pruebas en campo.

Respecto a la Figura 48, las tarjetas electrónicas que interfazaron las variables físicas de los sensores con una medida eléctrica fueron diseñadas para realizar las respectivas mediciones y registrarlas, la calibración se realizó con instrumentos patrones en colaboración con cada uno de los proyectos de pregrado dirigidos (Contreras, 2016; Hernández Quintero & Rincón Correa, 2016; Herreño Vanegas & Villamizar Conde, 2016; Pinzon Sierra, 2017). En cada calibración se ajustaron las constantes de las ecuaciones sugeridas por los fabricantes.

Después de tener cada uno de los sistemas operando, se integraron en una sola tarjeta electrónica (Figura 38c) un sistema que se comunica con cada uno de los sensores y el sistema embebido. Cada uno de los módulos que se integraron fueron procesados según su variable de transducción como lo muestra el sistema a continuación.

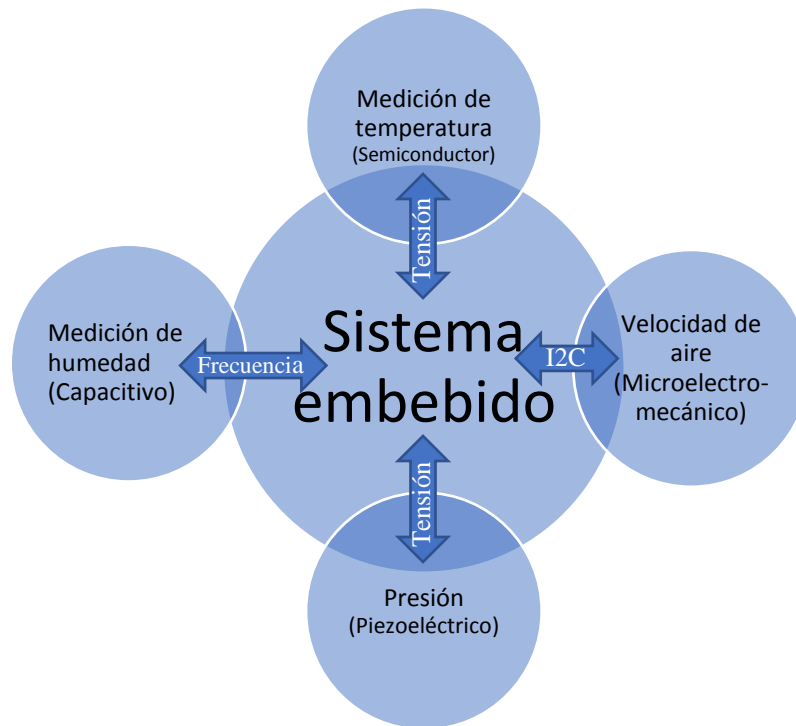


Figura 49. Diagrama de transductores de cada sensor con sistema embebido

En la Figura 49 se describen los fenómenos físicos que permitieron ser utilizados para que cada sensor envíe por un puerto diferente la comunicación de su medición y respectivo almacenamiento. En el caso en el cual el protocolo de comunicación fue llevado a cabo por la variable eléctrica de la tensión, los circuitos implementados fueron para protección del dispositivo digital y evitar la caída en las líneas de tensión cuando se conectaban los sensores a distancias considerables. Las protecciones estuvieron acorde a la selección dada antes de comprar los dispositivos respecto a la alimentación eléctrica (5VDC). Respecto a los que tuvieron un tipo de comunicación diferente se plantearon los siguientes circuitos (acordes con el sistema embebido).

El protocolo de comunicación I2C utilizado por el sensor de velocidad del flujo de aire se presenta a continuación.

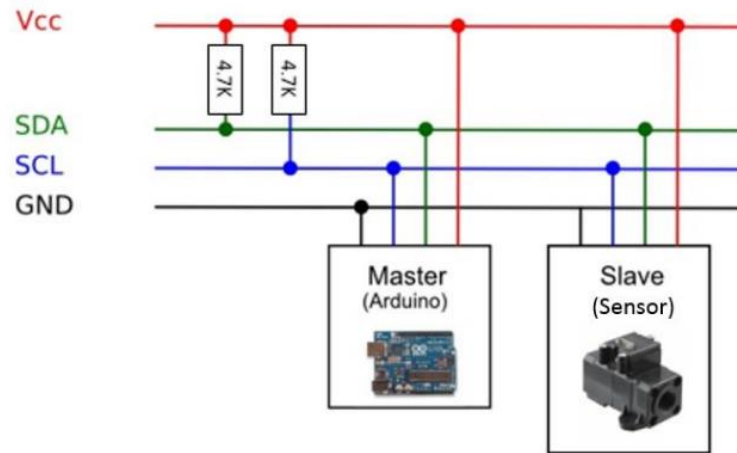


Figura 50. Diagrama de comunicación del sensor de velocidad de flujo. Fuente: (Hernández Quintero & Rincón Correa, 2016)

En la Figura 50 se muestra este protocolo serial I2C en donde el dispositivo maestro es un sistema de desarrollo STM32F7 Discovery (aunque se muestra un Arduino), el cual controla la comunicación con el sensor. Por su parte, el sensor capacitivo de humedad utiliza más tratamiento y está dado por el siguiente diagrama de bloques:



Figura 51. Diagrama de comunicación del sensor de humedad relativa. Fuente: (Herreño Vanegas & Villamizar Conde, 2016)

La Figura 51 utiliza un circuito oscilador 555 para que el cambio de capacitancia genere en el circuito un cambio de frecuencia medible. Allí se envía la señal a un circuito que convierte la frecuencia a tensión, un buffer y un filtro para que esta pueda llevar los niveles permitidos por el sistema embebido. Cada uno de los circuitos son mostrados en la siguiente figura.

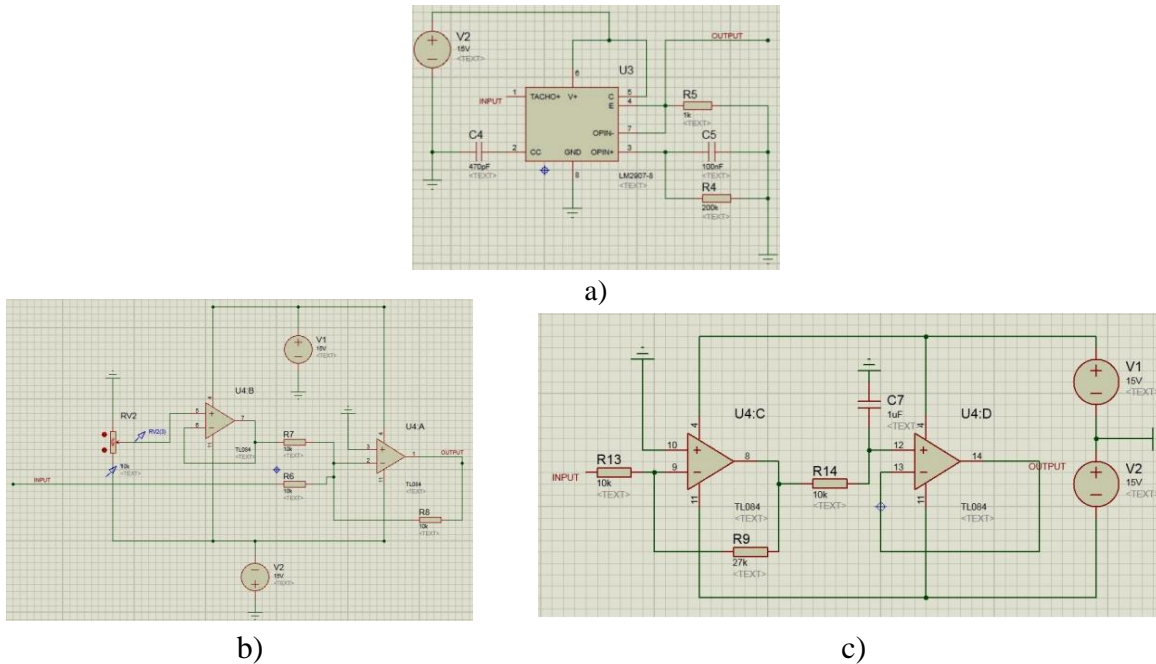


Figura 52. Circuitos diseñados para la medición de humedad relativa. a) Generador de frecuencia; b) Conversión de Frecuencia a tensión; c) Filtro pasa bajos. Fuente: (Herreño Vanegas & Villamizar Conde, 2016).

Ya después de la adecuación analógica realizada para las variables físicas, inicia el tratamiento digital de la señal, el cual se realiza a través de algoritmos desarrollados en el sistema de desarrollo para la adquisición de los datos:

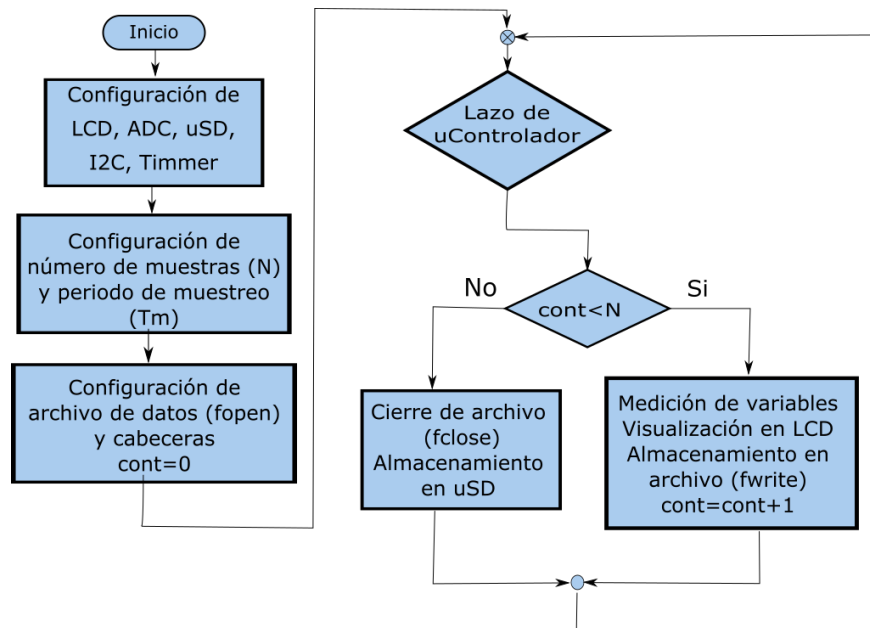


Figura 53. Diagrama de flujo implementado en sistema embebido.

En paralelo, fueron diseñados los circuitos para la polarización eléctrica del PMT, los cuales son basados en reguladores de tensión fijos y variables (circuito a base de un resistor variable) para poder tener la alimentación como se muestra a continuación.

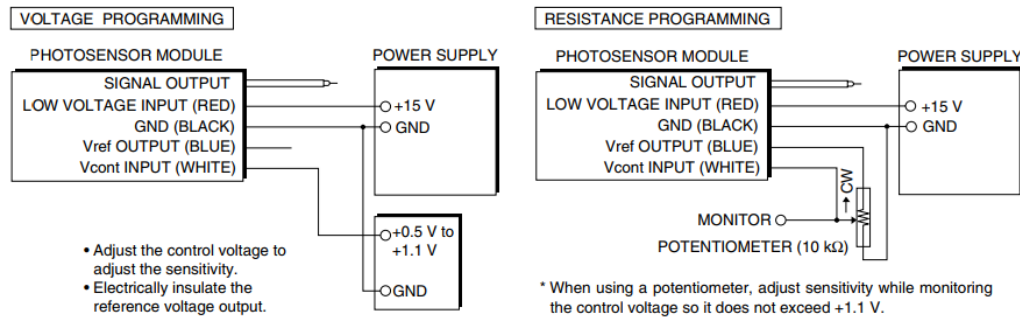


Figura 54. Diagrama para diseño de circuito de polarización eléctrica. Fuente: (Hamamatsu Photonics K. K., 2013)

A partir del circuito diseñado se realizaron las respectivas caracterizaciones para verificar operación del PMT inicialmente mediante un circuito de diodo LED y un generador de señales. Se realizó un barrido en frecuencia.

Un analizador de espectros y un osciloscopio fueron también utilizados en esta etapa para verificar correcta operación del controlador eléctrico del AOM, donde se evidenció que su señal portadora AM variaba de 70 a 90 MHz y potencia de salida menor a 1 watt.

Luego, fueron adaptadas las conexiones de los sensores para evitar que estuvieran muy cerca del prototipo óptico y el calor dado por la operación generara alguna turbulencia indeseada. Del mismo modo, se adaptaron circuitos con baterías de 9V y 1.5 V para alimentar cada uno de los circuitos. El osciloscopio debió ser utilizado en modo portable y sus baterías debían cargarse al menos 4 horas antes de iniciar la prueba, su software de comunicación con el computador portátil fue configurado para adquirir 10000 muestras (número límite en el osciloscopio a frecuencias de muestreo altas >1 GHz).

Inicialmente se realizaron algunas pruebas en laboratorio en donde se implementaron cambios en la variable de temperatura, y se registraron los cambios en el PMT, los cuales generaron algunos

cambios considerables debidos a la temperatura incluida, es de recalcar que durante la toma de los registros, los deshumidificadores y aire acondicionado fueron apagados, los resultados fueron consignados en (Tíjaro Rojas, Torres Moreno, & Rhodes, 2017). Un año más tarde, en una publicación fueron incluidos los resultados de las mediciones de los parámetros referentes a la turbulencia, pero con cambios a la velocidad del flujo de aire que son mostrados en (Tíjaro Rojas, Rhodes, & Torres Moreno, 2018).

Durante las pruebas en campo fueron adquiridos tanto los datos del PMT en la interfaz del osciloscopio en el computador como los de las variables físicas en el sistema embebido. Tanto en el archivo creado en el sistema de desarrollo como en los archivos creados por el osciloscopio, los datos se debieron tabular para su análisis. En el caso del archivo creado su análisis fue realizado en Excel (desde descomposición por columnas), sin embargo, para el caso del osciloscopio se debió leer cada uno de los archivos de datos para poder verificar tanto muestras independientes como dependientes.

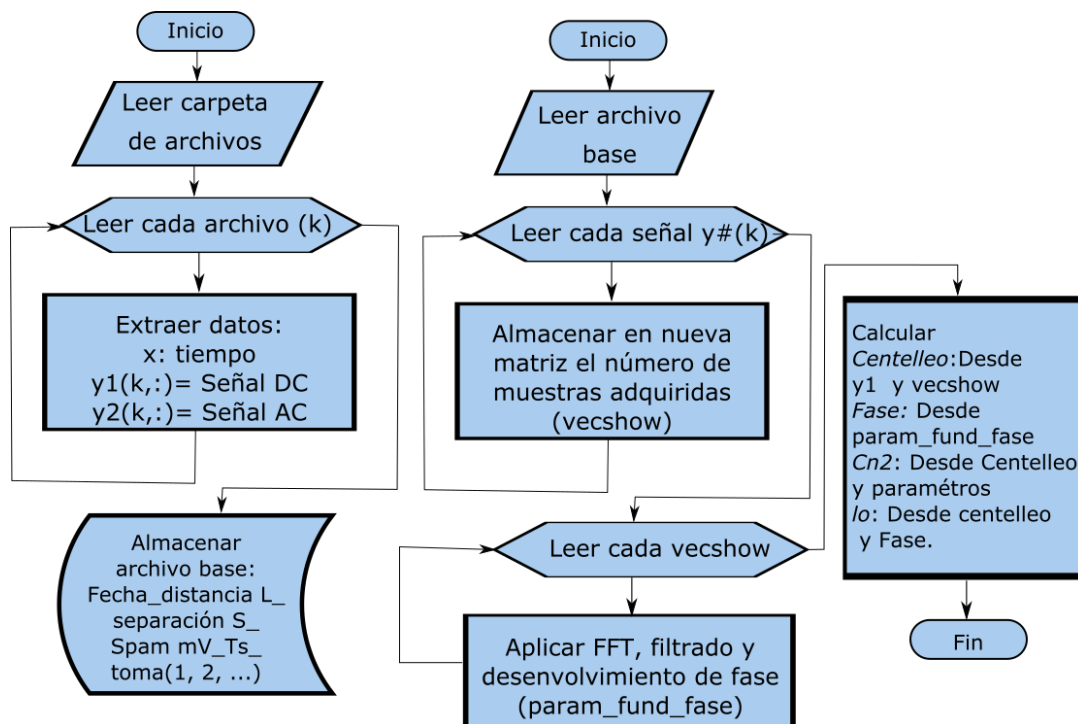


Figura 55. Diagrama de flujo de procesamiento después de adquiridos los datos.

En el caso de la Figura 55, cuando se aplicó la FFT fue importante poder encontrar su frecuencia fundamental y de allí el filtrado digital que se muestra en la sección 3.4, el desenvolvimiento de fase y los cálculos fueron aplicados a partir de las ecuaciones 7,8 y 9 en la sección 2.1.

Apéndice B. Characterizing horizontal atmospheric turbulence from air velocity in an optical turbulence generator



Characterizing horizontal atmospheric turbulence from air velocity in an optical turbulence generator

Jhonatan Hernandez^a, Jesus Rincón^a, Alexander Ballesteros^a, Omar Tíjaro^{a,b,c,*}, Yezid Torres^a

^a GOTS, Optics and Signal Processing Group, Physics School, Universidad Industrial de Santander, 680002 Cra. 27 Calle 9 Bucaramanga, Colombia

^b School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering, Universidad Industrial de Santander, 680002 Bucaramanga, Colombia

^c Connectivity and Processing Signal Group, Universidad Industrial de Santander, 680002 Bucaramanga, Colombia



ARTICLE INFO

Keywords:

Atmospheric and oceanic optics
Atmospheric turbulence
Atmospheric optics
Geometric optics
Ray trajectories in inhomogeneous media
Airspeed emulation

ABSTRACT

Due to weather and environment problems, different scientists have been studied atmospheric turbulence by focusing on a model for vertical atmospheric turbulence for practical applications like stellar imaging. For studying the atmospheric behavior horizontally, we used a laser beam that is propagated in a horizontal path at a laboratory room scale and an Optical Turbulence Generator OTG, inserted along the optical path. The airspeed was controlled inside the OTG and some physical variables like temperature and relative humidity were measured for verifying their effects on the local atmosphere. The experimental results show these effects over the angle structure function, the laser beam centroid shifting, and the statistical measurements by using imaging processing which are important to model oneself on environment conditions in an open field.

1. Introduction

Since Kolmogorov theory [1], many advances about turbulence have been formulated and reported. For instance, Fried and Cloud [2] assume an infinite plane wave for begin to construct the phase structure functions based on the previous studies of deformed wavefront shape where tilting was an important variable [3] and aware that the strength of ground-level horizontal-path atmospheric turbulence can be expected to be essentially constant over distances of tens to hundreds of meters, understand its behavior at very long horizontal distances as for example, experiments that could be launched from advances presented in [4] for free space optical communications that among others have motivated this paper. These theories generated experimental schemes to measure turbulences parameters as in [5], whose results were used over similar setups by applying “Moiré deflectometry” and in different telescopes as in [6]. Although this theory was designed to stellar optical, some authors have developed measurements in a laboratory scale and heated air [7], where the air convection was the turbulence generator. However, their measurements are difficult to register automatically. On the other hand, some reports indicate that many physical variables could change the turbulence parameters [8]. For this reason, we built an OTG from a metal pipe where we performed tests for different air velocities at two orthogonal directions, longitudinal and transversal to the OTG axis [9], measured with electronic sensors. This OTG searches to obtain similar phase variations introduced by the turbulence in an open field with a long horizontal propagation. Proposed OTG allows for control of the physical variables and their

measurement, whereas previous OTGs seem to control and measure not more than one physical variable.

Air velocity has magnitude and direction, hence for introducing airflow inside the OTG, its profile must be very well defined, it means that when turbulence exists, different speeds of flow air injection allow its effects to be studied. In fact, the metal pipe is an interesting experimental piece because it excludes other changes from surroundings.

Optical path included a way to study the laser beam wander under atmospheric turbulence effects [10]. This method can work best with ultrafast cameras. However, a straightforward approach was made to assess information about turbulence at known distances. Data acquisition included computer systems and Atmel™ microcontroller from the Arduino Platform, with an optical synchronization in a parallel computer scheme.

The acquired images were processed numerically by using spatial filters in order to obtain essential characteristics to assess fluctuations from turbulence parameters. The results show more longitudinally fluctuations than transversally because the airflow volume was longer than the width. In the future, an interferometer will measure the possible changes in tilt or in the temporal and spatial phase from the Fourier Telescopic technique [11].

2. Method

To calculate the movement of the laser beam, the image processing and then the centroid calculation have been used, thus estimating the fluctuations of the angle. A flow diagram is presented in Fig. 1.

* Corresponding author.

E-mail addresses: otijaro@gmail.com, omar.tijaro@correo.uis.edu.co (O. Tíjaro).

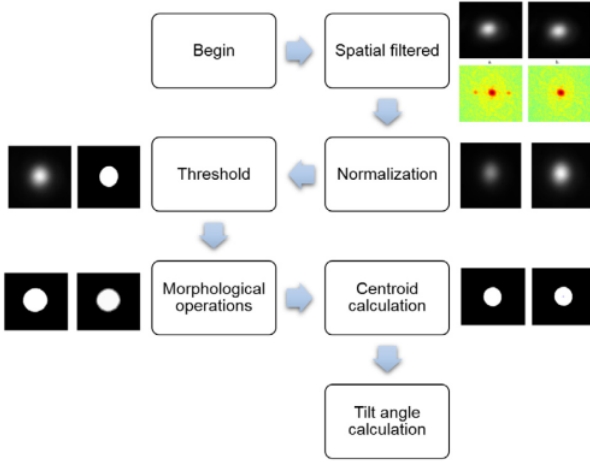


Fig. 1. Flow diagram of imaging processing to calculate centroids and tilt angle fluctuations (see details in Fig. 3). Center: Flow diagram. On the outside: Example of flow diagram applied to an image. Source: Authors.

The spatial fluctuation of the laser beam is studied in different planes (z_1 , z_2 , and z_3 distances in Fig. 2) (the two first planes were chosen because the distance between them is less than 1 m, the third plane was chosen due to spatial limitation of laboratory room) where turbulence parameters could be calculated from temporal angle fluctuations:

$$\theta_x(k) = \frac{x_{n_2} - x_{n_1}}{z_2 - z_1} \quad (1)$$

$$\theta_y(k) = \frac{y_{n_2} - y_{n_1}}{z_2 - z_1} \quad (2)$$

where x_{n_1} and y_{n_1} mean the axes “x” and “y” at z_1 distances respectively. In the same way for x_{n_2} , y_{n_2} and z_2 . The subscript n refers to time elapsed between two successive centroids calculations. The subscript k refers to a relative iteration time where the calculus were made.

From Eqs. (1)–(2) and geometrical optics is calculated the propagation angle, in Cartesian coordinates, to planes located at distances z_1 and z_2 , respectively, that combined with iteration time (k) was estimated next laser beam position only with the wander effect at z_3 and under the freeze atmosphere hypothesis [12]. In contrast, the same equations are calculated on the third plane (placed at z_3) and two adjacent times (k and $k+1$) which assessed spatio-temporal fluctuations. There, equations to calculate θ_x and θ_y were used to calculate α (in cylindrical coordinates, see Fig. 3), but only at z_3 instead of $z_2 - z_1$ and time $k - 1$ in place of k , respectively. However, the limits of the angle calculation are linear whether α follows the well-known equation $\lim_{\alpha \rightarrow 0}(\tan(\alpha)) \rightarrow \alpha$, it is only possible when the turbulence is weak or possibly moderated because in this model, the wavefront displacement is small. On the other hand, a measure for the intensity fluctuations is the scintillation index, a very useful turbulence descriptor:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (3)$$

Whereas, the inner scale is shown in Eq. (4), where z_3 is the propagation distance and $\langle \alpha^2 \rangle$ corresponds to structure function of the arrival angle.

$$l_0 = 1.08z_3 \sqrt{\frac{\langle \alpha^2 \rangle}{\sigma_I^2}} \quad (4)$$

Eq. (5) describes the structure parameter of the refraction index in relation to other parameters described previously.

$$C_n^2 = \frac{\sigma_I^2}{1.23k^{\frac{7}{6}} z_3^{\frac{11}{6}}} \quad (5)$$

where, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ is the wave vector. The parameter C_n^2 is important since it characterizes the different stages as summarized in [13]. For example, Davis scale presents $C_n^2 \sim 10^{-18} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ as a very weak turbulence, $C_n^2 \sim 10^{-16} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ as weak turbulence, and $C_n^2 \sim 10^{-14} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ as strong turbulence [14], while Wilfter and Dordowa include two stages: $C_n^2 \sim 10^{-13} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ as very strong turbulence and $C_n^2 \sim 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ as mean turbulence [15]. On this case, the linear calculus of the α angle is accepted at $C_n^2 < 10^{-16} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ because changes caused by strong turbulence may exceed the limit value of α , due to the shape recorded by the camera that may be altered causing oval shape instead of circles and for considerable displacements in the beam that would detect only a part of the beam in the effective area of the camera, among others, that produce mistakes in the centroids, among others.

From the equations and the analysis established previously, an experimental setup is suggested as shown in Fig. 2, where Table 1 summarizes the main technical specifications. The originally experimental setup was adapted from previous work at 632.8 nm wavelength [10]. Here, an OTG emulates different airflow velocities and improves the air profile produced by an electrical fan as is shown in Fig. 4.

In Fig. 4, the airflow source was located outer of the optical experiment. The air is injected and conducted by a flexible plastic pipe to the OTG. It avoided transmitting perturbations due to fan vibrations and electrical noise. At the end of the plastic pipe, a mechanical coupling with a small hole allows the laser beam to be transmitted. To control the airflow source, an electric circuit was build-using Diacs, Triacs, and variable resistors that were isolated electrically of the main system. A thin plastic pipe or straw placed inside OTG ensures that airflow has a defined and accurate profile, and the laser wavefront would not disturb.

An airflow sensor was put at the end of the OTG (i.e. at the extreme of Fig. 4) under the laser beam because if it had been located in the middle, the perturbed turbulence could be stronger and the profile, previously improved, could be damaged. In addition, the value of airflow velocity could be affected because of eddies generated close to the sensor walls could change the flow direction and so its magnitude. On the other hand, relative humidity and temperature sensors are placed inside at center of the OTG to register their variations.


Fig. 2 shows the implemented optical synchronization that allows the acquisition to start. This step was very important because each individual system was operating isolated and the acquisition had to ensure the obtained data guarantee frozen turbulence hypothesis [12], where despite the fact that the air flow propagates in the longitudinal direction (equal to the laser beam), it contains a vertical (orthogonal) component that must guarantee the hypothesis. In this way, cameras and sensors were set before for waiting until laser beam port was opened. From that moment, an algorithm in each device enabled timers to acquire images and data-sensors at the sampling frequency of 1 Hz where 2000 samples were taken to obtain statistical variations with respect to the time. Due to airflow sensor transduction, it was necessary to implement a circuit to start acquisition in a microcontroller (and its Arduino platform).

After the acquisition, the images of centroids were processed to calculate the laser beam arrival angle. On the other hand, the sensor data were analyzed to verify if any change in air velocity could have consequences on the turbulence characteristics.

3. Results

In the beginning, different tests were designed to study turbulence parameters by effects of airflow velocity in the longitudinal and transversal path to the beam, whose profiles are shown in Fig. 5 and injected like Fig. 4, for both orthogonal airflow directions. In addition, Fig. 6 shows the temperature and humidity measured from test # 1 to #5. It was appreciable that the temperature and relative humidity were practically constant during the measurements for each test. However, while the temperature increases according to air flow increments the

Table 1
Summary of the main system parameters.

Device	Characteristics
Laser	He-Ne Laser. Model 127-35. Power output: 35 mW. Wavelength: 632.8 nm. Beam diameter: 1.25 ± 0.1 mm. Beam divergence: 0.66 ± 0.05 mrad. Estimated $M^2 : 1.43$ [16].
CMOS Cameras	Model: 1312C. Square Pixel Size: $5.3 \mu\text{m}$. Pixels (H \times V): 1280×1024 . Total Area (H \times V)(mm): 6.79×5.43 . Pixel separation (H \times V): $5.304 \mu\text{m} \times 5.302 \mu\text{m}$ [17].
Airflow Sensor	Honeywell HAF Series-High Accuracy. Flow 0 to 200 SLPM. Output: Digital (I2C) [18].
Laptop Software	Intel processor, Core i3 – i5. RAM Memory: 4 GB. Matlab  , Arduino Platform (15), IDS uEye [19].
Fan	Centrifuge fan. RPM : 0–16000. Volumes : 0–2.8 m ³ /min.

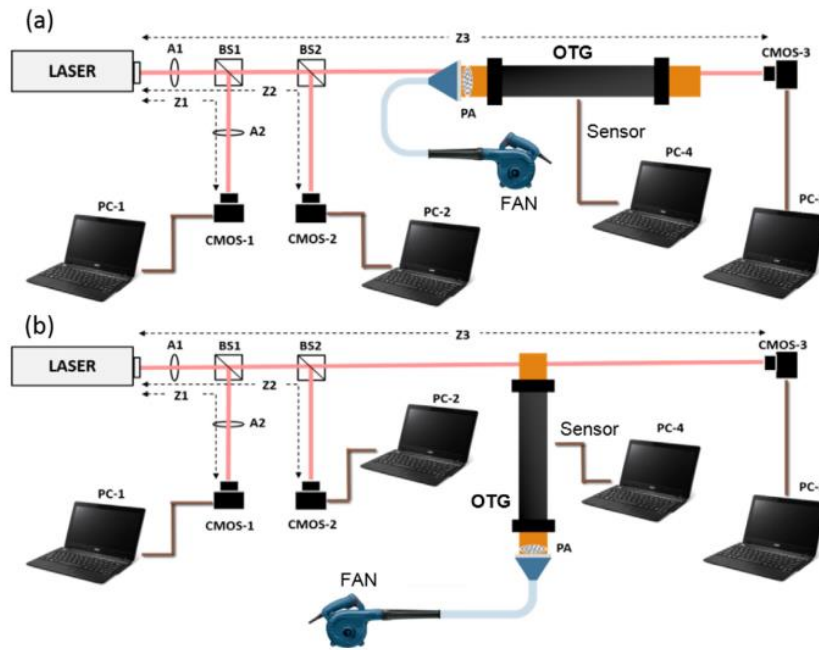


Fig. 2. Experimental setup. A#: Density neutral filter. OTG: Optical Turbulence Generator (length: 1 m, internal diameter: 7.15 cm, external diameter: 9.8 cm). BS#: Beam Splitter. CMOS #: CMOS Camera to digitalize laser beam at $z_1 = 1.18$ m, $z_2 = 1.45$ m, and $z_3 = 3.97$ m. PA: Air grating. (a) Longitudinal path. (b) Transversal path. Source: Authors.

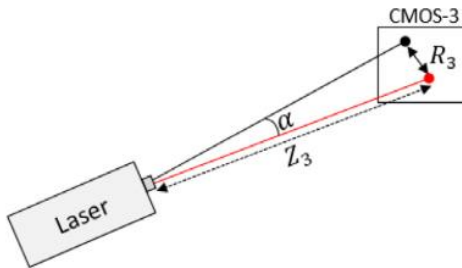


Fig. 3. Centroid angle calculation. α is referred to Eq. (4). Source: Authors.

relative humidity decreases, what means the effect is inverse in these two physical variables. On the other hand, whereas the total change in the temperature value was between 3 °C the total change in the relative humidity was around 15%.

Additionally, another test was taken in environment condition, i.e. the OTG without control over physical variables, to compare if the changes in air velocity would generate movements in the laser

Table 2
Designed tests. Source: Authors.

Test name	Speed [m/s]	Standard deviation [m/s]	Applied power [W]
Pattern	0	0	0
Test # 1	3.99	± 0.11	54.12
Test # 2	6.26	± 0.12	80.56
Test # 3	9.63	± 0.17	137.29
Test # 4	12.57	± 0.13	183.37
Test # 5	14.26	± 0.03	230.99
Test # 6	0–14.26	± 0.14	0–230.99

beam and turbulence parameters. It was called the Pattern test. Table 2 summarizes tests for speed characteristics.

3.1. Synchronization

For each test in Table 2, synchronization times are taken from timers previously programmed in Matlab timer and Arduino Platform. They were configured for the longitudinal and transversal path as reported in Table 3, where the worst and best average synchronization time are

Table 3
Designed tests.
Source: Authors.

Test name	PC1 vs PC2 [ms]		PC1 vs PC3 [ms]		PC1 vs PC4 [ms]		
	Time	Stand. Dev.	Time	Stand. Dev.	Time	Stand. Dev.	
Pattern	21.20	11.09	13.24	0.95	1.62	0.84	
Longitudinal	Test #1	20.53	13.65	7.57	1.50	2.80	0.81
	Test #2	33.64	15.34	0.66	0.61	3.98	0.68
	Test #3	29.40	14.89	6.07	0.69	7.70	0.74
	Test #4	23.58	10.60	7.57	1.50	2.80	0.81
	Test #5	20.53	13.65	7.57	1.50	2.80	0.81
	Test #6	32.34	15.25	5.93	1.13	0.80	0.58
Transversal	Test #1	20.44	13.66	10.67	1.19	4.26	0.93
	Test #2	32.57	15.27	13.15	0.87	5.81	0.77
	Test #3	23.49	14.35	2.18	0.95	2,71	0.68
	Test #4	20.99	14.24	9.43	0.81	0.56	0.47
	Test #5	28.38	15.00	8.33	0.99	0.66	0.53
	Test #6	29.33	15.00	1.38	0.99	4.35	1.04

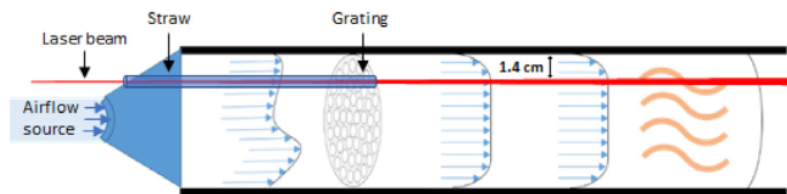


Fig. 4. Airflow profile and laser beam inside OTG (1.4 cm distance is measured to the center of the laser beam).
Source: Authors.

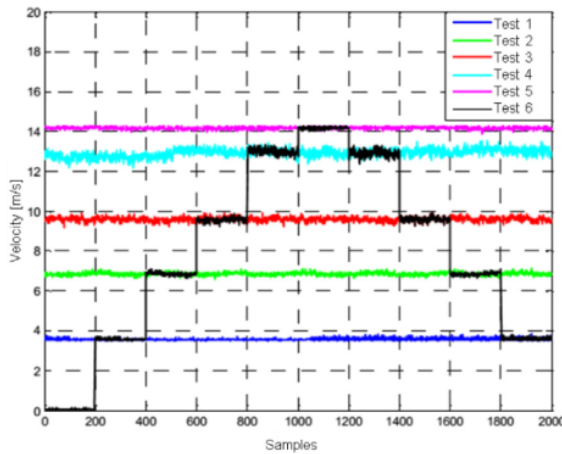


Fig. 5. Designed test # to different airflow velocity.
Source: Authors.

bolded, all times remained inside frozen turbulence hypothesis [12] (comparisons between PC1 and the others PC# were the longest times combination of all).

After the acquisition, a time model implemented from [10] analyzes the centroid movements and its 2D distribution for the CMOS cameras observations as in Fig. 2 at times k and $k+1$. Each camera is used to find a temporal distribution of the centroids and to recognize the propagation of the beam wander effect to a plane located a distance z_3 (referred to CMOS1 and CMOS2 shown in Fig. 2). The temporal distribution of the centroids is measured in both orthogonal axes (called x and y) and each test results are shown in the next section.

3.2. Centroid fluctuations

For assessing the centroid fluctuations, its behavior in the temporal domain is analyzed separately into x and y -axes on plane z_3 , as shown

in Fig. 7. The plots of Fig. 7 (down) show the estimated fluctuations at distance to the plane z_3 by applying the propagation model to the planes z_1 and z_2 and using the Eqs. (1)–(2). This representation allows to visualize the different realizations of the atmosphere that modify refraction index along the optical path, taking into account that the laser beam has no way of stabilizing, then in the laboratory room it is only possible to control the air flow or temperature. In Figs. 7 and 8, the distances, measured in pixels, are close to the center value and centroid fluctuations are near to five pixels on average, in both cases. In the estimations, the results were similar but influenced by the pixel size (see Table 1) and the propagation equation. Representation of fluctuations as a 2D temporal histogram is shown in Fig. 8. This illustration gives a 2D plane where the vertical axis represents the movements of the centroid in the y -direction, the horizontal axis the movements in the x -direction, and the colors, defined in the sidebar, are the occurrence frequencies of a position. The black color means the highest frequency and the white color the lowest frequency. It is interesting to compare the histogram of the Pattern Test with a Test with different conditions. For instance, Fig. 9 shows the results of the Test #5, where the air was injected at 14.26 m/s in the longitudinal path, in contrast to the Pattern Test with environmental conditions by isolating the OTG.

Clearly, following the results in Figs. 8(a) and 9(a) (notice the scales are different) the air velocity affects the longitudinal direction. However, the central point of the transversal plane is generally the highest frequency of realizations. 9(c) shows a version of 9(a) scaled to its highest frequency to observe more clearly the dispersion of the centroids. In addition, the histograms of Figs. 9(b) and 10(b) have similar behavior, due to the estimated fluctuations are not affected by the air velocity. As it is shown in Table 2 a test at variable speed is invalid because measurements were below the airflow sensor resolution. Furthermore, airspeed in the transverse direction has different results such as Fig. 10 shows.

Even though the dispersion was smaller in Fig. 10, the central point position in this distribution was less likely than its neighbors, it means that the effects were focused in other regions, which is different to

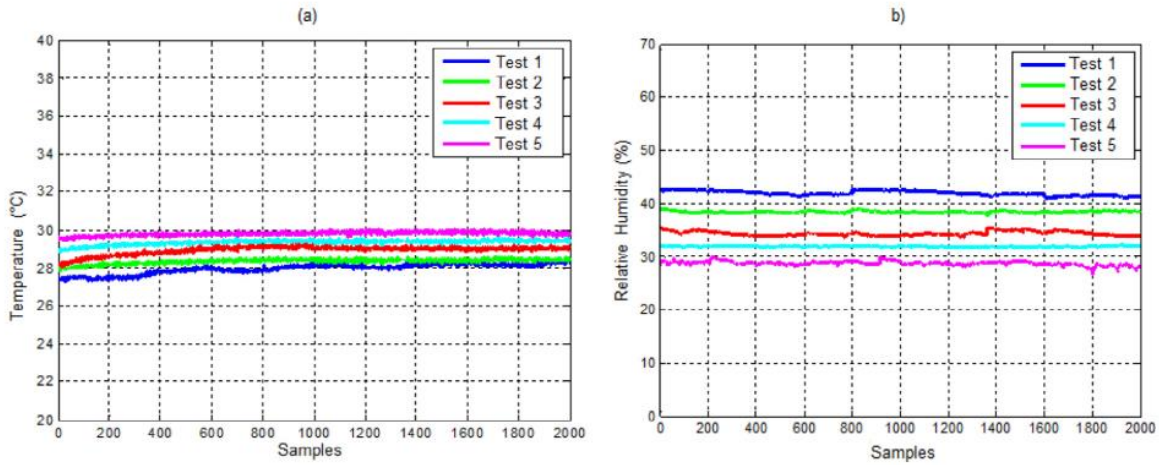


Fig. 6. Other physical variables measured at the same time (Test #6 was discarded due to resolution in air velocity sensor): (a) Temperature. (b) Relative Humidity. Source: Authors.

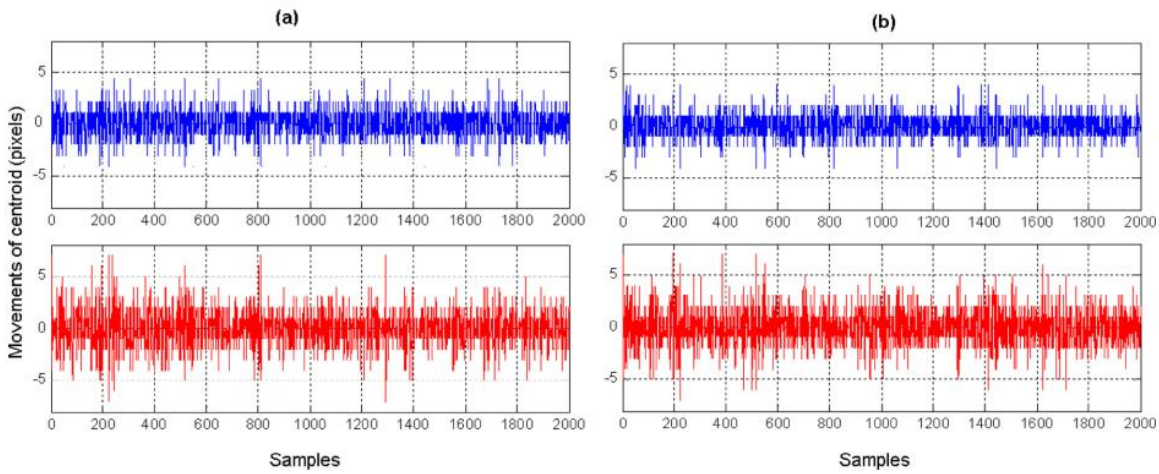


Fig. 7. Temporal distribution, in transversal Cartesian axes, of movements of the centroid for Pattern Test. Up: Measured at distance z_3 , Down: estimated at distance z_3 from measures at distances z_1 and z_2 . (a) Fluctuations in x-axis. (b) Fluctuations in the y-axis. Source: Authors.

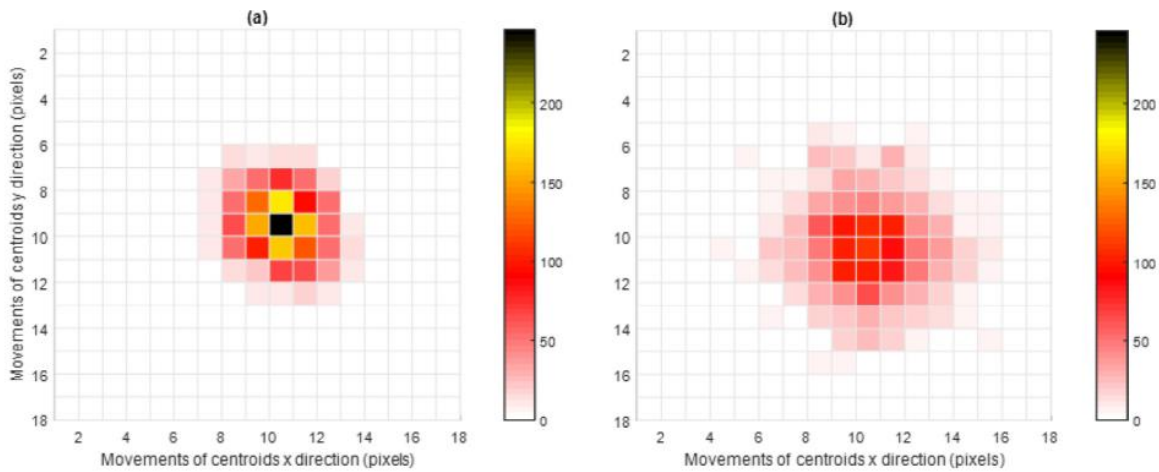


Fig. 8. 2D Temporal histogram (x and y-axes) for Pattern Test. (a) Measured at distance z_3 . (b) Estimated from measures at distances z_1 and z_2 . (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.) Source: Authors.

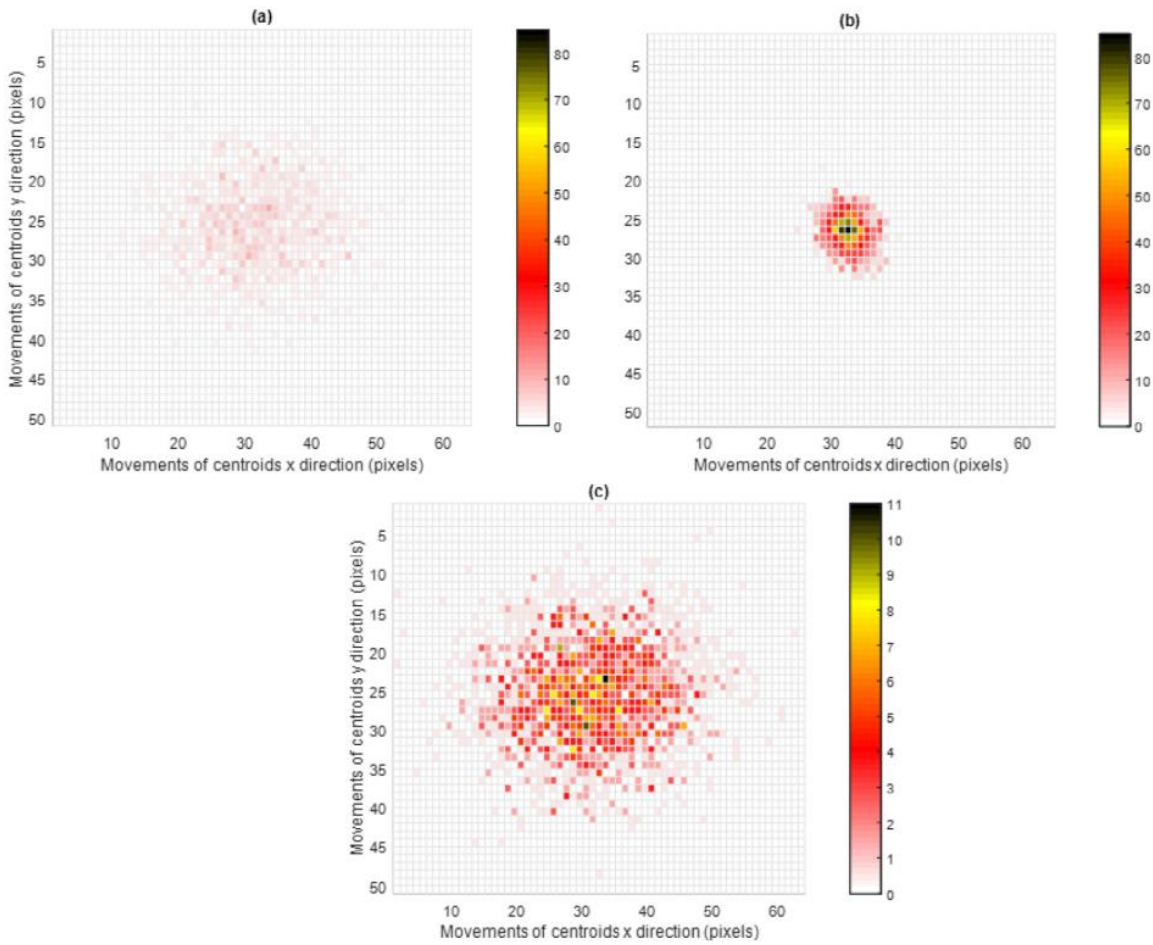


Fig. 9. 2D Temporal histogram (x and y-axes) for Test #5 carried out in a longitudinal path. (a) Measured at distance z_3 . (b) Estimated from measures at distances z_1 and z_2 . (c) Colorbar of (a) adjusted to the highest absolute frequency. Source: Authors.

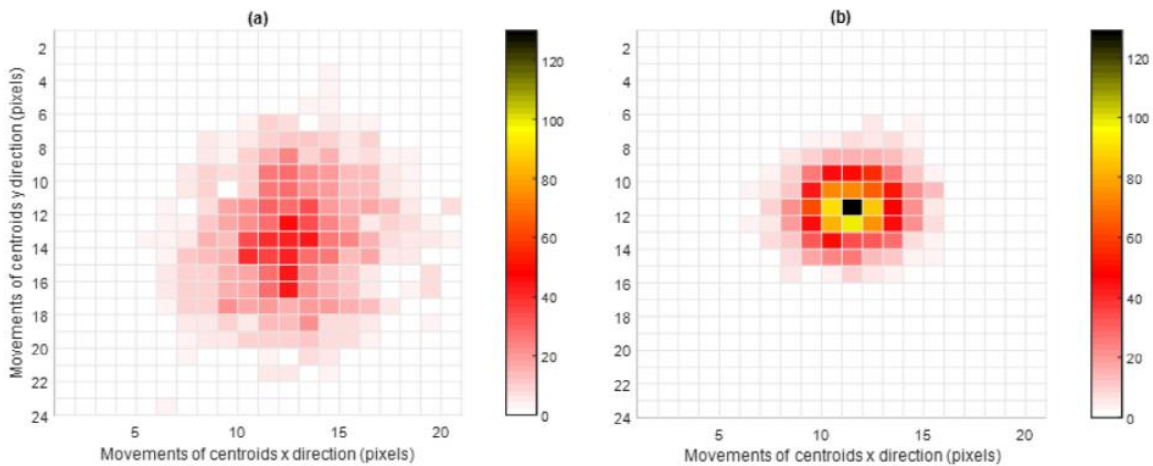


Fig. 10. 2D Temporal histogram (x and y-axes) for Test #5 carried out in the transversal path. (a) Measured at distance z_3 . (b) Estimated from measures at distances z_1 and z_2 . Source: Authors.

the behavior when the airflow injected in the longitudinal path. In addition, we used a transversal lesser volume because although the injection is proposed in the same conditions, beam propagation had less contact with airflow, which was the main reason to find differences in centroid fluctuations between Figs. 9 and 10.

3.3. Angle fluctuations

To measure the arrival angle α we used the scheme in Fig. 3 and Eqs. (1)–(2), where the measurements presented in Section 3.2 are

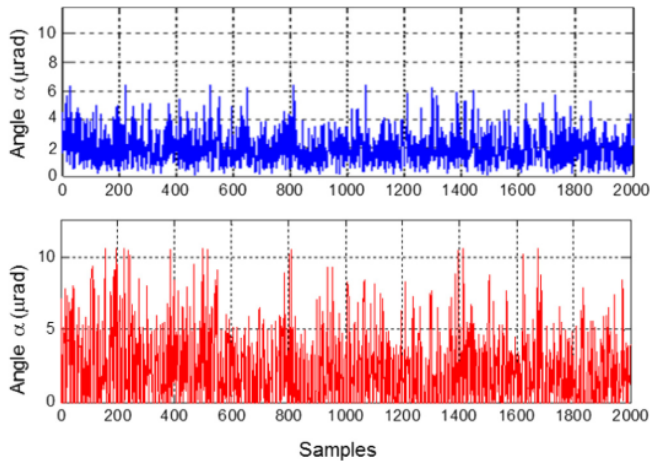


Fig. 11. Temporal fluctuations of the centroid angle α for Pattern Test. Up: Measured at distance z_3 . Down: Estimated from measures at distances z_1 and z_2 . Source: Authors.

proportional as:

$$\alpha_x[k] = \frac{x[k] - x[k-1]}{z_3}, \alpha_y[k] = \frac{y[k] - y[k-1]}{z_3}, \alpha[k] = \sqrt{\alpha_x^2[k] + \alpha_y^2[k]}, \quad (6)$$

Then, x and y values are given by the size pixel reported in Table 1 for CMOS cameras times the total number of pixels. Fig. 11 presents the calculated angle.

3.4. Structure functions

To measure local fluctuations, in centroid and in arrival angle α , we used the structure function from Kolmogorov theory [20] given by:

$$D_f(\vec{r}) = \langle [f(\vec{r}_1 + \vec{r}) - f(\vec{r}_1)]^2 \rangle \quad (7)$$

where D is the structure function for the variable f , \vec{r} is position vector and $\langle \cdot \rangle$ indicates a temporal average.

For analyzing the previous results, we classify their fluctuations in groups of ten samples to calculate the temporal average, obtaining angle fluctuations for Pattern Test, Test #5 in the longitudinal and transversal path in Fig. 12.

Fig. 12 shows in all case that lowest fluctuations were found in the pattern test and the highest found in longitudinal test. In addition, y -axis had the highest fluctuations in longitudinal path, due to the known temperature convection (in test #5 Fig. 6 the temperature was clearly the highest) and the manner of air flow injection. Although in the transversal path the air flow was injected in the x direction, the greatest fluctuations occurred in the y -axis. This calculation has been used as a variable to find the result of the Eq. (4). Thus, the evaluation of the parameters described in the Eqs. (4)–(5) are shown in Fig. 13 whose objective was to estimate the strength of the turbulence.

Fig. 13 shows the changes where the effect given by the velocity of the longitudinal air flow is highlighted, which means that the turbulence is strong when the air flow of the laser beam crosses the OTG. From these results, it is understandable now that the movement of the centroids was a consequence of the air flow; the scintillation presents the results expected by the disturbance generated in the environment, the internal scale is affected by the fluctuations of the angle because, despite the scintillation index, it is a variable that is divided into Eq. (4), the movement is significant to affect it. Lastly, C_n^2 has a strong turbulence label for the longitudinal test, a moderate turbulence for the transversal test and a weak turbulence for the pattern test.

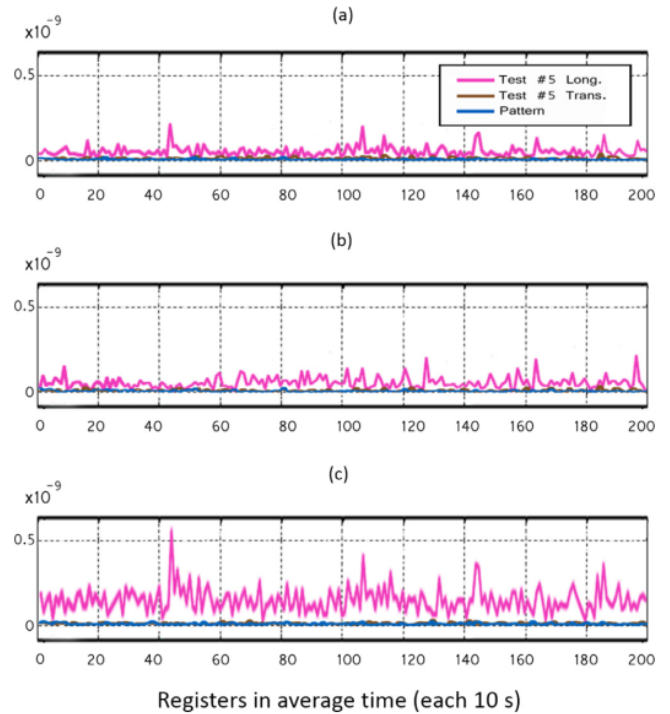


Fig. 12. Fluctuations of centroid angle for Pattern Test (blue), Test #5 in the longitudinal (fuchsia) and transversal Path (brown). (a) Radial. (b) X-axis angle. (c) Y-axis angle. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.) Source: Authors.

3.5. Summary

Following the same procedure than in previous subsections, Table 4 summarizes the average values for all the tests. The “Radial” term refers to α angle, “Horizontal” to α_x , and “Vertical” to α_y . In addition, “Measured” means the value found directly from CMOS3 (see Fig. 2) and “Estimated” from the proposed model.

In Table 4, it is clear to note that fluctuations measured in the Pattern Test were smaller than the estimated from CMOS1 and CMOS2. This situation has a different behavior when the airflow is injected in the longitudinal path, while in the transversal path only is noticeable after Test #4. Once again, the main reason has been described in Section 3.2, but the highest airflow (due to Test #5) also has the greatest fluctuations and is presented in bold.

4. Conclusions

In this paper, a very simple procedure to introduce airflow and modify its velocity inside an optical turbulence generator was designed. The proposed setup allows the spatial transversal fluctuations of the laser beam centroid propagated along the OTG generator to be measured. The beam centroid is calculated from images acquired at different distances from the output of the light source, so α angle is calculated and its limits are presented. Furthermore, injected airflow in the longitudinal or transverse direction to propagated laser beam shows a different order of magnitude on the centroid fluctuations in accord with the volume of the interaction.

On the other hand, optical synchronization is used to guarantee that the frozen turbulence hypothesis remained less than the current proposed value of hundred milliseconds (it was achieved such as shown in Table 3). Hence, it was possible to compare images acquired in different cameras and under the same controlled physical variable, air velocity. Temperature and relative humidity were acquired at the

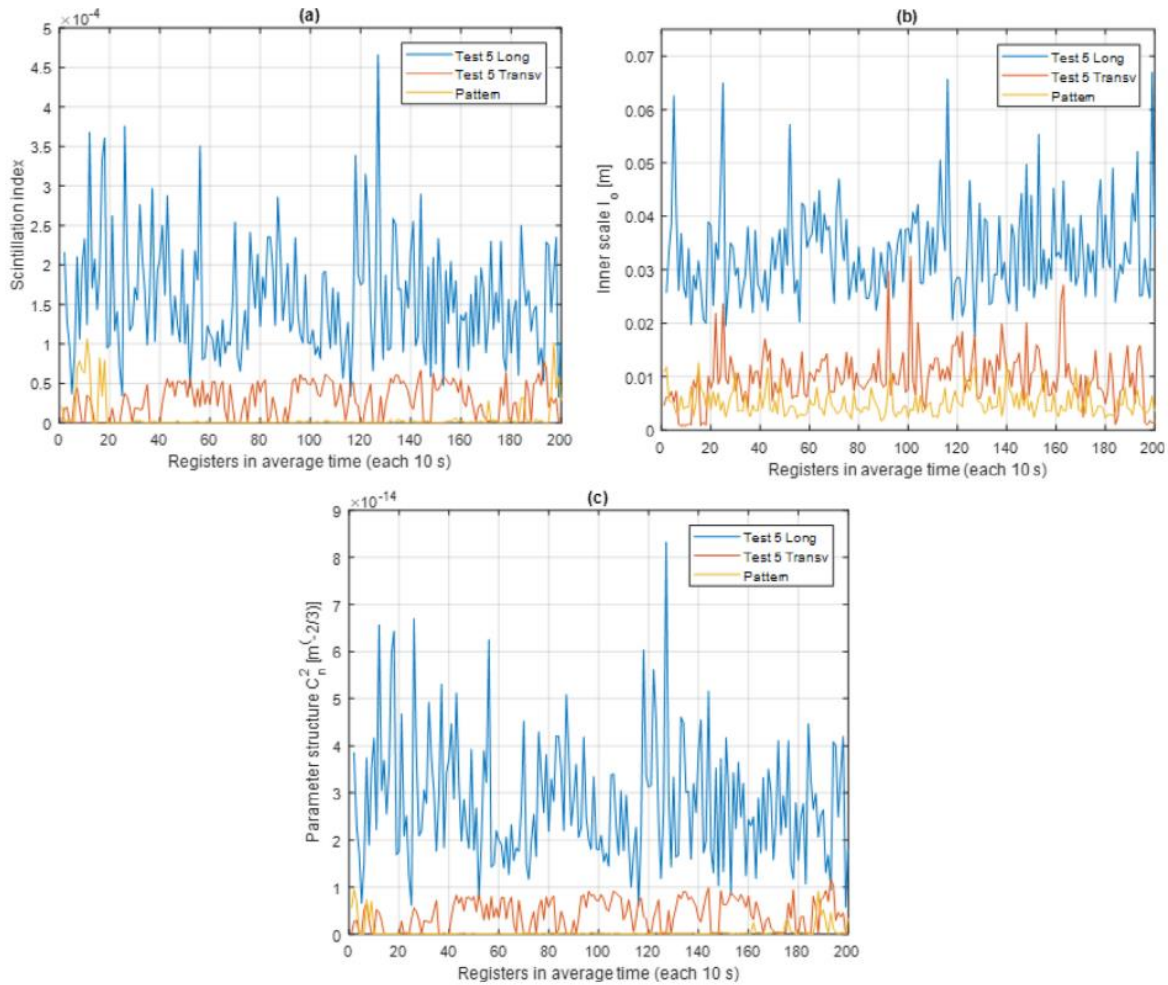


Fig. 13. Parameters to measure the turbulence effect, Test #5 in the longitudinal (blue) and transversal Path (brown) and pattern test (yellow). (a) Scintillation index. (b) Inner scale l_0 . (c) Parameter structure of the refractive index C_n^2 . (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)
 Source: Authors.

Table 4
 Fluctuations of centroid angle for each Test #.
 Source: Authors.

Test name	Fluctuations of centroid angle (μrad)						
	Radial		Horizontal		Vertical		
	Measured	Estimated	Measured	Estimated	Measured	Estimated	
Pattern	6.591	13.573	5.045	9.480	4.242	9.713	
Longitudinal	Test #1	21.720	15.256	13.	11.252	16.916	10.302
	Test #2	26.578	20.651	16.477	15.322	20.854	13.845
	Test #3	29.845	14.607	18.782	9.241	23.194	11.312
	Test #4	41.625	20.825	22.714	13.145	34.881	16.152
	Test #5	53.597	21.462	30.560	15.260	44.031	15.092
	Test #6	37.206	16.371	23.065	12.364	29.194	10.730
Transversal	Test #1	8.092	15.042	5.298	10.837	6.116	10.432
	Test #2	11.431	19.710	6.141	12.447	9.641	15.282
	Test #3	13.617	16.337	8.924	12.239	10.285	10.821
	Test #4	16.255	15.692	11.083	11.120	11.891	11.072
	Test #5	17.545	14.661	12.309	10.756	12.503	9.963
	Test #6	15.634	18.196	10.626	12.690	11.468	13.040

same time with the only objective of verifying their value and behavior. However, the behavior between these two physical variables and the velocity of the airflow had some interesting relationships. Therefore, different experiments show that when the airspeed increases in the longitudinal path, the laser beam presents more amplitude in its transversal fluctuations. However, it is stronger in the vertical than in the horizontal axis at the output beam plane. The C_n^2 parameter

was an important tool to evaluate the results described above, so the estimation of the turbulence strength gets an idea about the flow behavior. In this case, the longitudinal test showed a strong turbulence, the transversal test a moderate turbulence and the pattern test a weak turbulence. For this case, it is relevant to remember that the flow within the OTG is greater in the longitudinal case than in the transversal one, in addition, its effects are different, which is a starting point to

investigate an OTG design for airflow injection that conserves similar values in longitudinal and transversal propagation path. Forthcoming work involves adding two or more different wavelength laser beams in order to verify turbulence characteristics and at ground level, long horizontal path and in the open field.

Acknowledgment

O.J. Tíjaro Rojas acknowledges the support from Colciencias, Colombia under Call Number 647.

Funding

Universidad Industrial de Santander UIS, Colombia, Vicerrectoría de Investigación y Extensión VIE, Colombia, under Project 5707 and Colciencias, Colombia under Project 110256933773: “Uso de la Telescopía de Fourier de tiempo promedio para caracterizar la turbulencia a baja altura”, National Call for Bank of Projects in Science, Technology and Innovations 2012.


References

- [1] A. Kolmogorov, The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large reynolds numbers, *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A Math. Phys. Eng. Sci.* 434 (1890) (2010) 9–13.
- [2] D. Fried, J. Cloud, Propagation of an infinite plane wave in a randomly inhomogeneous medium, *J. Opt. Soc. Am.* 56 (12) (1966) 1667–1676.
- [3] D.L. Fried, Statistics of a geometric representation of wavefront distortion, *J. Opt. Soc. Am.* 55 (11) (1965) 1427–1435.
- [4] S. Li, S. Chen, C. Gao, A.E. Willner, J. Wang, Atmospheric turbulence compensation in orbital angular momentum communications: Advances and perspectives, *Opt. Commun.* 408 (2018) 68–81.
- [5] A. Consortini, Y.Y. Sun, C. Innocenti, Z.P. Li, Measuring inner scale of atmospheric turbulence by angle of arrival and scintillation, *Opt. Commun.* 216 (1–3) (2003) 19–23.
- [6] S. Rasouli, Use of a moiré deflectometer on a telescope for atmospheric turbulence measurements, *Opt. Lett.* 35 (9) (2010) 1470–1472.
- [7] F. Gustavo, M. Garavaglia, Determinación de la constantes de estructura del aire turbulento mediante interferometría Young, Pregraduated work, Universidad Nacional de la Plata, 2011.
- [8] T.S. McKechnie, *General Theory of Light Propagation and Imaging Through the Atmosphere*, Springer, 2016.
- [9] J.S. Hernández Quintero, J.O. Rincón Correa, O.J. Tíjaro Rojas, Y. Torres Moreno, Effects Characterization of Air Velocity in Atmospheric Turbulence from Laser Beam Propagation in a Horizontal Ground Path, Pregraduated work, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2016.
- [10] O.J.T. Rojas, Y.A.G. Traslaviña, Y.T. Moreno, Simple method to measure effects of horizontal atmospheric turbulence at ground level, in: *Laser Communication and Propagation Through the Atmosphere and Oceans V*, Vol. 9979, in: *Proceedings of International Society for Optics and Photonics*, 2016, p. 99790P.
- [11] W.T. Rhodes, Time-average fourier telescoping: a scheme for high-resolution imaging through horizontal-path turbulence, *Appl. Opt.* 51 (4) (2012) A11–A16.
- [12] D.D. Holm, Taylor’s hypothesis Hamilton’s principle and the lans- α model for computing turbulence, *Los Alamos Sci.* 29 (2005) 172–180.
- [13] J. Kwiecień, The effects of atmospheric turbulence on laser beam propagation in a closed space—an analytic and experimental approach, *Opt. Commun.* 433 (2019) 200–208.
- [14] J. Davis, Consideration of atmospheric turbulence in laser systems design, *Appl. Opt.* 5 (1) (1966) 139–147.
- [15] O. Wilfert, et al., Laser beam attenuation determined by the method of available optical power in turbulent atmosphere, *J. Telecommun. Inf. Technol.* (2009) 53–57.
- [16] Spectra-Physics, Model 107B/Model 127 25 or 35 mW Helium-Neon Lasers, 1996.
- [17] E. Optics, EO 1312C 1/1.8 \” CMOS Color USB Camer, 1992.
- [18] Honeywell, Airflow sensors datasheet. AWM700 series, compensated/amplified, cited June 6th 2019, 2015, URL <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-airflow-sensors-line-guide-008150-7-en2.pdf>.
- [19] I. Imaging Developem Systems, uEye ActiveX Control, 2008.
- [20] A. Labeyrie, S.G. Lipson, P. Nisenson, *An Introduction to Optical Stellar Interferometry*, Cambridge University Press, 2006.

**Apéndice C. Atmospheric Characterization Based on Relative Humidity Control at
Optical Turbulence Generator**

Article

Atmospheric Characterization Based on Relative Humidity Control at Optical Turbulence Generator

Jhonny Villamizar, Manuel Herreño, Omar Tíjaro *  and Yezid Torres

GOTS, Optics and Signal Processing Group, Physics School, Science Faculty, Electrical, Electronics and Telecommunication Engineering School, Universidad Industrial de Santander, 680002 Bucaramanga, Colombia; jhonny.villa.conde@gmail (J.V.); newfer89@gmail.com (M.H.); ytorres@uis.edu.co (Y.T.)

* Correspondence: otijaro@gmail.com

Received: 19 August 2019; Accepted: 30 August 2019; Published: 16 September 2019



Abstract: In atmospheric turbulence, relative humidity has been almost a negligible variable due to its limited effect, compared with temperature and air velocity, among others. For studying the horizontal path, a laser beam was propagated in a laboratory room, and an Optical Turbulence Generator (OTG) was built and placed along the optical axis. Additionally, there was controlled humidity inside the room and measuring of some physical variables inside the OTG device for determining its effects on the laser beam. The experimental results show the measurements of turbulence parameters C_n^2 , l_0 , and σ_I^2 from beam centroids fluctuations, where increases in humidity generated stronger turbulence.

Keywords: atmospheric turbulence; optics; ray trajectories in inhomogeneous media; humidity measurements

1. Introduction

Turbulence theories had helped to study the atmosphere for many years [1–3], and different dissertations, research papers, and projects have been proposed [4–10]. Those works have applied theories to evaluate statistically wavefront distortions and the angle of arrival fluctuations, including an updated study applied in a closed industrial environment, among others. Their main goal was to measure parameters of turbulence employing techniques such as Moiré deflectometry, telescopey, and collimated beams, incorporating some aberrations by collimated and focused processes, which could generate precision issues despite of the good results obtained. However, it is important to highlight that there are techniques to evaluate key parameters, such as inner scale (l_0), refraction structure index (C_n^2), and arrival angle (α) in the atmosphere propagation beam. Part of those methods was used in this work.

On the other hand, some reports indicate that not only one physical parameter can change turbulence behavior [11], and this fact motivated the construction of an OTG. It was built from a metal pipe, where some experiments to different relative humidity from water vapor were included [12].

Humidity is a measurement that generally refers to the amount of water vapor in the atmosphere. Each atmospheric gas has its own pressure and a specific number of molecules in a given temperature. The saturation vapor pressure is the pressure of vapor when liquid water begins to condense. Thus, relative humidity is determined as the current vapor pressure divided by the saturation vapor pressure [13].

Experiments were conducted with a scheme to study beam wander and atmospheric turbulence [14]. In this scheme, a few optical and electronic elements for measuring changes in the humidity parameter were included. Electronic sensors were previously calibrated to find a relation between relative humidity and beam centroid movements. This was possible with the use of an optical synchronization system that was operated with photodetectors, microcontrollers, and laptop-controlled cameras [12].

Data were processed and analyzed from the acquired images, achieving the assessment of fluctuations and turbulence parameters without using a lens to focus or expanding the beam, thus introducing less aberrations errors. There are some interesting findings that reveal fluctuations in the analysis of the binary effective area once the methods to generate turbulence from humidity are established. Besides, since the current systems employed to measure turbulence parameters are expensive, the model presented for evaluating humidity shows a simple technique that produces good results with less elements. Future works will consider the Fourier Telescopy scheme presented in [15], and the phase analysis [16] of Young’s fringes pattern obtained after the beam horizontal propagation.

2. Proposed System Description and Methods

Mathematical methods for studying turbulence parameters in this paper were based on movements of the laser beam spot acquired on CMOS cameras. The gray level centroids were estimated from these digitized images in order to evaluate their temporal fluctuation (as shown in Figure 1).

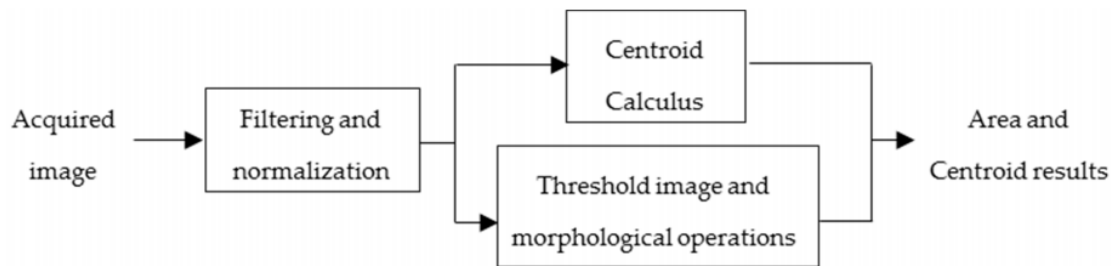


Figure 1. Signal processing scheme to register characteristics of beam centroid on an electronic embedded system. Source: Authors.

The centroids are included in the model shown in [14], whose purpose is to split laser cavity effects (mainly beam wander) of turbulence effects in the atmosphere. Figure 2 shows a spot on two planes located at distances z_1 and z_2 from the laser output, and the beam shifting that is modeled by r_1 and θ as translation and tilt, respectively, at times t_1 and t_2 .

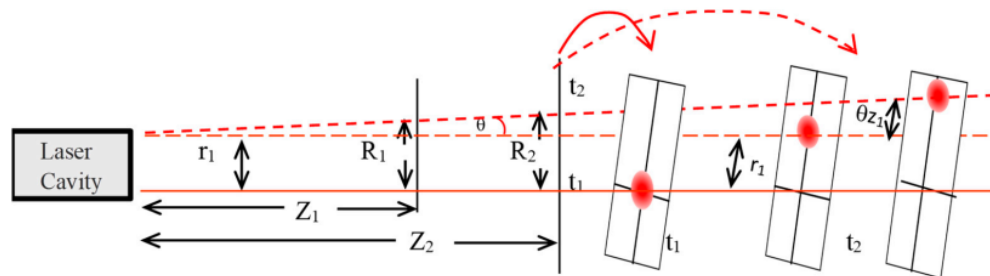


Figure 2. Transversal shifts of laser propagation, the illustration shows two observers placed at z_1 and z_2 , at t_1 (solid line) and t_2 (dashed lines), respectively. We assumed a centered beam at time t_1 , and beam wander effects at time t_2 due to laser cavity (in polar coordinates). Source: Authors.

From geometric optics, if z_1 is longer than the Rayleigh range and θ is smaller, z_1 and z_2 distances lead to:

$$R_1 = r_1 + \theta z_1, \tag{1}$$

$$R_2 = r_1 + \theta z_2, \tag{2}$$

where R_1 and R_2 model the position of the centroids computed from CMOS-1 and CMOS-2 (as shown in Figure 3 below); r_1 and θ are known whether the spot is captured in two different instants (t_1 and t_2). Notice that the time is discretized in order to find θ and to estimate the turbulence parameters from the fluctuations of the temporal angle and the scintillation index.

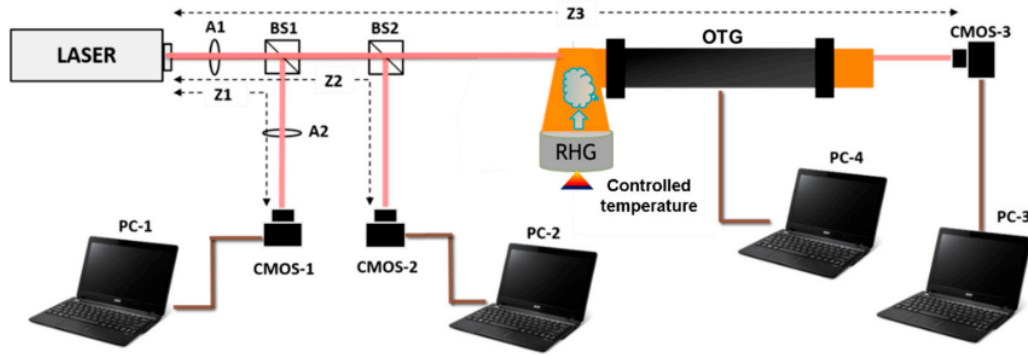


Figure 3. Experimental setup. A#: Density neutral filter. BS#: Beam Splitter#. CMOS#: CMOS Camera to acquire beam at $Z_1=1.18$ [m], $Z_2 =1.45$ [m] and $Z_3 =3.97$ [m]. OTG: Optical Turbulence Generator. RHG: Relative Humidity Generator. Source: Authors.

For computing the propagation angle in the Cartesian coordinates from geometric optics, let

$$\theta_x(k) = \frac{x_{n2}(k) - x_{n1}(k)}{z_2 - z_1} \tag{3}$$

and

$$\theta_y(k) = \frac{y_{n2}(k) - y_{n1}(k)}{z_2 - z_1}, \tag{4}$$

where n_1 and n_2 refer to two planes at z_1 and z_2 respectively, and k refers to the iteration time. These equations are used to estimate the location of the beam with only the beam wander effect in a plane at z_3 from the laser output. Similarly, the Equations (3) and (4) are computed only in the third plane (z_3) and two adjacent times (k and $k + 1$) in order to evaluate the spatial fluctuations with regards to the time.

On the other hand, the scintillation index, which measures intensity fluctuations, can be computed as:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1, \tag{5}$$

whose expression corresponds to a line-of-sight laser communication link and the inner scale as:

$$l_o = 1.08z_3 \sqrt{\frac{\langle \theta^2 \rangle}{\sigma_I^2}}, \tag{6}$$

with z_3 as the propagation distance, θ as (3–4), which corresponds to the cylindrical coordinates as depicted in Figure 4. Lastly, the refraction index can be computed from Equation (6) shown in [7] as:

$$C_n^2 = \frac{\sigma_I^2}{1.23k^{7/6}z_3^{11/6}}, \tag{7}$$

where, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ is the wave vector. The parameter C_n^2 is important since it characterizes the different stages as summarized in [10]. For example, Davis scale presents $C_n^2 \sim 10^{-18}m^{-2/3}$ as a very weak turbulence, $C_n^2 \sim 10^{-16}m^{-2/3}$ as weak turbulence, and $C_n^2 \sim 10^{-14}m^{-2/3}$ as strong turbulence [17], while Wilfter and Dordowa include two stages: $C_n^2 \sim 10^{-13}m^{-2/3}$ as very strong turbulence and $C_n^2 \sim 10^{-15}m^{-2/3}$ as mean turbulence [18].

Considering Equations (1)–(7) and the beam wander effects produced by laser cavity, the setup to acquire the information consists of a laser beam that is propagated horizontally, two CMOS sensors for measuring the propagation and position of the laser beam in non-controlled conditions, a relative humidity generator, an OTG (with a relative humidity sensor inside), and another CMOS sensor for

measuring the propagation in its XY coordinate plane, perpendicular to the Z axis of the laser beam propagation and after the altered propagation conditions. Figure 3 illustrates the setup configuration, and Table 1. shows the specifications of its components. The setup is based on the design proposed in Reference [14], but relative humidity is inserted in the OTG by controlling the water temperature inside a pot during the experiments. That is to say, the source of relative humidity is located under the OTG and a plastic pipe located transversally to the laser beam guides it. There is a hole in the left side of the pipe to propagate the laser beam from the OTG to the last sensor. PC-1 to PC-3 control the CMOS cameras acquisition, while PC-4 is used for programming and acquiring the relative humidity sensors data via an Arduino platform. Those sensors are located inside the OTG in three different positions: 10 cm, 60 cm, and 95 cm from its left edge

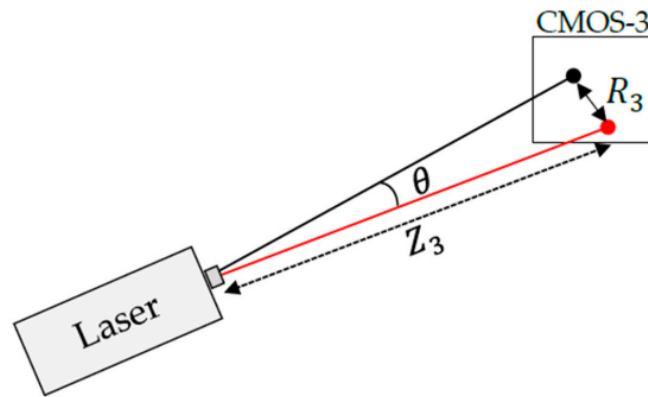


Figure 4. Scheme to compute the angle of centroids. Source: Authors.

Table 1. Summary of the main setup parameters.

Device	Characteristics
Laser	He-Ne Laser. Model 127-35. Power output: 35 mW. Wavelength: 632.8 nm [19].
CMOS Camera	Model: 1312C. Pixel Size: 5.3 μm. Pixels (H × V): 1280 × 1024. Area (H × V) (mm): 6.79 × 5.43 [20].
Relative Humidity Sensor	HST2030SMD – Temperature and Humidity Sensor by Measurement specialties [21]
Laptop	Intel processor, Core i3–i5. RAM Memory: 4GB.
Software	MATLAB®, Arduino Platform [22], IDS uEye [23].
RHG	Metal pot with an electronic temperature control.

A coupled hardware architecture was designed to measure the humidity, taking advantage of the capacitance variable sensor (Table 1). That variable was used as input of a circuit to generate frequency, so that any change in capacitance is transduced in a change in frequency. Lastly, the output signal transduced to voltage is filtered, amplified, and coupled to a microcontroller (from Analog to Digital Converter—ADC). Figure 5 shows the devices designed and their signal processing scheme is shown in Figure 6.

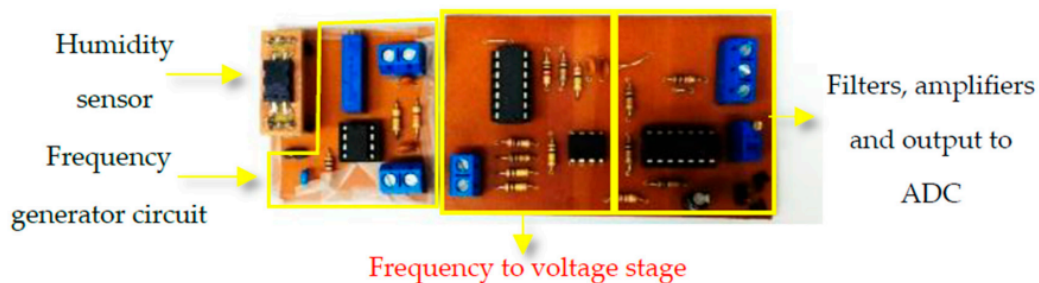


Figure 5. Designed board to add humidity signal to the microcontroller (ADC). Source: Authors.

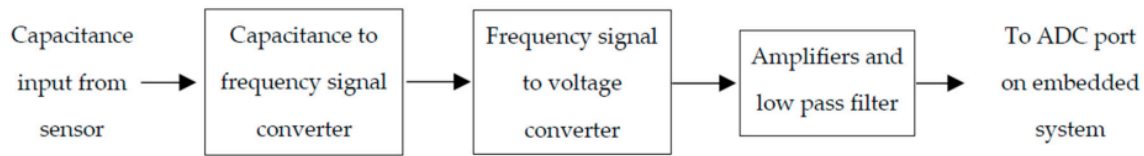


Figure 6. Signal processing scheme to register humidity fluctuations on an embedded system. Source: Authors.

Data acquisition starts with an optical synchronization, as shown in Figure 3. Cameras and sensors are set up before the laser beam port is opened. Thus, each subsystem is operating in an isolated manner under the frozen turbulence hypothesis [24]. Timers are programmed to acquire 1800 samples at a sampling frequency of 1 Hz. The number of samples considers the evaluation of humidity stability, calculation of the average time in turbulence parameter, and the sampling frequency to warrant synchronized acquisition over all devices (cameras, PCs, and micro-controller).

3. Results

Several experimental scenarios with controlled relative humidity were designed in order to evaluate the effects of relative humidity in the turbulence parameters. Some air temperature measurements are also summarized in Table 2 however, they were only references because the changes made in humidity lead to few changes in air temperature.

Table 2. Tests designed. Source: Authors.

Test Name	Relative Humidity (RH) Average (%)	RH Standard Deviation (%)	Temperature Average (°C)	T Standard Deviation (°C)
Pattern	64.05	±0.49	30.12	±0.32
Test 1	99.13	±0.26	31.13	±0.20
Test 2	57.88	±1.18	34.23	±0.08
Test 3	84.61	±1.49	29.8	±0.27

3.1. Synchronization

The synchronization time is measured from the previously programmed timers of MATLAB® and the Arduino Platform. Table 3 reports the experimental time for each test listed on Table 2. Notice that the worst case corresponds to Test 3, and the best average synchronization time corresponds to Test 1, following the frozen turbulence hypothesis [24].

Table 3. Synchronization time of different tests (Maximum and Minimum time in bold).

Test Name	PC1 vs PC2 (ms)		PC1 vs PC3 (ms)		PC1 vs PC4 (ms)	
	Time	Stand. Dev.	Time	Stand. Dev.	Time	Stand. Dev.
Pattern	26,45	16,57	40,3	18,8	13,84	8,10
Test 1	12,16	11,57	19,18	10,69	7,01	7,23
Test 2	39,27	30,61	34,77	19,19	4,49	8,13
Test 3	45,21	20,63	38,05	19,19	7,16	7,85

After the acquisition, a time model from [14] is implemented. It studies the transversal displacements of laser beam centroids and their 2D distribution; then, each spatial shift between times k and $k + 1$ is registered by all CMOS cameras. Therefore, it is used to find the centroid temporal distribution from Equations (1)–(4) of the images acquired by CMOS-1 and CMOS-2 and their estimated centroid at z_3 (CMOS-3 in Figure 3), and lastly, the current centroid on the CMOS-3 image.

3.2. Centroids Fluctuations

The first temporal fluctuation orders along the x and y-axis are calculated and analyzed from both the measured and estimated centroids (see Figure 7). In this section, movements are modeled as discrete variables; then, the minimum shifting calculated or estimated is a pixel.

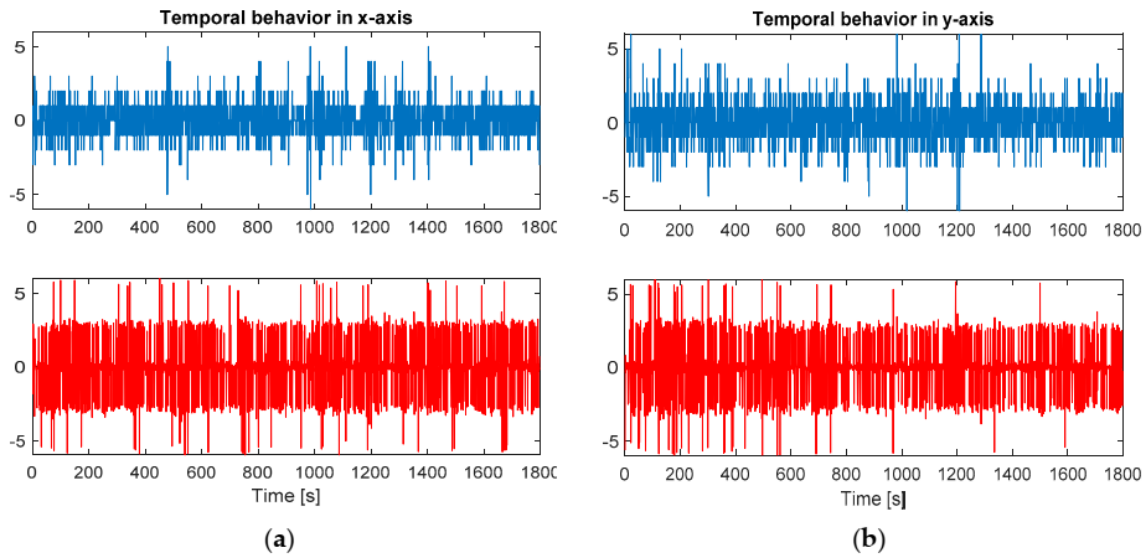


Figure 7. Temporal distribution, in cartesian coordinates, of centroid fluctuations to Pattern Test. Up: Measured at distance z_3 , Down: estimated at distance z_3 from distance z_1 and z_2 . (a) X-axis. (b) Y-axis. Source: Authors.

Figure 7 shows how the centroids measurements are near the center value (zero) and in both cases, the maximum fluctuation is close to 6 pixels. The results are similar in the estimated centroids, but there are effects due to the pixel size (see the CMOS Camera on Table 1). These results are shown as a 2D histogram in Figure 8. This representation indicates temporal fluctuations. Notice that the black color on the sidebar corresponds to the highest statistical frequency, while light red corresponds to the lowest frequency. Both the horizontal and vertical axis are movements on the plane of the laser beam centroid.

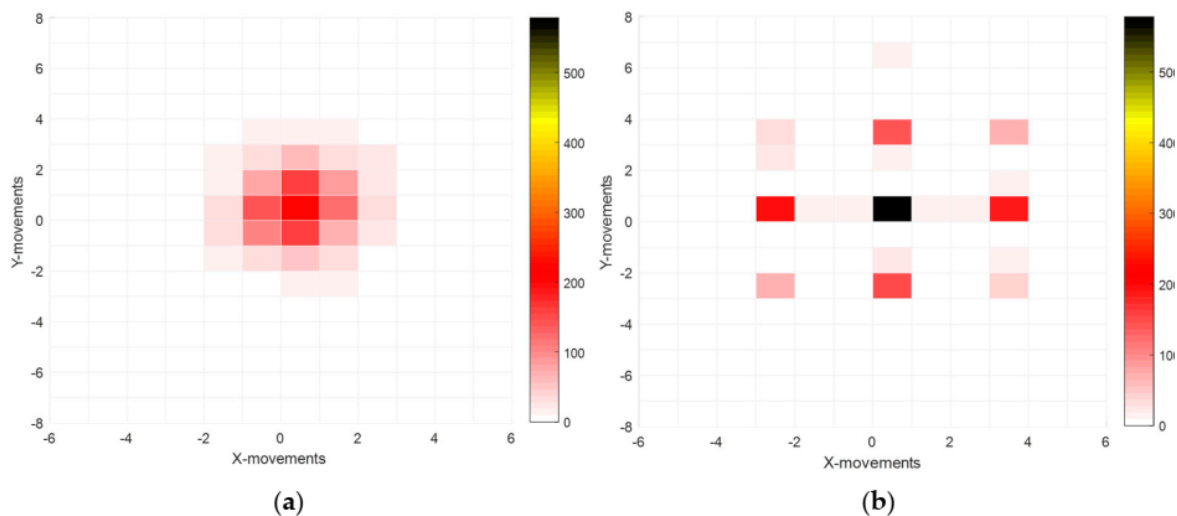


Figure 8. 2D histogram of temporal fluctuations in the Pattern Test (X and Y movements are in pixels). (a) Measured at distance z_3 . (b) Estimated at z_3 from distance z_1 and z_2 . Source: Authors.

Figure 8 shows the histogram with some null values between pixels close to the center due to z_3 propagation distances (this corresponds to the geometrical projection from the plane of cameras CMOS 1-2 to the z_3 plane, as shown in Table 1). When the relative humidity is incorporated, their effects over the centroid fluctuations could be measured at z_3 . Figure 9 shows these compared results.

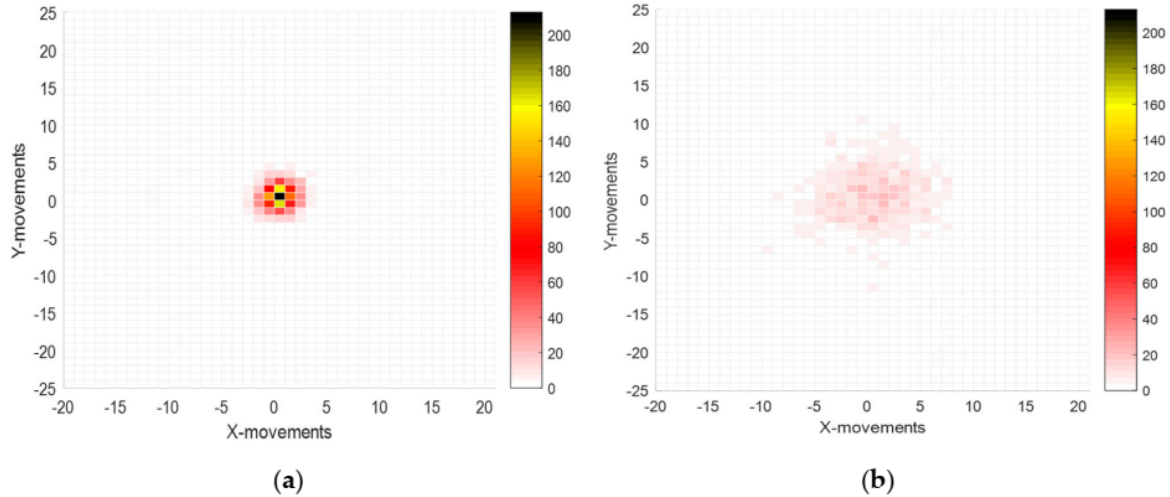


Figure 9. 2D histogram of temporal fluctuations measured at z_3 : (a) Pattern Test. (b) Test #1. Source: Authors.

Notice that the central point (labeled (0,0) corresponding to the optical axis) has the highest frequency in Figure 9a. In contrast, in Figure 9b, the region with the maximal frequency has been shifted several pixels to the right from the central point (which is difficult to see in the linear scale of the color bar), and dispersion of centroid fluctuations changed from ± 8 pixels for the Pattern Test to ± 25 pixels for Test #1. Furthermore, results from Test #2 and Test #3 are compared to the Pattern Test, and the results are shown in Figures 10 and 11. In both cases, the dispersion of fluctuations describes the humidity effects in the propagated laser beam. When the dispersion is large, the turbulent effect is strong. It is considered that the experimental setup conditions perhaps generate an additional vortex due to the 90° —incidence angle of the water vapor with regards to the optical path. Then, when the relative humidity produced by the vapor is large, so is the fluctuation of the laser beam centroid.

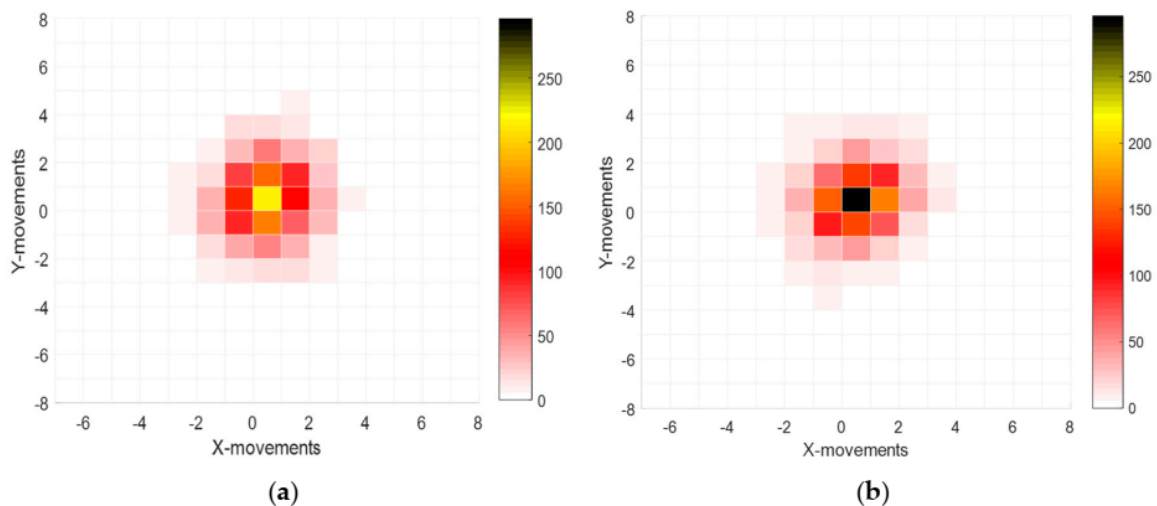


Figure 10. 2D histogram of temporal fluctuations measured at z_3 plane: (a) Pattern Test. (b) Test #2. Source: Authors.

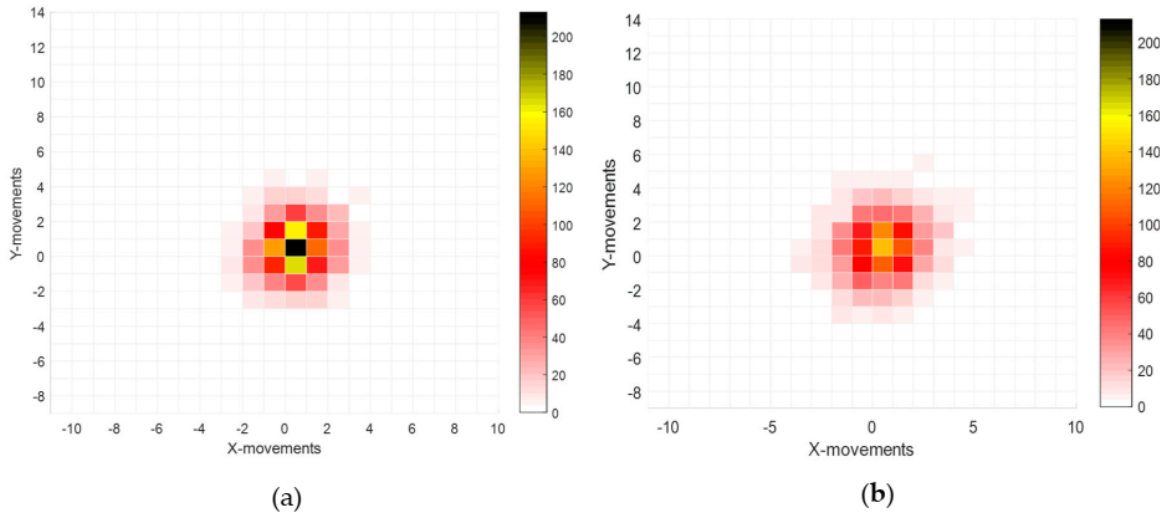


Figure 11. 2D histogram of temporal fluctuations measured at z_3 plane: (a) Pattern Test. (b) Test #3. Source: Authors.

Notice that the dispersion in Test #2 is lower than in the Pattern Test case. It is caused by the relative humidity. Table 2 shows a relative humidity below the one for the Pattern Test.

3.3. Angle Computation

Results shown in Figure 7 and Equations (1)–(2) are used to measure the θ -angle. Measurements presented in Section 3.2 are proportional to θ , as follows:

$$\theta_x[k] = \frac{x[k] - x[k - 1]}{z_3}, \theta_y[k] = \frac{y[k] - y[k - 1]}{z_3}, \theta[k] = \sqrt{\theta_x^2[k] + \theta_y^2[k]} \tag{8}$$

The pixel size reported in Table 1 for the CMOS-3 camera is incorporated to convert discrete spatial measurements in the plane into an angular discrete variable. Therefore, each pixel is converted. Figure 12 displays the fluctuations of angle.

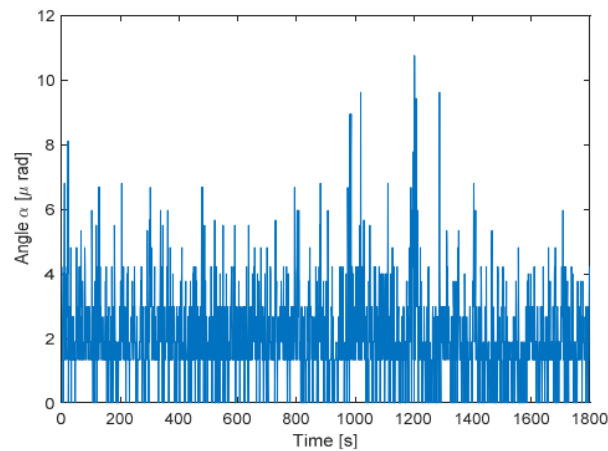


Figure 12. Temporal distribution for the angle of the centroid for the Pattern Test, measured at the z_3 plane. Source: Authors.

These angle fluctuations allow obtaining the angle structure functions and the structure functions for Test #1 to Test #3, which are introduced in the next section.

3.4. Structure Functions and Turbulence Parameters

The structure function from Kolmogorov’s theory [1,25] is used to measure local fluctuations in the centroids and the θ -angle:

$$D_f(\vec{r}) = \langle [(\vec{r}_1 + \vec{r}) - f(\vec{r}_1)]^2 \rangle, \tag{9}$$

where D is the structure function of f , the physical variable; \vec{r} is a selected position vector to measure D ; \vec{r}_1 is any other position vector relative and close to \vec{r} , assuming a homogeneous region in the acquisition area (on the CMOS camera plane); and $\langle \ \rangle$ indicates the average time. After analysis, fluctuations are classified in groups of ten consecutive samples to compute the average time for getting the fluctuation angle of the centroid for each test as shown in Figure 13 (only for the first 1000 samples) and in Table 4 for all of the samples. Fluctuations are measured in relation to the average value of the angle of centroid ($\bar{\theta}$).

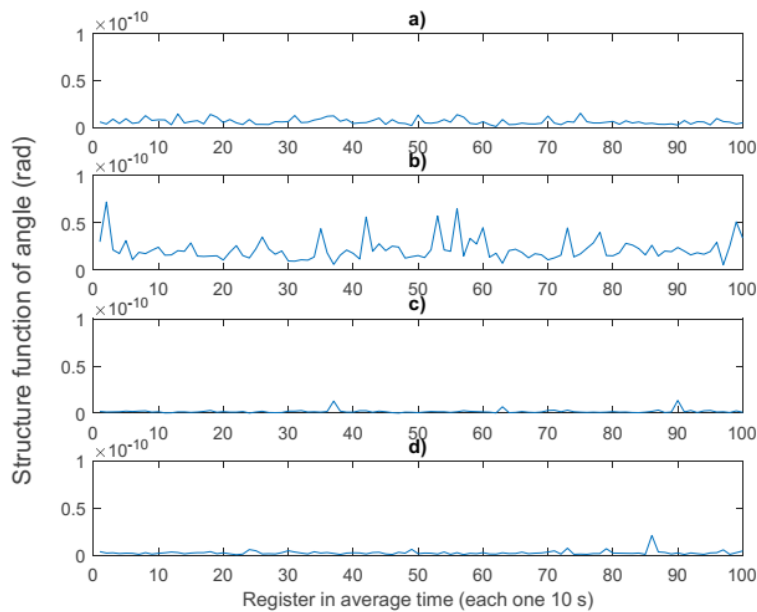


Figure 13. Fluctuations for the angle of centroid (θ) according to Test: (a) Pattern. (b) Test #1. (c) Test #2. (d) Test #3. Source: Authors.

Table 4. Statistics of parameters to calculate θ and σ_I^2 .

Test Name	θ Average Angle (prad)	θ Stand. Dev. Angle (prad)	σ_I^2 Average (10 ⁻⁶)	σ_I^2 Stand. Dev. (10 ⁻⁶)	l_0 Average (mm)	l_0 Stand. Dev. (mm)
Pattern	2.02	2.15	0.58	0.71	16.31	6.98
Test 1	34.8	34.2	243.4	133.1	6.02	4.16
Test 2	2.39	2.66	1.14	2.08	7.37	4.17
Test3	3.64	5.15	5.89	0.55	6.97	3.70

The fluctuation of the highest angle was found in Test #1, where the relative humidity was close to 100%. Even though the Pattern Test had shorter fluctuations than Test #1, we could not affirm, at this time, anything about a relationship between humidity and angle fluctuation. On the other hand, the scintillation index is computed from the acquired images using Equation (5), aside a constant factor calibrated from a power meter device. The outcomes are shown in Figure 14.

It can be observed on Figure 14 that the scintillation index was most stable in the Pattern Test; Test #1 had more variations, and both Test #2 and Test #3 had insignificant variation. Then, the inner scale l_0 is also computed from previous results and Equation (6), as shown in Figure 15.

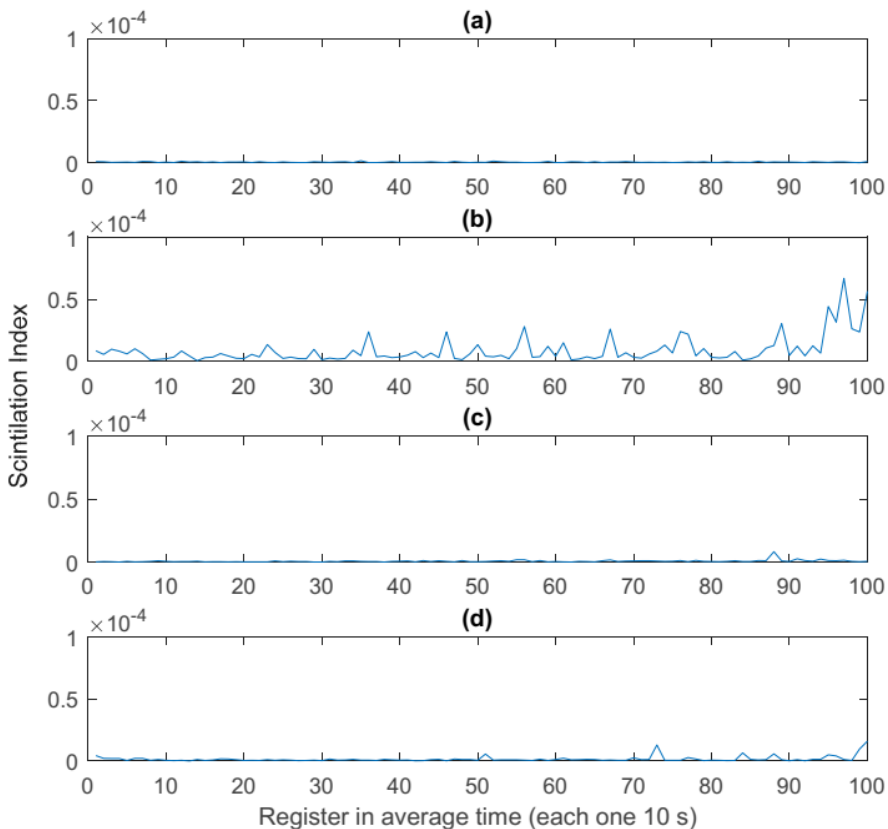


Figure 14. Scintillation index (σ_I^2) according to Test: (a) Pattern. (b) Test #1. (c) Test #2. (d) Test #3. Source: Authors.

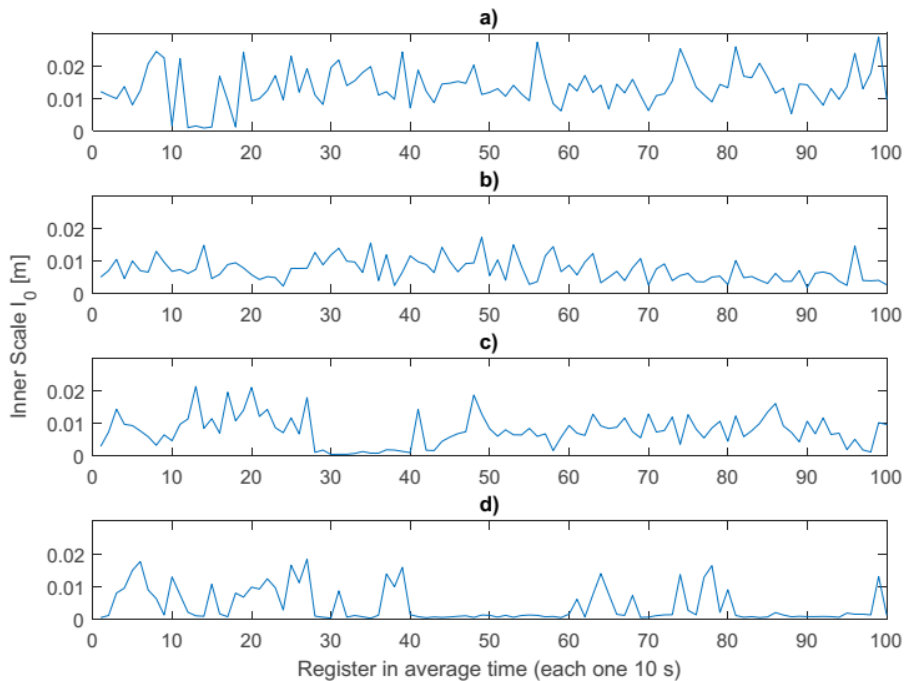


Figure 15. Inner Scale (l_0) according to Test: (a) Pattern. (b) Test #1. (c) Test #2. (d) Test #3. Source: Authors.

Figure 15 shows Test #1 as the smallest inner scale which is an expected value because the inner scale must be small when turbulence is strong.

On the other hand, Table 4 shows final statistics for different turbulence parameters and Figure 16 the results of computing C_n^2 , the refractive index structure constant.

In Figure 16, it was necessary to use a different scale in Test #1 to detail the values on the effect of turbulence in the other tests. In this case and using Equation (7), we could identify that the scale on Figure 16b is 10 times greater than its c and d.

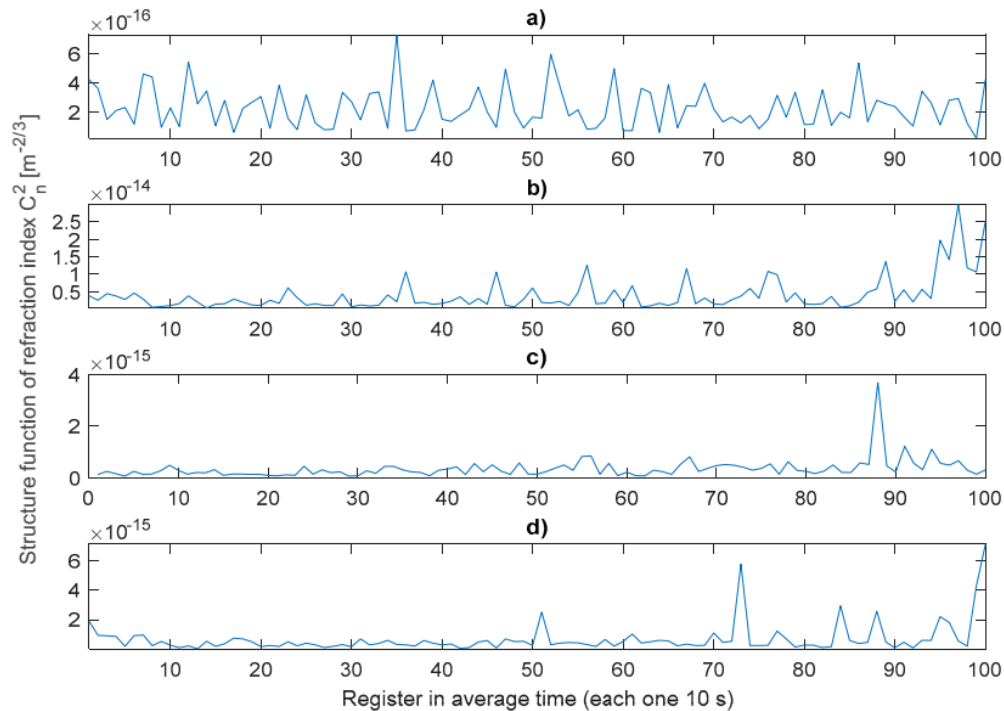


Figure 16. Refraction index structure constant C_n^2 according to Test: (a) Pattern. (b) Test #1. (c) Test #2. (d) Test #3. Source: Authors.

Finally, Table 5 shows the average and the standard deviation of the refractive index structure constant (C_n^2). Notice that Test #1 corresponds to a strong turbulence at a relative humidity of 99.13%.

Table 5. Statistics of parameters to calculate C_n^2 .

Test Name	C_n^2 Average ($m^{-2/3}$)	C_n^2 Stand. Dev. ($m^{-2/3}$)
Pattern	2.28×10^{-16}	1.4×10^{-16}
Test #1	4.05×10^{-15}	4.91×10^{-15}
Test #2	3.45×10^{-16}	4.01×10^{-16}
Test #3	6.95×10^{-16}	1.01×10^{-15}

4. Discussion

The techniques presented were implemented as a collaborative arrangement between electronic and optical devices. Temporal synchronization is important to ensure that each sample is taken under the frozen turbulence hypothesis. CMOS-1 and CMOS-2 were used to test the model and estimate centroids fluctuations as shown in Figures 7 and 8. In addition, 2D histograms calculated to see temporal movements were a key to study the turbulence behavior.

Regarding previous results, devices were adapted to measure different turbulence parameters [7]. Besides, if only C_n^2 is observed, it is difficult—and perhaps impossible—to associate humidity changes to estimate the degree of turbulence. It means that the highest value of humidity corresponded to the moderate turbulence; on the other hand, in normal conditions observed at Pattern Test, the turbulence was weak, as well, while the other parameters were coherent with the relative humidity value.

5. Conclusions

This paper proposes a simple technique to change the relative humidity, isolated from the experimental setup, to measure its effects on an optical turbulence generator. This setup allows temporal fluctuations in the frontwave of the laser beam because of the controlled relative humidity inside the OTG. Fluctuations are computed from the centroids of images acquired at different horizontal distances from the laser output. In addition, the arrival angle and the intensity were computed from the experimental measurements. Other turbulence parameters had a behavior in accordance with the relative humidity changes (in line with the average values in Table 4). Further, the study used a laser beam propagated horizontally without a telescope, lens, or any other optic element, avoiding aberrations and high-cost devices. A scheme using an interferometer and a fringe pattern to compute the optical phase effect will be considered for future works.

Author Contributions: J.V. and M.H. designed the hardware and software, built the prototype and made the first analysis. O.T. conceived and designed the study, performed the models and wrote the manuscript. Y.T. supervised the study and reviewed the manuscript.

Funding: This research was funded by UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER UIS, Vicerrectoría de Investigación y Extensión VIE, project 5707, Colciencias project 110256933773: “Uso de la Telescopía de Fourier de tiempo promedio para caracterizar la turbulencia a baja altura”, National Call for the Bank of Projects in Science, Technology and Innovations 2012.

Acknowledgments: O. J. Tijero Rojas acknowledges the support from Colciencias under Call Number 647.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Kolmogorov, A.N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *Proc. R. Soc. London. Ser. A Math. Phys. Sci.* **1991**, *434*, 9–13. [CrossRef]
2. Tatarski, V.I. *Wave Propagation in a Turbulent Medium*; Dover Publ.: Toronto, ON, Canada, 1961.
3. Larry, L.C.; Philips, R.L. *Laser Beam Propagation through Random Media*; SPIE Optic.: Washington, DC, USA, 2005; Volume 2, ISBN 0819459488.
4. Dashti, M.; Rasouli, S. Measurement and statistical analysis of the wavefront distortions induced by atmospheric turbulence using two-channel moiré deflectometry. *J. Opt.* **2012**, *14*, 095704. [CrossRef]
5. Rasouli, S.; Tavassoly, M.T. Application of moiré technique to the measurement of the atmospheric turbulence parameters related to the angle of arrival fluctuations. *Opt. Lett.* **2006**, *31*, 3276–3278. [CrossRef] [PubMed]
6. Rasouli, S. Use of a moiré deflectometer on a telescope for atmospheric turbulence measurements. *Opt. Lett.* **2010**, *35*, 1470–1472. [CrossRef] [PubMed]
7. Consortini, A.; Sun, Y.Y.; Innocenti, C.; Li, Z.P. Measuring inner scale of atmospheric turbulence by angle of arrival and scintillation. *Opt. Commun.* **2003**, *216*, 19–23. [CrossRef]
8. Gustavo, F.; Garavaglia, M. *Determinación de la Constantes de Estructura del Aire Turbulento Mediante Interferometría Young*; Universidad Nacional de la Plata: Buenos Aires, Argentina, 2011.
9. Jurado Navas, A.; Puerta Notario, A. *Enlaces ópticos no Guiados con técnicas de Diversidad en Canal Atmosférico Afectado por Turbulencias*; Universidad de Málaga: Málaga, Spain, 2010; Volume 43.
10. Kwiecień, J. The effects of atmospheric turbulence on laser beam propagation in a closed space—An analytic and experimental approach. *Opt. Commun.* **2019**, *433*, 200–208. [CrossRef]
11. Mckechnie, T.S. *General Theory of Light Propagation and Imaging Through the Atmosphere*; Rhodes, W.T., Ed.; Springer: Basel, Switzerland, 2016; ISBN 9783319182087.
12. Herreño Vanegas, M.F.; Villamizar Conde, J. *Estudio de los Efectos de la Humedad en la Caracterización de la Propagación de un haz láser a Través de la Turbulencia Atmosférica a Bajas Alturas en Trayectorias Horizontales*; Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga, Colombia, 2016; Volume 1.
13. Hovis, J. What Causes Humidity? Available online: <https://www.scientificamerican.com/article/what-causes-humidity/> (accessed on 13 December 2017).
14. Tijero, O.; Galeano, Y.; Torres, Y. Method to measure effects of turbulence using CCD sensors and beam centroids. *Laser Commun. Propag. through Atmos. Ocean. V* **2016**, *9979*, 99790P. [CrossRef]

15. Rhodes, W.T. Time-average Fourier telescope: A scheme for high-resolution imaging through horizontal-path turbulence. *Appl. Opt.* **2012**, *51*, A11. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Meneses, J.; Gharbi, T.; Humbert, P. Phase-unwrapping algorithm for images with high noise content based on a local histogram. *Appl. Opt.* **2005**, *44*, 1207–1215. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Davis, J.I. Consideration of atmospheric turbulence in laser systems design. *Appl. Opt.* **1966**, *5*, 139–147. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
18. Wilfert, O. Laser beam attenuation determined by the method of available optical power in turbulent atmosphere. *J. Telecommun. Inf. Technol.* **2009**, 53–57.
19. Spectra-Physics Model 107B/Model 127 (25 or 35 mW) Helium-Neon Lasers. 1996, pp. 1–4. Available online: <http://www.asi-team.com/asi%20team/brookhaven/35mW-Laser.pdf> (accessed on 1 September 2019).
20. Optics, E. EO 1312C 1/1.8" CMOS Color USB Camera. 1992, 473. Available online: <https://www.edmundoptics.com/p/eo-1312c-118-cmos-color-usb-camera/26850/> (accessed on 1 September 2019).
21. Specialties, M. HTS2030SMD—Temperature and Relative Humidity Sensor. Available online: <https://datasheet.octopart.com/HTS2030SMD-TE-Connectivity-datasheet-15992094.pdf> (accessed on 1 September 2019).
22. Arduino Platform. Available online: <https://www.arduino.cc/> (accessed on 1 September 2019).
23. Imaging Developem Systems, I. uEye ActiveX Control. Available online: <https://en.ids-imaging.com/manuals-ueye-software.html> (accessed on 3 September 2019).
24. Holm, D.D. Taylor's Hypothesis, Hamilton's Principle, and the LANS-a Model for Computing Turbulence. *Los Alamos Sci.* **2005**, 172–180.
25. Labeyrie, A.; Lipson, S.G.; Nisenson, P. *An Introduction to Optical Stellar Interferometry*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2006; ISBN 9780521828727.



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).