

Caracterización de los efectos de la turbulencia atmosférica sobre el camino de propagación de un haz láser a diferentes distancias horizontales y baja altura

Sergio Enrique Reyes Aparicio, Andrés Felipe Vásquez Caicedo

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electrónico

Director

Yezid Torres Moreno

Dr. Óptica y Tratamiento de la señal

Codirector

Omar Javier Tijero Rojas

Dr(C). Ingeniero Electrónico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2018

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a:

A Dios, gracias a su voluntad y generosidad fue posible culminar este proyecto de grado, gracias por estar presente no solo en esta etapa que es muy importante para nosotros, sino en todos los momentos, gracias por cada reto afrontado durante este proceso lo cual nos sirvió como una oportunidad de mejoramiento y aprendizaje.

Al profesor Yezid Torres Moreno, nuestro director, por su apoyo y confianza, por permitirnos formar parte del grupo de investigación (GOTS), por su disposición y consejos a lo largo del proyecto.

Agradecemos al profesor Omar Javier Tíjaro, nuestro codirector, por tomarse el arduo trabajo de transmitirnos todos y cada uno de sus conocimientos acerca del tema, además de estar pendiente en todo momento en cada reto afrontado durante la realización del proyecto y por orientarnos en nuestro desarrollo como ingenieros.

A los integrantes del grupo de investigación GOTS de la Universidad Industrial de Santander, por su constante apoyo, que nos acogieron y nos brindaron sus conocimientos para la realización de este proyecto.

A los integrantes del laboratorio de Microscopía, ubicado en la sede UIS-Guatiguará, por su colaboración y los espacios brindados para la ejecución del proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander por ser el pilar de nuestro desarrollo como ingenieros, a la escuela de Física y de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones por ser partícipes de nuestro proceso de formación que nos permite tener un proceso tanto intelectual como personal.

A todas aquellas personas que de una u otro manera contribuyeron a la realización de este proyecto.

Contenido

	Pag.
Introducción	20
1. Generalidades del Proyecto.....	22
1.1 Planteamiento del problema.....	22
1.2 Justificación	23
1.3 Objetivos.....	24
1.3.1 Objetivo General:.....	24
1.3.2 Objetivos Específicos.....	24
1.4 Alcances.....	25
2. Fundamentos Teóricos	26
2.1 El láser y sus características.....	26
2.1.1 El láser	26
2.1.2 Propiedades de la luz láser.....	27
2.1.3 Bando	28
2.1.4 Divergencia del haz láser	30
2.1.5 Especificaciones del láser usado.....	30
2.2 Sensores y sistemas embebidos	31
2.2.1 Sensado de temperatura	31

2.2.2 Sensado de Humedad.....	32
2.2.5 Sensado de imágenes	34
2.2.6 Sistema embebido	36
2.3 Tratamiento de imágenes digitales.....	38
2.3.1 Filtrado de la imagen	39
2.3.2 Filtros lineales	40
2.3.3 Filtros basados en derivadas de la función Gaussiana	40
2.3.5 Filtrado en el dominio de la frecuencia.....	41
3. Metodología para el desarrollo del proyecto.....	43
3.1 Acondicionamiento y construcción del montaje experimental.....	43
3.2 Implementación del sistema, algoritmo de adquisición, sincronización y captura de datos... 50	
3.2.1 Circuito de sensado de variables ambientales.....	50
3.2.2 Algoritmo de adquisición de variables ambientales	53
3.2.3 Algoritmo de adquisición de las cámaras	54
3.2.4 Sincronización del sistema.....	55
3.2.5 Captura de datos.....	57
3.3 Tratamiento de imágenes	58
3.3.1 Inicio	59
3.3.2 Filtrado.....	60
3.3.3 Normalización.....	60

3.3.4 Binarización	60
3.3.5 Arreglos morfológicos	61
3.3.6 Calculo del centroide	61
3.4 Análisis de resultados	63
3.4.1 Sincronización de las pruebas	63
3.4.1 Prueba a escala de Laboratorio	64
3.4.2 Pruebas en campo	71
3.4.3 Función estructura.....	93
4. Conclusiones y observaciones	97
Referencias bibliográficas.....	101
Apéndices.....	107

Lista de Tablas

Tabla 1. Especificaciones técnicas del láser Verdi V2 de Coherent, INC (Coherent, 2011).....	31
Tabla 2. Características del sensor de humedad HTS2030SMD.....	33
Tabla 3. Especificaciones del sensor de la cámara EO-1312C de Edmund Optics (“EO-1312C 1/1.8” CMOS Color USB Camera Edmund Optics,” n.d.).....	35
Tabla 4. Características de la placa STM32F746G – Discovery (ST, 2015).	37
Tabla 5. Aproximación de diferentes filtros derivados de la función Gaussiana (“Ruido y Filtrado,” 2015).....	41
Tabla 6. Elementos utilizados para el montaje experimental en laboratorio.....	45
Tabla 7. Tiempo de exposición de prueba experimental en laboratorio.....	46
Tabla 8. Elementos utilizados para el montaje experimental en campo abierto.....	49
Tabla 9. Tiempos de exposición y distancias para las pruebas realizadas en campo.....	50
Tabla 10. Sensores integrados en cada uno de los dispositivos en hardware diseñados e implementados.....	51
Tabla 11. Distancia de los sensores en con respecto a la salida de haz láser para las pruebas en campo.....	58

Tabla 12. Distancia máxima de propagación del haz láser y hora de adquisición de cada prueba.	58
Tabla 13. Tiempos de sincronismo para cada prueba.	63
Tabla 14. Valores promedio y desviaciones estándar de las variables ambientales en la prueba en laboratorio.	70
Tabla 15. Resultados del centroide para las pruebas realizadas en cada situación.	88
Tabla 16. Promedios y desviación estándar de la temperatura en cada una de las pruebas en campo.	90
Tabla 17. Promedios y desviación estándar de la humedad en cada una de las pruebas en campo.	91
Tabla 18. Promedios y desviación estándar de la presión en cada una de las pruebas en campo.	92
Tabla 19. Promedios y desviación estándar del flujo de aire en cada una de las pruebas en campo.	92
Tabla 20. Máxima fluctuación del centroide en todas las pruebas.	97
Tabla 21. Frecuencias típicas en función de la humedad para el sensor HTS2030SMD (Specialties, 2012).	108
Tabla 22. Ecuaciones de conversión de litros por segundo a metros por segundo.	112

Lista de Figuras

Figura 1. Efecto de emisión estimulada (Fernández et al., 2010).....	27
Figura 2. Modelado del movimiento en la cavidad del láser (Tíjaro Rojas, Galeano Traslaviña, & Torres Moreno, 2016).....	29
Figura 3. Sensor de temperatura LM35 (Self-heating & Output, 2013).....	32
Figura 4. Cámara modelo CMOS EO – 1312 (“EO-1312C 1/1.8” CMOS Color USB Camera Edmund Optics,” n.d.).....	35
Figura 5. Microcontrolador STM32F746G – Discovery de STMicroelectronics (ST, 2015).....	37
Figura 6. Diseño y aplicación de filtros en el dominio de la frecuencia, mediante la utilización de la transformada de Fourier (TF) y de su inversa (TF) – 1 , tomado de referencia (Ruiz Fernández & Ángel, n.d.).....	42
Figura 7. Montaje experimental de prueba de laboratorio.....	45
Figura 8. Montaje experimental de pruebas en campo. Fuente [autores].....	48
Figura 9. Montaje experimental implementado para las pruebas en campo.....	48
Figura 10. Sensor CMOS-3 y expensor de haz posicionados a las diferentes distancias empleadas en la experimentación.....	49
Figura 11. Circuito de sensado de variables atmosféricas implementado.....	52
Figura 12. Módulo de humedad propuesto por el fabricante implementado.....	52

Figura 13. Diagrama de flujo del algoritmo de adquisición implementado en el Microcontrolador STM32F746G – Discovery.....	53
Figura 14. Diagrama de flujo del algoritmo de adquisición implementado en las cámaras, tomado de la referencia (Rincón Correa & Hernandez Quintero, 2016).....	54
Figura 15. Tiempo de retardo en los equipos de computo en la prueba de sincronización.....	56
Figura 16. Algoritmo de tratamiento de Imágenes.....	59
Figura 17. Proceso del tratamiento de las imágenes capturadas en cada una de las pruebas. a) Imagen original b) Imagen filtrada c) Imagen normalizada d) Imagen binarizada e) Imagen binario con arreglos morfológicos f) Spot del haz con el centroide.....	63
Figura 18. Dispersión del centroide en la prueba de laboratorio. a) A partir de CMOS-1 y CMOS-2 (IZQUIERDA). b) Visto desde el sensor CMOS-3.....	65
Figura 19. Movimiento radial del centroide obtenido en la prueba de laboratorio, vista desde la cámara CMOS-3 (AZUL) y proyectada a partir de la cámara CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).....	66
Figura 20. Movimiento horizontal del centroide obtenido en la prueba de laboratorio, vista desde la cámara CMOS-3 (AZUL) y proyectada a partir de la cámara CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO)...	67
Figura 21. Movimiento vertical del centroide obtenido en la prueba de laboratorio, vista desde la cámara CMOS-3 (AZUL) y proyectada a partir de la cámara CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).....	67
Figura 22. Temperatura a lo largo del camino de propagación del haz láser durante la prueba de laboratorio. a) Temperatura a 2,10m del haz láser (Izquierda). b) Temperatura a 4,50m del haz láser (Derecha).....	68

Figura 23. Humedad a lo largo del haz láser durante la prueba de laboratorio. a) Humedad a 2,10m del haz láser. b) Humedad a 4,50m del haz láser.....	68
Figura 24. Presión capturada durante la prueba de Laboratorio ubicado a 3m del haz láser.....	69
Figura 25. Flujo del viento durante la prueba de laboratorio a 3m del haz láser.....	69
Figura 26. Dispersión del centroide obtenido en la prueba 3. a) A partir de CMOS-1 y CMOS-2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS-3.....	71
Figura 27. Movimiento radial del centroide obtenido en la prueba 3, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).....	72
Figura 28. Movimiento horizontal del centroide obtenido en la prueba 3, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).....	73
Figura 29. Movimiento vertical del centroide obtenido en la prueba 3, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).....	73
Figura 30. Humedad en la prueba 3. a) Humedad a 4,46mt de la salida del haz láser (Izquierda). b) Humedad a 25,40mt de la salida del haz láser (Derecha).....	74
Figura 31. Temperatura en la prueba 3. a) Temperatura a 6,19mt de la salida del haz láser (Izquierda). b) Temperatura a 23,20mt de la salida del haz láser (Derecha).....	75
Figura 32. Presión en la prueba 3. a) Presión a 6,19mt de la salida del haz láser (Izquierda). b) Presión a 23,20mt de la salida del haz láser (Derecha).....	75
Figura 33. Flujo del aire en la prueba 3. a) Flujo del aire a 6,19mt de la salida del haz láser (Izquierda). b) Flujo del aire a 23,20mt de la salida del haz láser (Derecha).....	76

Figura 34. Dispersión del centroide obtenido en la prueba 4. a) A partir de CMOS-1 y CMOS-2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS-3 (Derecha).....	77
Figura 35. Movimiento radial del centroide obtenido en la prueba 4, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).....	78
Figura 36. Movimiento horizontal del centroide obtenido en la prueba 4, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).....	79
Figura 37. Movimiento vertical del centroide obtenido en la prueba 4, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).....	79
Figura 38. Humedad en la prueba 4. a) Humedad a 4,46mt de la salida del haz láser (Izquierda). b) Humedad a 25,40mt de la salida del haz láser (Derecha).....	80
Figura 39. Temperatura en la prueba 4. a) Temperatura a 6,19mt de la salida del haz láser (Izquierda). b) Temperatura a 23,20mt de la salida del haz láser (Derecha).....	81
Figura 40. Presión en la prueba 4. a) Presión a 6,19mt de la salida del haz láser (Izquierda). b) Presión a 23,20mt de la salida del haz láser (Derecha).....	81
Figura 41. Flujo de aire en la prueba 4. a) Flujo de aire a 6,19mt de la salida del haz láser (Izquierda). b) Flujo de aire a 23,20mt de la salida del haz láser (Derecha).....	82
Figura 42. Dispersión del centroide obtenido en la prueba 6. a) A partir de CMOS-1 y CMOS-2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS-3.....	83
Figura 43. Movimiento radial del centroide obtenido en la prueba 6, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).....	84

Figura 44. Movimiento horizontal del centroide obtenido en la prueba 6, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).....	84
Figura 45. Movimiento vertical del centroide obtenido en la prueba 6, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).....	85
Figura 46. Humedad en la prueba 6. a) Humedad a 4,46mt de la salida del haz láser (Izquierda). b) Humedad a 25,40mt de la salida del haz láser (Derecha).....	86
Figura 47. Temperatura en la prueba 6. a) Temperatura a 6,19mt de la salida del haz láser (Izquierda). b) Temperatura a 23,20mt de la salida del haz láser (Derecha).....	86
Figura 48. Presión en la prueba 6. a) Presión a 6,19mt de la salida del haz láser (Izquierda). b) Presión a 23,20mt de la salida del haz láser (Derecha).....	87
Figura 49. Flujo de aire en la prueba 6. a) Flujo de aire a 6,19mt de la salida del haz láser (Izquierda). b) Flujo de aire a 23,20mt de la salida del haz láser (Derecha).....	87
Figura 50. Función estructura del movimiento del centroide en la prueba en laboratorio. a) Horizontal b) Vertical. c) Radial.....	94
Figura 51. Función estructura del movimiento del centroide en la prueba 3. a) Horizontal b) Vertical. c) Radial.....	95
Figura 52. Función estructura del movimiento del centroide en la prueba 4. a) Horizontal b) Vertical. c) Radial.....	95
Figura 53. Función estructura del movimiento del centroide en la prueba 6. a) Horizontal b) Vertical. c) Radial.....	96
Figura 54. Relación humedad vs. Capacitancia (Specialties, 2012).....	107

Figura 55. Circuito oscilador con TLC555 (Specialties, 2012).....	108
Figura 56. Etapas de acople electrónico.....	109
Figura 57. Sensor de flujo de masa de aire Honeywell Zephyr de la serie HAF (Honeywell, 2016).....	111
Figura 58. Sensor de presión MPXHZ6250A de Freescale Semiconductor (Mphacu, 2011).....	113
Figura 59. Fabricación de sensores de imagen basados en tecnología CMOS (Dischner, 2015)..	114
Figura 60. Diseño en Eagle del módulo de Humedad.....	114
Figura 61. Diseño en Eagle del circuito de sensado de las variables atmosféricas.....	115

Lista de Apéndices

Apéndice A. Sensores	107
Apéndice B. Diseños en Eagle™ del módulo de humedad y circuito de sensado de las variables atmosféricas	114
Apéndice C. Código de adquisición de variables atmosféricas en uVisión.....	116
Apéndice D. Código de adquisición de las cámaras	122

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA SOBRE EL CAMINO DE PROPAGACIÓN DE UN HAZ LÁSER A DIFERENTES DISTANCIAS HORIZONTALES Y BAJA ALTURA*

AUTORES: SERGIO ENRIQUE REYES APARICIO

ANDRÉS FELIPE VASQUEZ CAICEDO**

PALABRAS CLAVE: Turbulencia Atmosférica, Haz Láser, Centroides, Función Estructura, Parámetros Atmosféricos.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo de grado se estudió el comportamiento de un haz láser al ser propagado en campo abierto a diferentes distancias horizontales y a baja altura, atravesando un medio turbulento dado por las condiciones ambientales a diferentes horas del día, donde se realizaron mediciones de humedad relativa, temperatura, presión y flujo de aire.

Se empleó un montaje experimental el cual consta de un arreglo de tres cámaras CMOS, seis sensores de temperatura LM35, tres sensores de humedad HTS2030SMD, dos sensores de presión de silicio de la serie MPXHZ6250A, y dos sensores de flujo de aire HONEYWELL ZEPHYR HAFUHT0050L4AXT los cuales estuvieron sincronizados para garantizar los resultados. La sincronización se realizó con la ayuda de temporizadores programados en la herramienta de software matemática Matlab™.

Para adquirir los datos de cada uno de los sensores sincronizados, se diseñó e implementó un circuito integrado de acople a un sistema embebido STM32F746G – Discovery empleando la plataforma Keil uVision™ como ambiente de programación, en la que fue posible medir y procesar las señales analógicas y digitales suministradas por los sensores y así detectar los valores de cada uno de estos en un intervalo de tiempo establecido.

La toma de datos se realizó a diferentes horas del día a tres distancias diferentes de propagación, en donde las condiciones ambientales son diferentes para cada una de las pruebas realizadas. Los resultados se muestran reflejados en el análisis estadístico del desplazamiento del centroide y en el estudio de la función estructura.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Director Dr. Yezid Torres Moreno, Codirector Dr(C). Omar Javier Tíjaro Rojas.

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION OF THE EFFECTS OF ATMOSPHERIC TURBULENCE ON THE PROPAGATION ROAD OF A LASER BEAM AT DIFFERENT HORIZONTAL AND LOW HIEGHT DISTANCES.*

AUTHORS: SERGIO ENRIQUE REYES APARICIO

ANDRÉS FELIPE VASQUEZ CAICEDO**

KEY WORDS: Atmospheric Turbulence, Laser Beam, Centroids, Structure Function, Atmospheric Parameters.

DESCRIPTION:

In this end of degree project, it was studied the behavior of a laser beam when it is being propagated in open field at different horizontal distances and ground level, going through a turbulent medium with environmental conditions at different hours of the day. Measurements of relative humidity, temperature, pressure and airflow were made in each experiment.

The experimental setup use an array of three CMOS cameras, six LM35 temperature sensors, three humidity sensors HTS2030SMD, two silicon pressure sensors of MPXHZ6250A series and two airflow sensors HONEYWELL ZEPHYR HAFUHT0050L4AXT. All sensors synchronized in order to obtain the measures at the same time. The synchronization was done with the help of Matlab™ mathematical software tool and its timer.

For data acquisition of each synchronized sensor, an integrated coupling circuit to an embedded system STM32F746G – Discovery™ was designed and implemented. The Keil uVision platform as a programming environment was used, in which it was possible to measure and process the analog and digital signals thrown by the sensors and thus, detect the values of each of these physical parameters in a fixed time interval.

The data collection was carried out at different hours of the day at three different propagation distances. Then, environmental conditions in each of the test carried out are different. The results were reflected in the statistical analysis of the displacement of the laser beam centroid and, in the study of the structure function.

* Bachelor Thesis.

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronic and Telecommunications (E3T) Engineering School, Advisor Dr. Yezid Torres Moreno, Co-Advisor Dr(C). Omar Javier Tíjaro Rojas.

Introducción

Teorías relacionadas a la turbulencia atmosférica han sido estudiadas por muchas décadas para comprender mejor el impacto de la turbulencia en la propagación de un haz láser a través de la atmosfera (Tatarskiĭ & Silverman, n.d.). La turbulencia se puede describir como una mezcla aleatoria de moléculas de aire en la atmosfera debido a cualquier rápida o pequeña escala espacial y temporal de fluctuaciones del índice de refracción principalmente con la temperatura (Ishimaru, 1981). Aunque ligeras variaciones en temperatura pueden causar cambios en el índice de refracción del aire, el efecto acumulativo de tales inhomogeneidades que se expanden a lo largo de grandes distancias plantea desafíos significativos para la propagación de un haz láser (Bååk, 1969).

Estudios han demostrado que las fluctuaciones en el índice de refracción son significativas a nivel de la corteza terrestre e insignificantes a mayor altitud. Estas fluctuaciones en el índice de refracción causan perturbaciones de fase aleatorias del haz láser que pueden conducir a la distorsión del haz (Andrews, Phillips, Sasiela, & Parenti, 2005).

El conocimiento sobre estos efectos alcanzado a lo largo de los años se ha utilizado especialmente en el dominio militar, el radar, la teledetección, comunicación satelital, astronomía y diagnósticos médicos.

El objetivo del presente trabajo consistió en estudiar los efectos de la turbulencia atmosférica sobre un haz láser, el cual viaja a diferentes distancias horizontales y a baja altura en campo abierto. Para la ejecución del proyecto se realizaron mediciones de diferentes variables atmosféricas a lo

largo del camino de propagación en campo abierto para conocer el medio turbulento a diferentes horas del día a fin de analizar los efectos de dicho medio sobre el haz láser.

1. Generalidades del Proyecto

1.1 Planteamiento del problema

El problema por tratar se desarrolla inicialmente caracterizando el láser a utilizar con la intención de determinar los efectos naturales del mismo (rotación y traslación) causados por su propia cavidad resonante, debido a sus características de fabricación, las temperaturas internas y la potencia generada, que provocan que el haz no sea emitido siempre en una misma posición espacial de salida, ni con la misma inclinación; todo esto introduce un efecto indeseado en la adquisición de imágenes. Posteriormente se desarrollará una técnica capaz de estimar la posición del haz láser a una distancia horizontal lejos de la fuente, empleando un arreglo de cámaras que incluye los efectos intracavidad a fin de corroborar dichas imágenes estimadas con las obtenidas directamente por una cámara posicionada a la misma distancia, la cual incluye los efectos intracavidad y de la turbulencia atmosférica.

El presente trabajo tiene como finalidad servir de insumo en el mejoramiento de la resolución en la adquisición de imágenes a grandes distancias y a baja altura, ya que es en esta situación donde la turbulencia atmosférica se presenta con una mayor intensidad, distorsionando y degradando las imágenes capturadas. Se corroborará el algoritmo realizado mediante un montaje experimental en campo, el cual incluya la propagación de un haz láser a través de un medio a diferentes temperaturas (dadas por la captura a diferentes horas del día), además se tendrán en cuenta las mediciones de otras variables que influyen en la turbulencia atmosférica como, por ejemplo, la

humedad relativa del medio con el fin de observar el efecto distorsionador que tiene el medio circundante sobre el haz de luz.

De manera precisa, el problema a solucionar en este proyecto de grado es contribuir de manera importante al desarrollo investigativo que viene realizando el Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales GOTS en el área de la turbulencia a través del proyecto "Uso de la telescopía de Fourier de tiempo promedio para caracterizar la turbulencia horizontal a baja altura" el cual es financiado por Colciencias, con la comprobación experimental a grandes distancias horizontales en campo abierto de los efectos que intervienen en la adquisición de las imágenes.

1.2 Justificación

El estudio de los efectos que provoca la turbulencia atmosférica sobre el camino de propagación de un haz láser colimado o no, sólo bajo su divergencia natural, a grandes distancias horizontales y baja altura, es un tema del cual se ha estudiado muy poco, y el cual es crucial para la obtención de imágenes de mayor calidad y resolución dado que la turbulencia es un fenómeno aleatorio que altera las propiedades del frente de onda que se propaga. Por tal motivo es un gran reto el estudio de dichos efectos que se encuentran íntimamente relacionados con parámetros del medio como lo son temperatura, humedad, presión y rapidez del viento entre otros, a fin de poder corregir las aberraciones provocadas por dicho medio turbulento sobre los frentes de onda propagados. Este proyecto sirve como insumo para futuros estudios en áreas de la ciencia como la geología, biología, electrónica de consumo, tecnología de la información, la industria, el sector de la seguridad, comunicaciones, entre otros.

El grupo de óptica y tratamiento de señales (GOTS) de la escuela de física viene trabajando y estudiando el efecto de cada una de las variables ambientales que provocan un impacto sobre el frente de onda como la temperatura, humedad, presión y rapidez del viento los cuales afectan en gran medida la propagación horizontal de un haz láser. Para este proyecto se pretende unificar la medición y estudio de cada uno de los parámetros en campo abierto para estudiar los efectos generados sobre el haz láser a diferentes horas del día, empleando múltiples cámaras CMOS las cuales capturan imágenes al comienzo y al final del camino de propagación, y de esta manera poder evaluar los efectos de desviación provocados por los parámetros ambientales relacionados con la turbulencia atmosférica utilizando algoritmos y técnicas de detección.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General. Caracterizar los efectos de la turbulencia atmosférica sobre el movimiento de un haz láser teniendo en cuenta mediciones de temperatura ambiental, humedad relativa y evaluando su impacto sobre la propagación a baja altura y diferentes distancias horizontales.

1.3.2 Objetivos Específicos. El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Analizar y comprender el funcionamiento de un láser además de las diferentes técnicas de colimación para el mismo.

- Estudiar el efecto de desviación natural que tiene un láser por su fabricación, caracterizándolo para su posterior estudio y análisis.
- Diseñar un circuito impreso de acople a sensores de temperatura y humedad relativa para ser adquiridos por un sistema embebido.
- Conocer el comportamiento de la turbulencia atmosférica y estudiar los efectos generados por la temperatura y la humedad relativa sobre un haz láser, empleando múltiples cámaras CMOS a diferentes distancias.
- Separar el efecto de desviación del efecto de la turbulencia sobre un haz láser por medio de algoritmos y técnicas de detección.

1.4 Alcances

Se elaboró una técnica de detección, la cual estudia el efecto distorsionador generado por la cavidad resonante propia del láser, a partir de un montaje en campo en la sede UIS – Guatiguará, por medio de un arreglo de cámaras CMOS, con el fin de caracterizar las variaciones de los centroides al propagarlo por diferentes caminos influenciados por la temperatura y la humedad del medio dados a diferentes horas del día. El montaje experimental está compuesto por 3 cámaras CMOS bidimensionales, 6 sensores de temperatura LM35 y 3 sensores de humedad del modelo HTS2030SMD ubicados a lo largo del camino de propagación del haz. Además, se estudiaron previamente los efectos del bandeo producidos por el láser.

2. Fundamentos Teóricos

2.1 El láser y sus características

2.1.1 El láser. Es una fuente de luz monocromática (con una longitud de onda bien definida y coherente); para entender su funcionamiento se deben manejar conceptos básicos acerca de la luz, y en específico como una onda que se propaga en el vacío, con una frecuencia que define las veces que el campo electromagnético oscila en un segundo, de esta manera la frecuencia específica la sensación del color que los ojos perciben en la luz (Fernández, Tobalina, Varillas, & Salazar, 2010). La luz puede ser emitida por átomos, que son los componentes básicos de la materia, estos son capaces de absorber y emitir luz, pero solo a ciertos valores muy bien definidos de frecuencia, de tal manera que si sobre un átomo incide luz con la frecuencia correcta este es capaz de absorber esta luz y de esta manera es excitado, también puede desexcitarse emitiendo energía en forma de luz. Ahora sí un átomo fue previamente excitado, la luz al incidir sobre él no va a ser absorbida, el átomo no va a poder absorber esa luz, sin embargo existe un proceso llamado emisión estimulada de luz, donde hay ganancia, amplificación de luz dado que estimula la emisión del fotón por el sistema atómico excitado (Fernández et al., 2010). En la Figura 1 se puede apreciar el efecto de emisión estimulada en el cual se basa el láser.

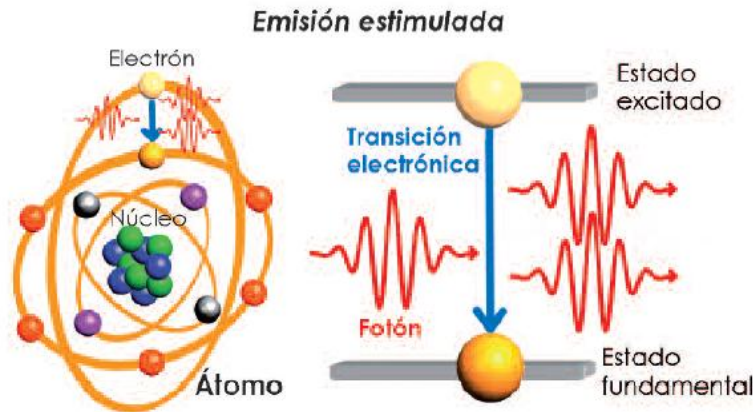


Figura 1. Efecto de emisión estimulada, adaptado de (Fernández et al., 2010).

2.1.2 Propiedades de la luz láser. La radiación láser posee todas las propiedades de la luz; sin embargo, se caracteriza por ser: monocromática (todos sus fotones tienen igual longitud de onda), coherente (todos los fotones se encuentran en fase temporal y espacial) y direccional (el haz de radiación presenta escasa divergencia, fruto de las dos características anteriores). A continuación, se presentan en más detalle cada una de las propiedades del láser (Martínez Morillo, Pastor Vega, & Sendra Portero, 1998).

2.1.2.1 Monocromaticidad. Es la buena definición de la frecuencia de la luz emitida, así como la longitud del tren de onda, es una de las principales características de la radiación láser. Permite aprovechar las características físicas y biológicas que posee la radiación de una longitud de onda determinada. Actualmente, existen láseres que emiten en el visible, infrarrojo, ultravioleta e, incluso en la banda espectral de los rayos X. Algunos láseres, como los de colorantes, permiten sintonizar la emisión dentro de una gamma de frecuencias (Martínez Morillo et al., 1998).

2.1.2.2 Coherencia. En contraposición a la radiación luminosa convencional, de componentes desorganizados o incoherente, la radiación coherente es aquella en la que todos sus fotones están en fase. Al coincidir en una misma dirección de propagación, los estados vibracionales se suman. El resultado es un efecto de amplificación en la intensidad luminosa emitida, característica de la radiación láser (Martinez Morillo et al., 1998).

2.1.2.3 Direccionalidad. La disposición de una cavidad resonante, uno de los más importantes requisitos técnicos en la construcción de los sistemas láseres, proporciona otra de las características de esta radiación, su escasa divergencia. Dado que solo se amplifican los fotones emitidos en el sentido de un eje del material emisor, la radiación resultante posee una marcada direccionalidad de emisión, lo cual la hace idónea para diversas aplicaciones prácticas, en las que se requiere precisión en la iluminación (Martinez Morillo et al., 1998).

2.1.3 Bando. Se conoce como bando a la variación aperiódica de la posición a donde se emite el láser (en una pantalla externa de la cavidad) y la intensidad de salida de este, dicho efecto se produce en la cavidad resonante del láser. Entre las fuentes de bando se encuentran las variaciones de reflectividad, vibraciones mecánicas, ruido eléctrico, entre otros (Marshall & Stutz, 2011).

Para el proyecto, se caracterizó inicialmente el movimiento del bando generado al interior de la cavidad resonante del láser a fin de encontrar los movimientos naturales del láser debidos a su fabricación, para ello se usaron sensores tan cercanos como fue posible a fin de modelar dicho movimiento y proyectarlo a un sensor alejado de la salida del láser.

En la *Figura 2*, se puede evidenciar el procedimiento implementado a fin de caracterizar el efecto del bandeo (movimiento de inclinación y traslación) del láser implementado en la aplicación.

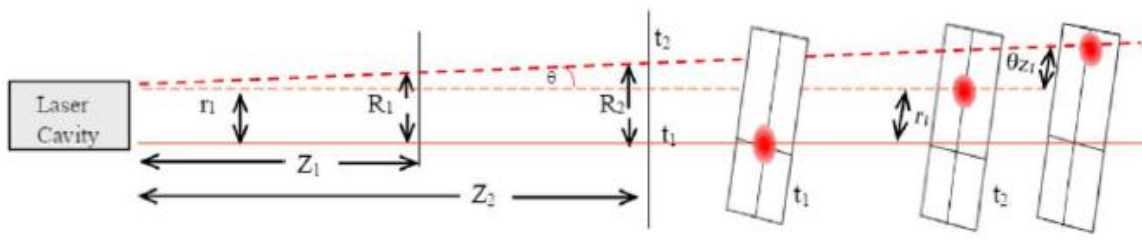


Figura 2. Modelado del movimiento en la cavidad del láser, adaptado de (Tíjaro Rojas, Galeano Traslaviña & Torres Moreno, 2016).

Asumiendo propagación del haz en condiciones de ausencia de turbulencia y por medio de la óptica geométrica, es posible encontrar que la relación entre las desviaciones en los diferentes puntos está dada por las ecuaciones 1 y 2 (Tíjaro Rojas et al., 2016).

$$R_1 = r_1 + \theta Z_1 \quad (1)$$

$$R_2 = r_1 + \theta Z_2 \quad (2)$$

Dicho efecto de bandeo se puede percibir usando varios sensores CMOS ubicados a una determinada distancia de separación de la salida del láser, a fin de evidenciar los movimientos de traslación e inclinación en el spot del láser y compararlos con una propagación ideal de un láser en ausencia de dicho efecto.

2.1.4 Divergencia del haz láser. Es un efecto producido por la difracción de la luz la cual constituye un fenómeno universal de la física que afecta la propagación a través del aire de cualquier haz luminoso produciéndole un ensanchamiento de su perfil transversal y consecuentemente una disminución local en la intensidad de luz. En el caso específico de la luz láser, la difracción juega un papel muy importante en el diseño de los dispositivos y se ha dirigido mucho esfuerzo a minimizar el ensanchamiento difractivo de la luz y mejorar la direccionalidad de los haces (Dios, Rubio, Rodríguez, & Comerón, 2004). Dicho ensanchamiento del perfil transversal del haz láser al propagarse es medido por el ángulo de divergencia Φ del rayo láser, el cual en un haz gaussiano viene dado por $\Phi = 1.27 \lambda / 2W_o$, donde W_o representa la cintura del haz (del inglés “*Beam waist*”), el punto en el cual el diámetro de éste tiene su mínimo valor. El diámetro o radio del haz es usualmente usado para medir el ensanchamiento del haz.

Una imagen borrosa y una imagen “bailando” son consecuencia de la divergencia de la luz y del bandeo respectivamente. El efecto debido al bandeo es de considerable relevancia en aplicaciones de puntería y seguimiento del haz, mientras que el efecto de divergencia o ensanchamiento del haz de corta duración toma mayor relevancia para la propagación de pulsos y sistemas de láser de alta energía (Shirai, Dogariu, & Wolf, 2003).

2.1.5 Especificaciones del láser usado. En el proyecto se hizo uso del láser verdi V2 para las pruebas en campo, que cuenta con una potencia controlable desde 10mW hasta 2.2 W y 532 nm de longitud de onda, en la Tabla 1 se puede observar algunas especificaciones técnicas dadas por el fabricante (Coherent, 2011).

Tabla 1*Especificaciones técnicas del láser Verdi V2 de Coherent, INC, adaptado de (Coherent, 2011)*

Especificaciones	Verdi V2
Potencia de salida	>2W
Longitud de onda	532 [nm]
Diámetro del haz	2.25 [mm] \pm 10%
Divergencia del haz	<0.5 [mrad]
Estabilidad apuntando	<2 μ rad/°C
Estabilidad de la energía	\pm 1%
Ruido	<0.03% rms

2.2 Sensores y sistemas embebidos

2.2.1 Sensado de temperatura. Son elementos usados en cualquier proceso en la industria que requiera la medición y/o el control de la variable temperatura. Actualmente, los sensores de temperatura en el mercado se ajustan a las necesidades y requerimientos de cada escenario en particular, los más comúnmente empleados para medir esta variable con instrumentación electrónica son: RTDs, termistores, sensores de circuito integrado (IC) y termocuplas. Entre los factores a tener en cuenta para la selección de un sensor específico se tienen: la temperatura máxima, el rango de temperatura a medir, la exactitud, velocidad de respuesta, costo y requerimiento de mantenimiento (“Elementos y equipos electricos: sensores de temperatura,” n.d.). Para la aplicación del proyecto se hizo uso de los sensores de circuitos integrado (IC), debido

a su economía, rango de medida óptimo para la aplicación, exactitud en la medición y su tiempo de respuesta.

2.2.1.1 Sensores de circuitos integrados (IC). Los sensores de circuito integrados se fundamentan en la unión p-n de los semiconductores. Están formados por circuitos integrados sobre un chip, el cual presenta una salida lineal y proporcional a la temperatura. Se consiguen sensores IC que presentan salidas en voltaje analógico y en forma digital (Freud, 1979). En la práctica se empleó el sensor LM35, el cual es un circuito integrado de precisión para medir temperatura, el cual aporta una salida de voltaje linealmente proporcional a la temperatura en grados centígrados. El dispositivo no requiere calibración externa para proporcionar una exactitud en la medida de $\pm 1/4^\circ\text{C}$ a temperatura ambiente y $\pm 3/4^\circ\text{C}$ en un rango de temperatura entre -55°C a 150°C (Self-heating & Output, 2013). El sensor LM35 se empleó en la medición de la variable de temperatura con el fin de realizar mediciones de temperatura ambiental para cada una de las pruebas realizadas. En la Figura 3 se puede apreciar el mismo.

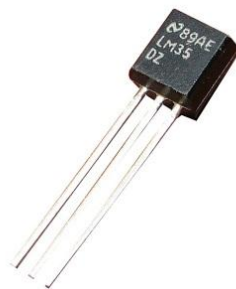


Figura 3. Sensor de temperatura LM35, adaptado de (Self-heating & Output, 2013).

2.2.2 Sensado de Humedad. Si bien el grado de concentración de agua en el ambiente, no influye mayormente sobre la vida normal de un ser humano (salvo en el confort), si resulta relevante para ciertos procesos industriales (Kouro, 2001). En el mercado existe una amplia

variedad de sensores de humedad con diferentes principios de funcionamiento como sensores mecánicos, por condensación, electrolíticos, por conductividad, capacitivos, entre otros (Asociados, 2008).

En la práctica se hizo uso de sensores capacitivos HTS2030SMD, ya que son de fácil producción, control, transporte, suministro de energía, bajo costo y alta fidelidad.

2.2.2.1 Sensor HTS2030SMD. Es un sensor de humedad capacitivo basado en una célula única para la medición de la humedad y un coeficiente de temperatura negativo (NTC) para la medición de temperatura (Specialties, 2012). El sensor HTS2030SMD permite medir la humedad relativa usando la variación de una capacitancia interna. En la Tabla 2, se pueden observar algunas de las características del sensor de humedad empleado en el proyecto.

Tabla 2
Características del sensor de humedad HTS2030SMD

Características	HTS2030SMD
Rango de medida de humedad relativa	1 al 99%
Rango de medición de temperatura	-60C° a 140C°
Velocidad de respuesta	63.83 ms/%RH
Coficiente de temperatura	0.01 pF/C°
Resolución	0.01 %RH

En el Apéndice A, se pueden encontrar en detalle el funcionamiento de este sensor de humedad además de los demás sensores empleados en el proyecto.

2.2.5 Sensado de imágenes. El sensor de imagen es el elemento de una cámara digital encargada de acumular una carga eléctrica en cada una de las celdas de esa matriz. Estas celdas son los llamados pels. La carga eléctrica almacenada en cada pel dependerá en todo momento de la cantidad de luz que incida sobre el mismo. Cuanta más luz incida sobre el pel, mayor será la carga que este adquiera (Xatakafoto, 2009). Los sensores se pueden clasificar según su tecnología en alguna de las siguientes categorías:

- CCD y super CCD
- CCD RGBE
- CMOS
- Foveon X3

Para la aplicación se empleó el sensor con tecnología CMOS el cual es el más ampliamente implementado actualmente, en el Apéndice A se puede encontrar en detalle el funcionamiento de esta tecnología.

2.2.5.1 Cámara CMOS E0-1312. Para la captura de imágenes del frente de onda se hizo uso de 3 cámaras E0-1312 Color Lite Edition USB colocadas en una determinada posición para la caracterización y posterior adquisición de imágenes. En la Figura 4, se muestra una imagen de la cámara utilizada.



Figura 4. Cámara modelo CMOS EO – 1312, adaptado de (“EO-1312C 1/1.8” CMOS Color USB Camera Edmund Optics,” n.d.).

Definido el tipo de sensor a usar para la adquisición de las imágenes del frente de onda del haz láser, se muestran sus principales características en la Tabla 3.

Tabla 3

Especificaciones del sensor de la cámara EO-1312C de Edmund Optics, adaptado de (“EO-1312C 1/1.8” CMOS Color USB Camera | Edmund Optics,” n.d.)

Especificaciones del sensor CMOS	
Número de modelo	EO-1312C
Píxeles [H x V]	1280 x 1024
Tamaño del píxel, H x V [μm]	5.3 x 5.3
Profundidad del píxel	8-bit
Cuadros por segundo [fps]	25
Salida de video	USB 2.0
Dimensiones[mm]	34 x 32 x 27.4

Formato de sensor de Cámara	1/1.8"
Resolución (Megapíxeles)	1.3
Área de detección, H x V [mm]	6.79 x 5.43
Fabricante	Edmund Optics

2.2.6 Sistema embebido. Un sistema embebido es un sistema de computación diseñado para realizar funciones dedicadas con relativa frecuencia en un sistema de computación real. Al contrario, de lo que ocurre con los computadores de propósito general (Laptop o PC) que están diseñados para cubrir un amplio rango de necesidades, los sistemas embebidos se diseñan para cubrir necesidades específicas (“PAC-Performance-centered Adaptive Curriculum for Employment Needs Programa ERASMUS: Acción Multilateral -517742-LLP-1-2011-1-BG-ERASMUS-ECUE Contenido,” n.d.). En un sistema embebido la mayoría de los componentes se encuentran incluidos en la placa base como una pantalla LCD, un puerto USB entre otros, lo cual se distancia del aspecto que suele asociarse a un computador.

Los sistemas embebidos se pueden programar directamente en el lenguaje ensamblador del microcontrolador o microprocesador incorporado en el mismo, o también utilizando los compiladores específicos, pueden utilizarse lenguajes como C o C++ o de programación en JAVA (“PAC-Performance-centered Adaptive Curriculum for Employment Needs Programa ERASMUS: Acción Multilateral -517742-LLP-1-2011-1-BG-ERASMUS-ECUE Contenido,” n.d.).

Para la aplicación se empleó el microcontrolador de STM32F746G – Discovery de STMicroelectronics, a continuación, se muestran sus especificaciones más relevantes.

2.2.6.1 Microcontrolador STM32F746 – Discovery de STMicroelectronics. La tarjeta STM32F746G – Discovery es una plataforma de demostración y desarrollo para STMicroelectronics ARM basado en tecnología Cortex - M7. Este microcontrolador cuenta con un amplio rango de módulos y periféricos incluidos, en la Tabla 4, se enuncian las características más relevantes de esta placa. En la Figura 5 se muestra el microcontrolador STM32F746G – Discovery usado para la adquisición de las variables de temperatura ambiental, humedad relativa, presión y velocidad del viento en cada una de las pruebas realizadas.

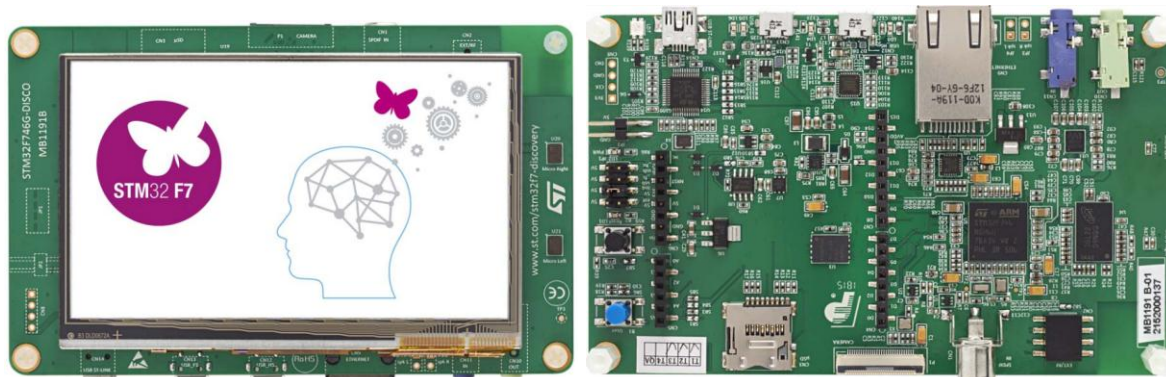


Figura 5. Microcontrolador STM32F746G – Discovery de STMicroelectronics, adaptado de (ST, 2015).

Tabla 4

Características de la placa STM32F746G – Discovery, adaptado de (ST, 2015)

CARACTERÍSTICAS STM32F746G – DISCOVERY	
1Mbyte de memoria Flash	340 Kbytes de memoria RAM
Capacidad de re-enumeración USB ST-LINK/V2-1 a bordo	Funciones USB: Puerto virtual COM, almacenamiento, puerto de depuración

Pantalla táctil capacitiva de 4,3 pulgadas a color 480x272	Conector de cámara
Entrada y salida de audio	Salida de altavoces estéreo
Dos pulsadores (Usuario y reset)	Conector para tarjeta μ SD
Conector Ethernet compatible con IEEE-802.3-2002	Cinco opciones de fuentes de alimentación: ST LINK/V2-1 Conector USB FS Conector USB HS VIN del conector de Arduino 5V externos del conector de Arduino
Salida de fuente de alimentación para aplicaciones externas de 3,3V o 5V	Conector de Arduino Uno V3
Cuatro módulos I^2Cs	Seis módulos SPIs con tres multiplexados simples I^2S
Módulo SDMMC	Cuatro módulos USARTs
Tres módulos ADCs de 12-bits	Dos módulos DACs de 12-bits

2.3 Tratamiento de imágenes digitales

Una imagen puede ser definida como una función bidimensional $f(x,y)$, donde “ x ” y “ y ” son coordenadas espaciales y la magnitud de f para cualquier par de coordenadas (x,y) es llamada intensidad o nivel de gris de la imagen en esa coordenada. Cuando las coordenadas x,y están

discretizadas y los valores de amplitud de f están cuantizados, se denomina a la imagen, imagen digital. El campo del procesamiento digital de imagen se realiza mediante herramientas informáticas. Una imagen digital está compuesta por un número finito de elementos, de los cuales cada uno tiene un valor de intensidad y ubicación espacial particular (Malacara Hernández, 2002). Estos elementos son referidos como elementos de imagen (del inglés, *picture elements*) y mayormente conocidos como *pixeles*. Los pixeles son el término mayormente usado para denotar los elementos de una imagen digital.

El procesamiento digital de imágenes es un conjunto de técnicas, las cuales se enfocan en alterar los valores de luminosidad de los pixeles mediante las operaciones o transformaciones matemáticas necesarias, a fin de hacer que resalten los detalles de la imagen que sean convenientes. Una de las preocupaciones primarias del procesamiento digital de imágenes es aumentar la calidad de la imagen y moderar la degradación introducida por los sensores y dispositivos de adquisición (Hawkes, 1978). Las técnicas de restauración de imágenes están interesadas en reconstruir o recobrar una imagen que ha sido degradada.

A continuación, se presentan algunas de las técnicas de procesamiento de una imagen digital.

2.3.1 Filtrado de la imagen. El proceso de filtrado o realce de la imagen consiste en una serie de técnicas enfocada a mejorar la apariencia visual de una imagen, ya sea en contraste, ruido, escala de grises, distorsiones, luminosidad, falta de nitidez, detección de objetos o para mapear la imagen a una mejor representación para su análisis. El principal objetivo del realce de una imagen es el procesamiento de la misma de tal manera que el resultado obtenido sea el esperado para una aplicación específica. Los métodos de realce de una imagen se dividen en dos categorías: los

métodos de filtrado en el dominio espacial y los métodos de filtrado en el dominio de frecuencial. Los métodos de la primera categoría consisten en la manipulación directa de los píxeles de la imagen mientras que los métodos de la segunda categoría hacen referencia a las técnicas basadas en la representación de los píxeles, a través de una transformación hacia el dominio frecuencial y usa como operador de transformación la transformada de Fourier (Hawkes, 1978). A continuación, se presentan en más detalle cada una de las categorías para filtrar o realzar una imagen.

2.3.2 Filtros lineales. Los filtros lineales pueden clasificarse según las frecuencias que dejen pasar: los filtros pasa bajo atenúan o eliminan las componentes de alta frecuencia a la vez que dejan inalteradas las bajas frecuencias. Por otra parte, el filtro pasa alto atenúan o eliminan las componentes de baja frecuencias con lo que agudizan las componentes de alta frecuencia. Por último, los filtros pasa banda eliminan regiones elegidas de frecuencias intermedias (Hawkes, 1978).

2.3.3 Filtros basados en derivadas de la función Gaussiana. Los filtros basados en derivadas de la función Gaussiana fueron en un principio obtenidos de manera heurística. Sin embargo, estos filtros tienen un fundamento matemático y un comportamiento muy similar al sistema de visión humano (del inglés, HVS); por ello son muy importantes ya que se especializan en la detección de cambios bruscos como los bordes (Hawkes, 1978). Estos filtros funcionan muy bien debido a que:

- Son separables
- Están inspirados en la función Gaussiana
- Tienen derivada de Gaussiana

- Los perfiles coinciden con la forma en que trabaja el HVS

Entre los filtros más importantes destacan el filtro Prewitt el cual tiene la característica de detectar cambios en la dirección X o Y de la imagen. También se encuentran los filtros Sobel (en este caso también en la dirección X o Y), este filtro ayuda a obtener algo de suavizado con lo cual se logra cierta reducción de ruido. Los filtros Sobel son también detectores de bordes. Otro tipo de filtros también importantes son los filtros Laplacianos. Este filtro es capaz de detectar bordes, pero no en máximos y mínimos (como el caso de los filtros Sobel) sino en los cruces por cero (“Ruido y Filtrado,” 2015). En la Tabla 5, se puede apreciar la aproximación los filtros mencionados anteriormente derivados de la función Gaussiana.

Tabla 5

Aproximación de diferentes filtros derivados de la función Gaussiana, adaptado de (“Ruido y Filtrado,” 2015)

Filtro Prewitt	Filtro Sobel	Filtro Laplaciano
En la dirección X	En la dirección X	Ambas direcciones
$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	
En la dirección Y	En la dirección Y	
$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$

2.3.5 Filtrado en el dominio de la frecuencia. La correspondencia entre el filtrado espacial y el filtrado en el dominio de la frecuencia está establecida por el teorema de la convolución. El proceso en el cual se mueve un filtro o máscara de un pixel a otro pixel sobre una imagen y se calcula una cantidad en cada pixel tiene su fundamento en dicho teorema. La importancia práctica

de este teorema radica en que cualquier convolución de una imagen puede obtenerse como el producto de dos imágenes en el dominio de la frecuencia.

Sea $F(u, v)$ y $H(u, v)$ las transformadas de Fourier de $f(x, y)$ y $h(x, y)$ respectivamente (Hawkes, 1978). El teorema de la convolución indica que $f(x, y) * h(x, y)$ y $F(u, v)H(u, v)$ están relacionadas de la siguiente manera:

$$f(x, y) * h(x, y) \stackrel{TF}{\Leftrightarrow} F(u, v)H(u, v)$$

El diagrama de flujo para el diseño de filtros en el dominio de la frecuencia empleando la transformada de Fourier y la transformada inversa se puede observar en la *Figura 6*.

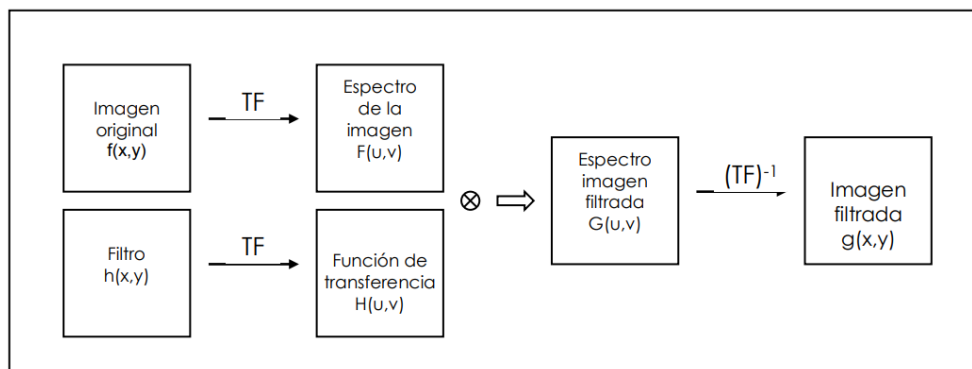


Figura 6. Diseño y aplicación de filtros en el dominio de la frecuencia, mediante la utilización de la transformada de Fourier (TF) y de su inversa $(TF)^{-1}$, adaptado de (Ruíz Fernández & Ángel, n.d.).

Como se vio anteriormente, una convolución puede aplicarse transformando ambos, imagen y filtro, al dominio de la frecuencia, multiplicando ambas transformadas entre sí y calculando la transformada inversa del resultado, de tal manera se encuentra la imagen filtrada (Ruiz Fernández & Ángel, n.d.).

Los filtros que producen suavizado de la imagen se denominan de pasa bajo y los que, por el contrario, producen realce de bordes se denominan de pasa alto, en atención a las modificaciones que producen en el espectro de la imagen

3. Metodología para el desarrollo del proyecto

Para hacer posible el desarrollo del presente trabajo de grado, se llevaron a cabo las etapas de acondicionamiento y construcción del montaje experimental, implementación del sistema, algoritmo de adquisición de las cámaras, sincronización de los sensores, captura de datos, tratamiento de imágenes y análisis de resultados. Estas se detallarán en las siguientes secciones.

3.1 Acondicionamiento y construcción del montaje experimental

Inicialmente se realizaron pruebas experimentales a escala de laboratorio con un láser de Helio-Neón de baja potencia (35 mW) (Spectra-Physics, n.d.), el cual cuenta con una longitud de onda de 632,8 [nm], dicho láser se encuentra ubicado en el laboratorio de óptica de la escuela de Física en el campus central de la Universidad Industrial de Santander.

En dichas pruebas se contó con un montaje experimental de tres cámaras CMOS en las cuales se percibe el bandeo del spot debido a las características intracavidad del láser, las primeras dos

cámaras del montaje son empleadas para detectar dichas fluctuaciones y estimar matemáticamente una imagen sin dicho efecto a una tercera cámara posicionada al final del montaje a fin de percibir los efectos del medio sobre el spot del láser propagado.

A lo largo del montaje experimental se ubican sensores de temperatura, humedad, presión y flujo del viento, incorporados en un circuito de medición previamente diseñado y construido usando un sistema embebido programado para realizar mediciones en una ventana de tiempo específica.

Cada cámara es conectada a un computador independiente para realizar el control y la adquisición durante toda la prueba, además el circuito del sistema embebido es alimentado a 5V para su funcionamiento. Cada imagen capturada en el montaje experimental de la *Figura 7*, cuenta con un valor asociado de temperatura, humedad y demás variables atmosféricas.

Para lograr la sincronía entre todos los elementos que conforman el montaje experimental, se realizó una sincronización por luz (con el mismo láser) para la activación en la captura de imágenes por medio de las cámaras CMOS y también en el circuito de adquisición de variables atmosféricas el cual viene equipado con una etapa de inicialización por luz. Los datos obtenidos en cada una de las pruebas son analizados mediante la herramienta MATLAB™ en la cual se realiza la extracción de las matrices que componen cada imagen para realizar el procesamiento.

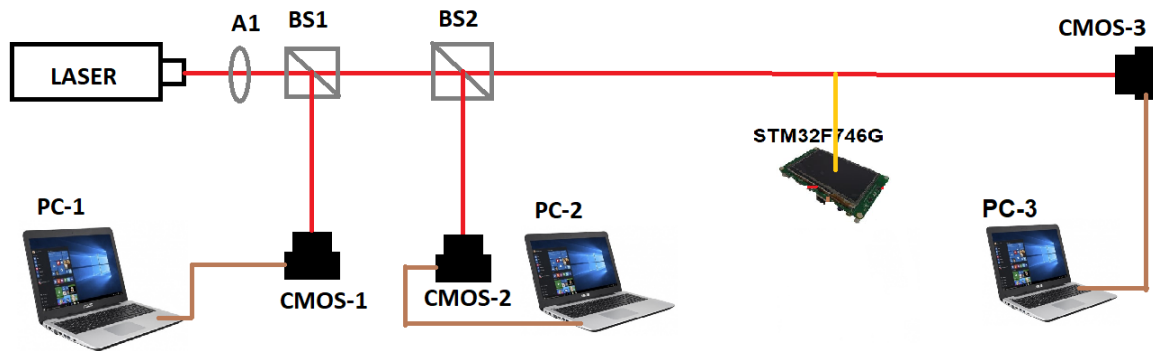


Figura 7. Montaje experimental de prueba a escala de laboratorio.

El montaje experimental cuenta con un atenuador de intensidad a fin de evitar la saturación de la imagen en cada una de las cámaras durante la propagación del láser, también cuenta con dos divisores de haz (del inglés *Beam Splitter*) los cuales desvían un rayo de luz del camino de propagación y lo direccionan a las dos primeras cámaras como se muestra en la *Figura 7*, continuando el láser con su trayectoria hacia la tercera cámara. En la *Tabla 6* se enuncian los elementos empleados en la prueba inicial a escala de laboratorio. Además, el tiempo de exposición y las distancias de cada una de las cámaras respecto a la salida del haz láser se declaran en la *Tabla 7*.

Tabla 6

Elementos utilizados para el montaje experimental a escala de laboratorio.

ELEMENTO	NOMBRE
A1	Filtro de densidad neutra.
BS1	Primer divisor de haz.
BS2	Segundo divisor de haz.
CMOS-1	Primera cámara donde llega el haz láser.
CMOS-2	Segunda cámara donde llega el haz láser.

CMOS-3	Tercera cámara donde llega el haz láser.
STM32F746G	Microcontrolador y circuito de variables atmosféricas.
PC-1 A PC-3	Respectivos computadores empleados en las pruebas.

Tabla 7

Tiempo de exposición de pruebas experimentales a escala de laboratorio.

VARIABLES	CMOS-1	CMOS-2	CMOS-3
DISTANCIA [cm]	87 cm	122 cm	507 cm
TIEMPO DE EXPOSICION [ms]	0,29	0,0706	0,29

Para la adquisición de las variables atmosféricas durante la prueba se empleó un sistema embebido STM32F746G – Discovery de STMicroelectronics, y plataforma Keil uVision como entorno de programación, (véase la Tabla 4). Para la aplicación específica, se hizo uso de los módulos ADC, I2C, LCD, MicroSD, entre otros, en el capítulo 3.2.2, se describe el algoritmo de adquisición del circuito para su correcto funcionamiento a la hora de medir las variables.

Esta prueba sirve como prueba patrón para establecer un medio en el cual las variables ambientales (Temperatura, humedad, presión y flujo del viento) que componen la turbulencia atmosférica se encuentran relativamente estables y con una fluctuación mínima debido al entorno de laboratorio en las cuales fueron medidas. De esta manera, tener una referencia de comparación a las demás pruebas realizadas en campo en la sede UIS-Guatiguará, las cuales son susceptibles a las modificaciones en dichas variables, las distancias de propagación y por ende al camino de propagación del haz láser que atraviesa un medio turbulento.

Una vez realizada la prueba experimental a escala de laboratorio se procede a iniciar las pruebas experimentales en campo abierto, para tales pruebas se empleó un Laser Verdi V2 (Coherent, 2011), ubicado en el laboratorio 102 de Microscopía en el edificio de Investigaciones, de la sede UIS – Guatiguará.

Para tales pruebas se empleó el mismo arreglo de tres cámaras CMOS, las primeras dos cumplen la función de detectar el movimiento del haz láser y estimar una imagen sin dicho efecto a una tercera cámara posicionada a una distancia determinada con respecto a la salida del haz láser. Debido a la distancia empleada y a la geografía del entorno se hizo necesario la incorporación de un periscopio y un expansor de haz invertido (usado como focalizador) al montaje experimental de la *Figura 7*. El periscopio es un instrumento óptico el cual consiste en un sistema de espejos montados en una base vertical para generar reflexiones con más de tres grados de libertad (x,y,z,θ) lo cual permitió posicionar el haz láser a una altura propicia para la adquisición de las imágenes en la tercera y última cámara.

Debido a la distancia de propagación del haz hasta la CMOS-3, el efecto natural de divergencia del haz láser, a mayor distancia, hace mayor el diámetro del frente de onda propagado, por ende, en el área del sensor de la cámara no cabe todo el spot del láser, para ello se empleó un expansor de haz invertido a modo de focalizador, el cual es un sistema óptico que cambia el tamaño del haz y su divergencia, dichos elementos permiten acomodar el haz a la superficie del sensor de la cámara CMOS-3. En la

Figura 8, se aprecia el montaje experimental usado para las pruebas a campo abierto realizadas en la sede UIS – Guatiguará. Asimismo, fotografías de la implementación del montaje experimental usado para las pruebas en campo se muestran en las *Figura 9* y *10*.

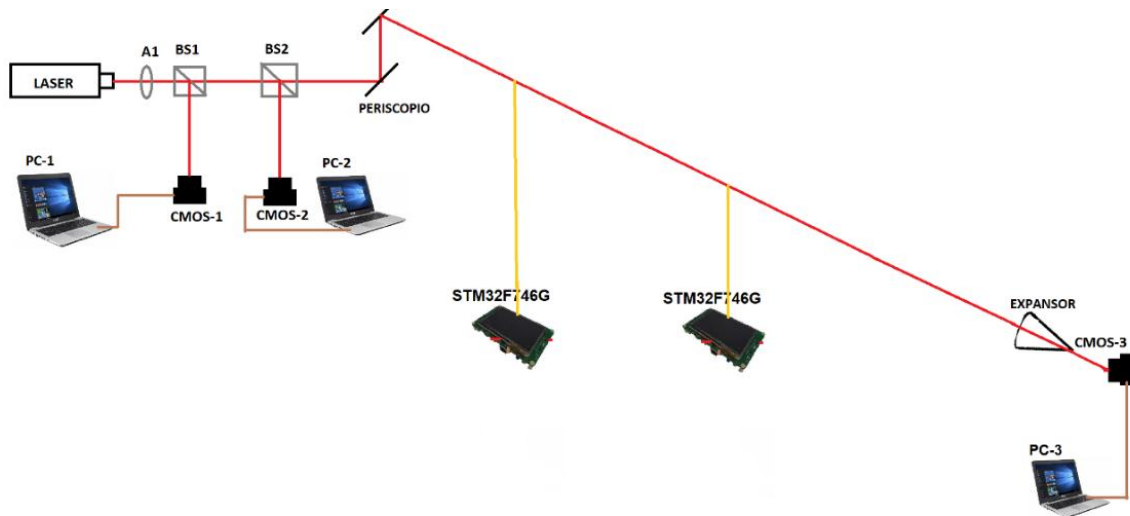


Figura 8. Montaje experimental de pruebas en campo.

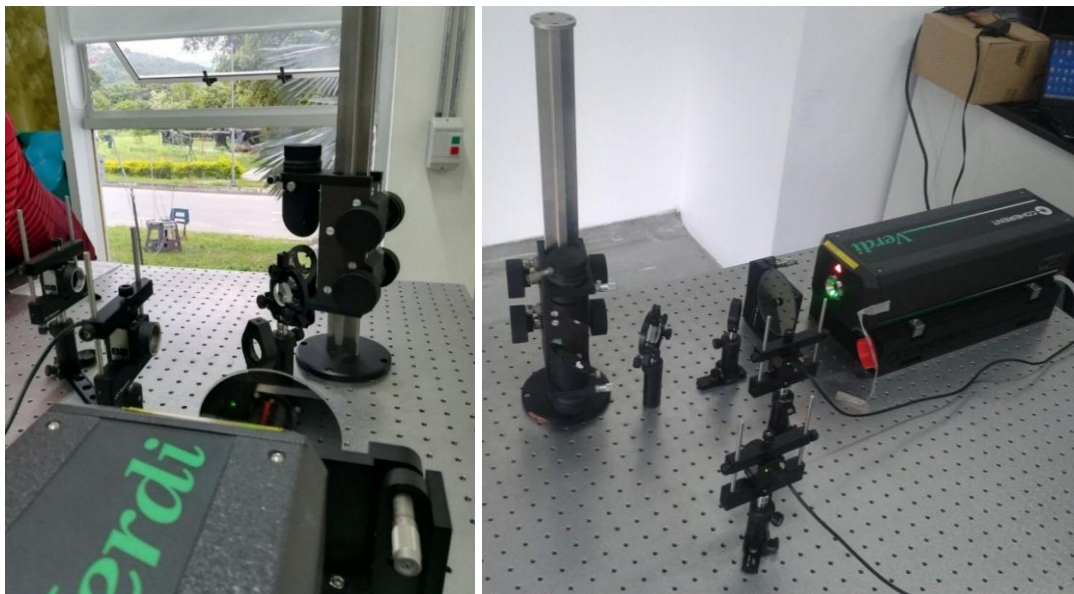


Figura 9. Montaje experimental implementado para las pruebas en campo, el laboratorio de microscopía del primer piso del EDI – sede Guatiguará.



Figura 10. Sensor CMOS-3 y expansor de haz posicionados a las diferentes distancias empleadas en la experimentación.

En la Tabla 8, se enuncian los elementos empleados en las pruebas realizadas en campo abierto. Es importante anotar que a excepción de la CMOS-3, el expansor y el PC-3, todos los elementos se dejan fijos para las diferentes distancias a las que se hicieron las mediciones. Así, el tiempo de exposición y las distancias de cada una de las cámaras en cada una de las pruebas realizadas en campo respecto a la salida del haz láser se declaran en la Tabla 9.

Tabla 8

Elementos utilizados para el montaje experimental en campo abierto.

ELEMENTO	NOMBRE
A1	Primer filtro de densidad neutra.
BS1	Primer divisor de haz.

BS2	Segundo divisor de haz.
PERISCOPIO	Periscopio para posicionar el haz a la altura deseada.
EXPANSOR	Expansor de haz invertido.
CMOS-1	Primera cámara donde llega el haz láser.
CMOS-2	Segunda cámara donde llega el haz láser.
CMOS-3	Tercera cámara donde llega el haz láser.
STM32F746G	Microcontrolador y circuito de adquisición de variables atmosféricas.
PC-1 A PC-3	Respectivos computadores empleados en las pruebas.

Tabla 9

Tiempos de exposición y distancias para las pruebas realizadas en campo

VARIABLES	CMOS-1	CMOS-2	CMOS-3*	CMOS-3†	CMOS-3‡
DISTANCIA [cm]	27,94	55,88	2610	3166	3956
TIEMPO DE EXPOSICION [ms]	0,049	0,1	2	0,2690	0,3690

3.2 Implementación del sistema, algoritmo de adquisición, sincronización y captura de datos

3.2.1 Circuito de sensado de variables ambientales. Se diseñó e implementó un sistema, el cual integró las variables ambientales estudiadas y analizadas en trabajos anteriores (Contreras Lopez, 2016) (Herreño Vanegas & Villamizar Conde, 2016) (Sierra Pinzón, 2017) (Rincón Correa & Hernandez Quintero, 2016), con la intención de unificar y crear un prototipo de medición de

* Primera distancia de propagación del haz láser.

† Segunda distancia de propagación del haz láser.

‡ Tercera distancia de propagación del haz láser.

parámetros de temperatura, humedad, presión y flujo del Aire. A su vez, se implementaron dos dispositivos integrando las cantidades de sensores mostrados en la Tabla 10.

Tabla 10

Sensores integrados en cada uno de los dispositivos en hardware diseñados e implementados

Sensor	Referencia	Tipo de Salida	Cantidad
Temperatura	LM35	Analógico	3
Humedad	HTS2030SMD	Analógico	2
Presión	MPXHZ6250A	Analógico	1
Flujo del viento	Honeywell Zephyr de la serie HAF	Digital	1

Se empleó el software Eagle™ como ambiente de diseño para el circuito anteriormente mencionado, en el apéndice B, se puede encontrar el diseño del circuito implementado, en la imagen de la *Figura 11*, se observa el circuito empleado para la adquisición de datos ambientales.

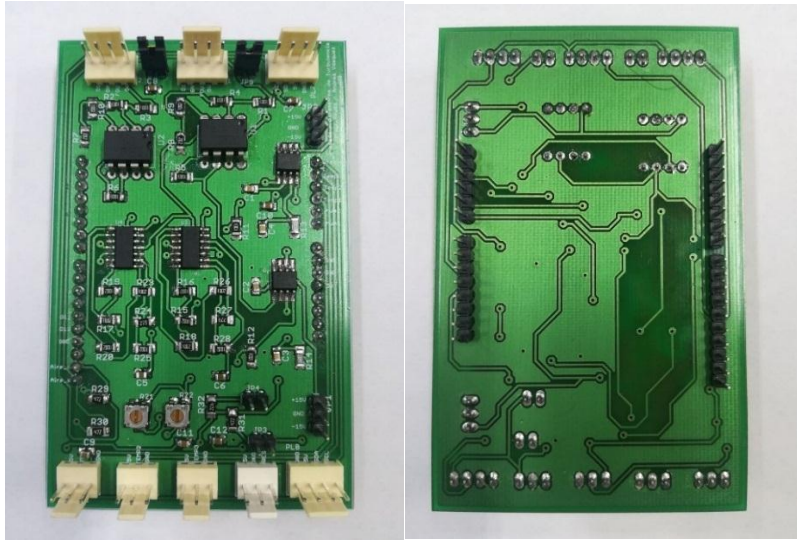


Figura 11. Uno de los circuitos de sensado de variables atmosféricas implementado.

Asimismo, se realizó la implementación del circuito de la *Figura 55* del Anexo A, propuesto por el fabricante para el correcto funcionamiento del sensado de humedad, el cual se puede apreciar en la *Figura 12*, su diseño en la herramienta Eagle™ se puede encontrar de la misma forma en el apéndice B.

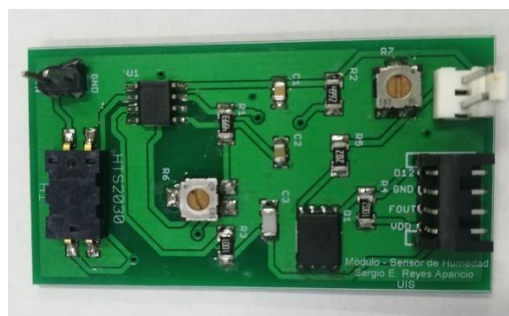


Figura 12. Módulo de humedad implementado, corresponde al propuesto por el fabricante.

3.2.2 Algoritmo de adquisición de variables ambientales. El proceso de adquisición de datos por medio del microcontrolador es descrito en el diagrama de flujo de la Figura 13, el cual es activado por luz producida por el láser para lograr así, la sincronía en los diferentes elementos que conforman el montaje experimental. En el diagrama de flujo se declara un valor de 2000 para la variable “Numero de muestras”, debido a que las pruebas en campo se consideraron como apropiada la cantidad de muestras.

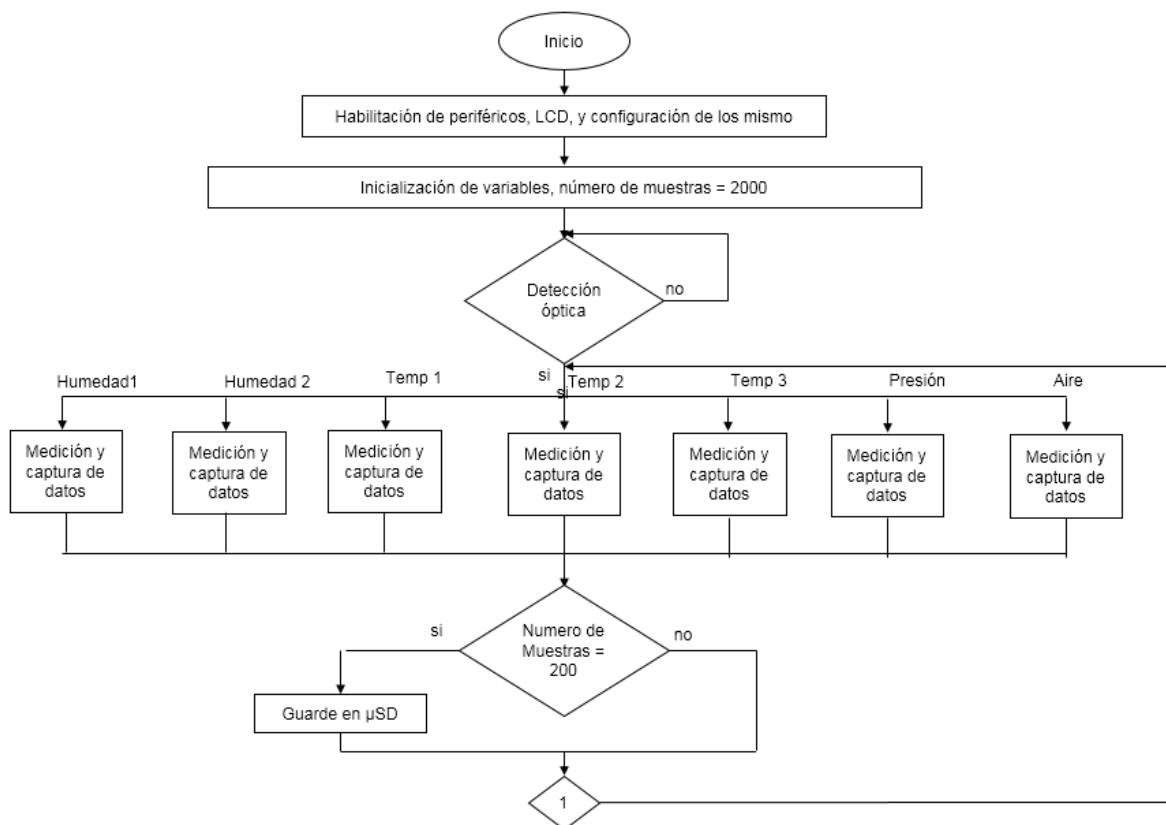


Figura 13. Diagrama de flujo del algoritmo de adquisición implementado en el Microcontrolador STM32F746G – Discovery.

El algoritmo diseñado en C⁺⁺ para la adquisición en el sensado de variables ambientales puede ser consultado en el apéndice C.

3.2.3 Algoritmo de adquisición de las cámaras. Cada una de las tres cámaras CMOS que conforman el montaje experimental es conectada a un equipo de cómputo independiente para ejercer la acción de control de cada una de ellas, se empleó el comando *actxcontrol*, el cual permite controlar la cámara mediante la herramienta MATLAB™, y realizar la adquisición mediante ésta plataforma. El algoritmo permite controlar parámetros propios de la cámara como el tiempo de exposición, periodo de muestreo y cantidad de muestras esenciales para una óptima adquisición de los datos. El proceso de adquisición en el algoritmo es descrito en el diagrama de flujo de la Figura 14.

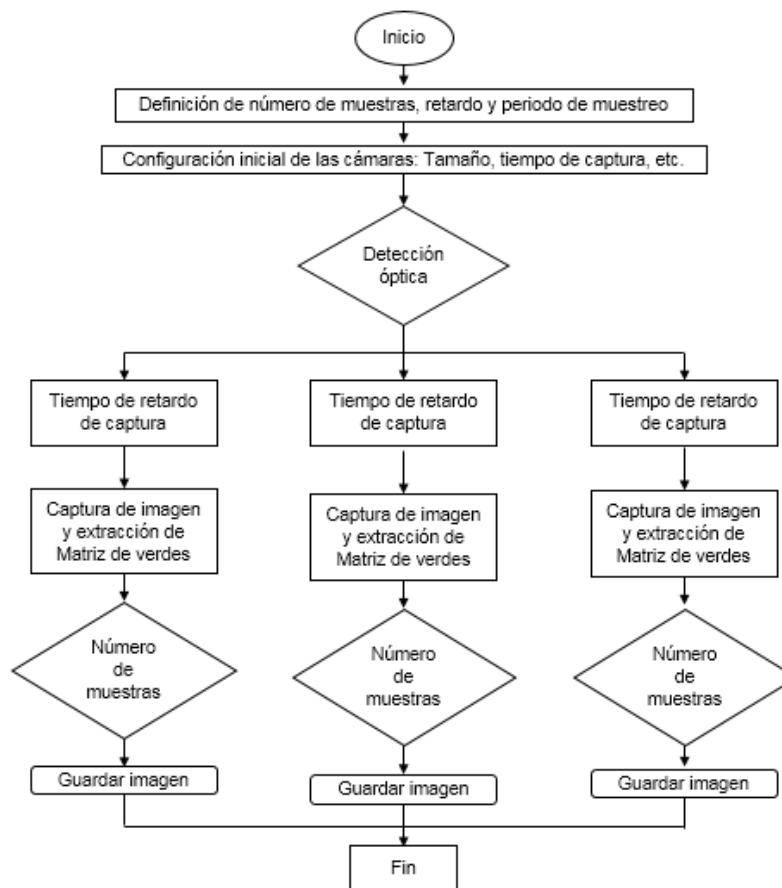


Figura 14. Diagrama de flujo del algoritmo de adquisición implementado en las cámaras, adaptado de (Rincón Correa & Hernandez Quintero, 2016).

El algoritmo inicia definiendo las variables necesarias en cada una de las pruebas, seguidamente se configuran los parámetros de la cámara, esperando la inicialización óptica por medio del láser para la toma de muestras; el código finaliza una vez se han alcanzado la cantidad de muestras especificadas al inicio del algoritmo, cada una de las imágenes capturadas es guardada en un vector para su posterior tratamiento. El algoritmo de adquisición diseñado se puede consultar en el apéndice D.

3.2.4 Sincronización del sistema. Con el fin de garantizar la sincronía en las imágenes adquiridas por las tres cámaras, además de los datos atmosféricos sensados por el sistema embebido, se hace necesario realizar una prueba de sincronización para determinar el número de muestras idóneas a tomar en cada una de los test y asegurar que cada muestra sea estadísticamente independiente una de otra, además de garantizar la validez de la teoría de la “atmosfera congelada” propuesta por Taylor en la cual se formula que los cambios de fase se mantienen válidos y los parámetros que la conforman estacionarios en una ventana de tiempo inferior a los 100 milisegundos (Bharmal, 2015) . De esta manera se garantiza que las condiciones atmosféricas se mantienen iguales, durante éste tiempo, en cada uno de los datos adquiridos, además cada muestra corresponde a una condición atmosférica estadísticamente independiente.

Para garantizar la sincronía en el inicio de la toma de datos por las tres cámaras además del sistema embebido, el módulo de humedad de la imagen de la *Figura 12* incorpora un circuito de inicialización óptica empleando una fotorresistencia que varía en función de la luz que incide sobre ella, a más luz percibida, la resistencia en los terminales del foto resistor será menor, dicho elemento envía un pulso de inicialización al Microcontrolador. De esta manera, las tres cámaras y

el circuito de sensado de las variables atmosféricas se encuentran sincronizados ópticamente por medio del “encendido” del láser.

Para la prueba de laboratorio inicial se realizó un test de 1800 muestras con un periodo de 0,3 segundos para determinar los retardos existentes entre los diferentes equipos de cómputo involucrados en el montaje experimental de la *Figura 7*, en la *Figura 15*, se muestra el retardo de los equipos de cómputo empleados en la prueba de sincronización.

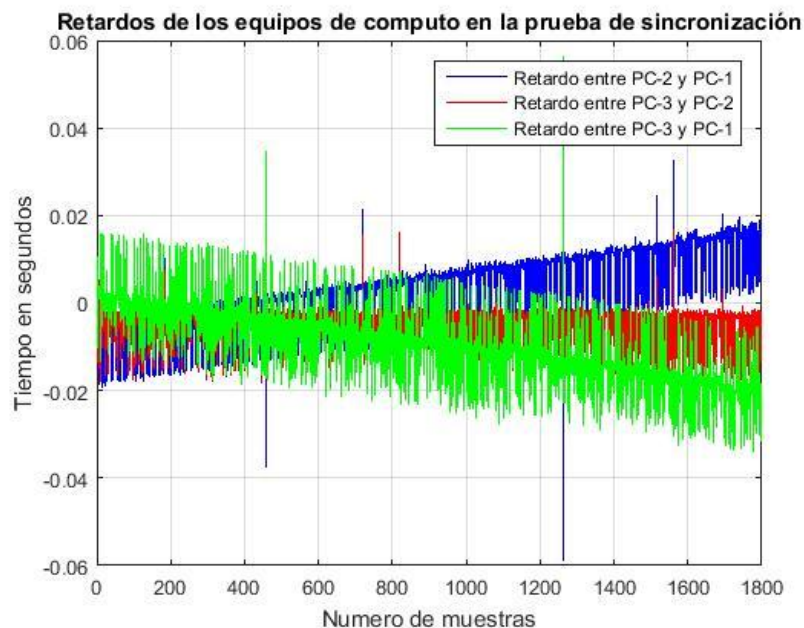


Figura 15. Tiempo de retardo en los equipos de cómputo en la prueba de sincronización.

Se evidencia un retardo máximo de 22,43 [ms] para el caso particular del equipo de cómputo conectado a la cámara 1 y 3, dicho retardo fue el máximo encontrado en la prueba de sincronización con lo que se observa que las muestras adquiridas cumplen con la teoría de atmosfera congelada

propuesta por Taylor (Bharmal, 2015) y por ende garantizando así una sincronía en los datos adquiridos. Después de realizada esta prueba se inicia la adquisición de datos.

3.2.5 Captura de datos

3.2.5.1 Prueba a escala de Laboratorio. Se realizó una prueba con 2000 muestras, con un periodo de 0.3 segundos, con lo cual se pudo determinar que el haz presentó un comportamiento similar a través del tiempo transcurrido en la toma de datos. De igual manera se registraron 2000 muestras de variables atmosféricas (Temperatura, presión, humedad y flujo del viento) durante la prueba para establecer los parámetros atmosféricos del medio durante la prueba.

3.2.5.2 Pruebas en campo (Sede UIS- Guatiguará). Se realizaron seis (6) pruebas en total, a diferentes horas del día, cada una de 2000 muestras, con un periodo de muestreo de 0,3 segundos, a tres diferentes distancias, los tiempos de exposición y las distancias de cada uno de los sensores son declarados en la Tabla 9. A lo largo del camino de propagación de ubicaron (6) sensores de temperatura, tres (3) sensores de humedad, dos (2) sensores de presión y dos (2) sensores de flujo de aire haciendo uso de dos circuitos de adquisición empleando el microcontrolador STM32F746G – Discovery, (dicho circuito y sus algoritmos pueden ser consultados en la sección 3.2.1 y 3.2.2 respectivamente). Durante cada una de las pruebas se realizaron mediciones de las variables atmosféricas sincronizadas a fin de determinar algunas de las propiedades físicas del medio turbulento, por el cual se propagó el frente de onda del haz láser, para su posterior procesamiento.

En la Tabla 11, se muestran las distancias de cada uno de los sensores a lo largo del camino de propagación del haz láser en las pruebas en campo. La distancia máxima de propagación empleada para cada prueba y la hora a la que se adquirieron los datos se detalla en la Tabla 12.

Tabla 11

Distancia de los sensores con respecto a la salida de haz láser para las pruebas en campo

Variable	Temperatura						Humedad			Presión		Flujo del viento	
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	1	2	1	2
Sensor	1	2	3	4	5	6	1	2	3	1	2	1	2
Distancia [m]	4,4	6,1	8,7	20,	23,	25,	4,4	8,7	25,	6,1	23,	6,1	23,
	6	9	4	5	2	4	6	4	4	9	2	9	2

Tabla 12

Distancia máxima de propagación del haz láser y hora de adquisición de cada prueba

Prueba	Distancia [m]	Hora de Adquisición	Prueba	Distancia [m]	Hora de Adquisición
1	26,10	10:46AM	4	31,66	3:18PM
2	31,66	12:56PM	5	39,56	4:42PM
3	39,56	2:27PM	6	26,10	5:22PM

3.3 Tratamiento de imágenes

En este trabajo se estudia el efecto que el medio influenciado por su turbulencia, en campo abierto a diferentes horas del día, tiene sobre el frente de onda del haz láser propagado, para lo cual se

trataron las imágenes adquiridas y se evalúan sus centroides. En la *Figura 16*, se presenta de manera general el diagrama de flujo seguido y se explican cada una de sus etapas.

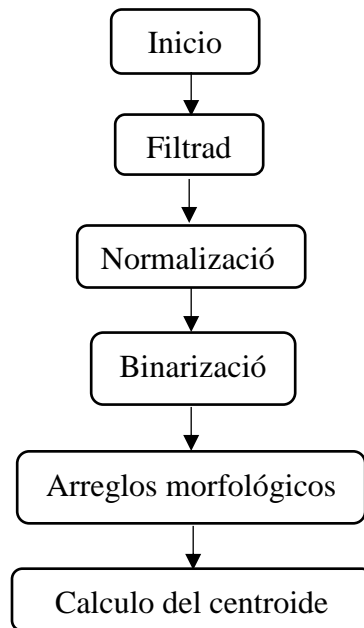


Figura 16. Algoritmo de tratamiento de Imágenes.

3.3.1 Inicio. En esta etapa se cargan las imágenes previamente capturadas en cada una de las pruebas experimentales realizadas y adquiridas en un formato “.jpg”. Para las pruebas en laboratorio se extrae la matriz correspondiente al color rojo pues la longitud de onda del láser Helio-Neón es de 632,8 [nm] y ésta corresponde a un color rojo en la escala del visible. En campo abierto se extrae la matriz correspondiente al color verde ya que el láser Verdi V2 empleado tiene una longitud de onda de 532 [nm] lo cual genera la componente de color verde principalmente. En ambos casos se procesa una imagen en escala de grises (correspondiente a la longitud de onda descrita).

3.3.2 Filtrado. Debido a unas franjas observadas en las imágenes adquiridas en cada una de las pruebas realizadas se hace indispensable aplicar una etapa de filtrado a las imágenes capturadas por cada uno de los sensores CMOS de los montajes experimentales de la Figura 7 y 8, para ello se emplea el algoritmo de Transformada Rápida de Fourier en dos dimensiones (FFT2) a fin de suprimir las componentes frecuenciales indeseadas en las imágenes y así obtener una imagen del spot libre de franjas que puedan incurrir en un error al calcular el centroide de la misma. En la Figura 17a y 17b, se muestra el proceso realizado para cada una de las imágenes. La aparición de éstas franjas de interferencia se debe al uso de un filtro infrarrojo colocado al frente de cada sensor CMOS, como medida de protección, ya que son altamente sensibles a ésta longitud de onda.

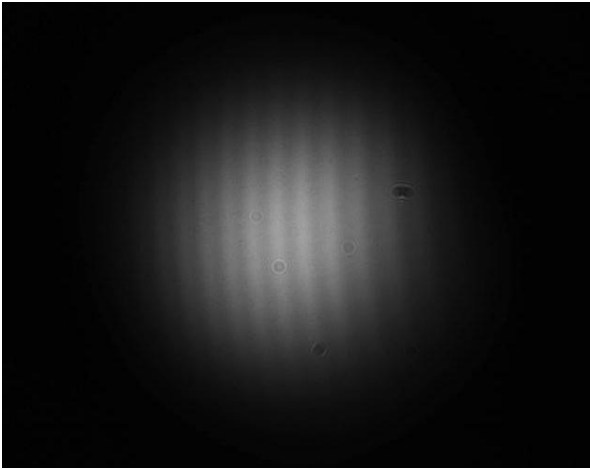
3.3.3 Normalización. En este proceso se reajustan los valores de intensidad de cada uno de los pixeles que conforman el spot del láser, permitiendo así un rango que abarque hasta el valor máximo el cual se define en 255 para la escala de grises, de esa manera se permite una mejor visualización de la imagen y su respectivo histograma. En la Figura 17c, se percibe el spot del láser antes y después del proceso de normalización.

3.3.4 Binarización. La binarización consiste en una reducción de la información en la que los únicos valores posibles corresponden a un máximo y un mínimo (falso y verdadero). Para una imagen digital de ocho bits, el valor máximo corresponde a 255 lo cual se define con un color de blanco, y el valor mínimo es definido en 0 lo que corresponde a un color negro. Para la binarización se define un umbral de binarización, en el cual los valores que superen el umbral se asumen como máximos y dichos valores que no alcancen el umbral son definidos como mínimos. El valor de

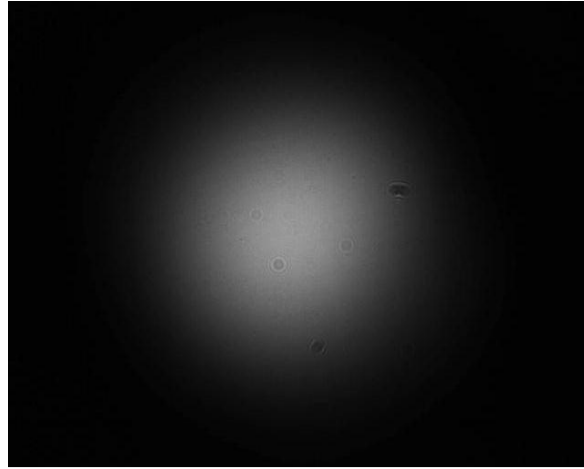
umbral utilizado fue $1/e^2$, lo cual representa el diámetro teórico del haz láser. En la Figura 17d, se muestra el spot del haz antes y después de realizar el proceso de binarización.

3.3.5 Arreglos morfológicos. Una vez obtenida una imagen binaria del spot del haz láser se hace necesario realizar procesos morfológicos, los cuales se emplean para interpretar la estructura o forma de objetos en imágenes. Para este caso se empleó la técnica de erosión y dilatación de la imagen binaria a fin de mejorar los bordes del spot y eliminar puntos desconectados del contorno, y la dilatación se utilizó para recuperar el área original de la imagen y la información perdida en el proceso de erosión. En la Figura 17e, se muestra la imagen binaria antes y después de los procesos de erosión y dilatación.

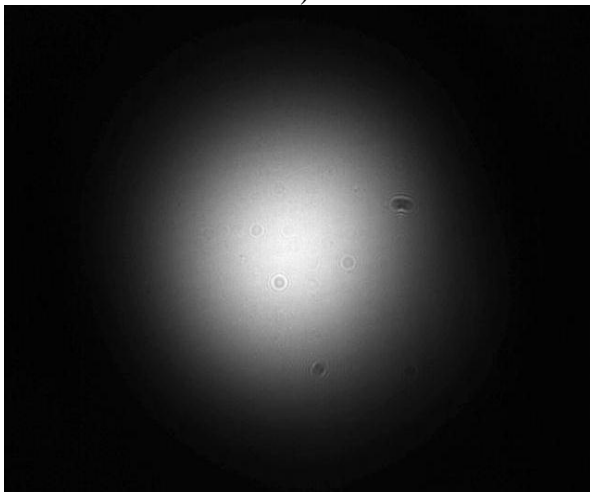
3.3.6 Calculo del centroide. El centroide o centro de masa se define como el punto en el cual se concentra la mayor cantidad de masa de un objeto o de un sistema (Hawkes, 1978). Dicho centro sirve para estudiar el comportamiento del spot del láser durante cada una de las pruebas realizadas y como se ve afectado éste por los diferentes factores que afectan el medio en el que se propaga. Para calcularlo, se busca en la matriz que compone la imagen capturada, la región en la que se encuentra contenida la mayor intensidad del spot y de esta manera se halla el centro de masa de la imagen. En la Figura 17f se muestra el spot del haz láser debidamente procesado con su respectivo centroide.



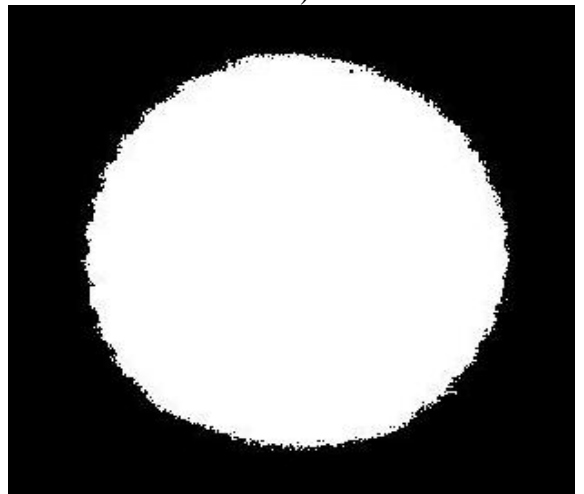
a)



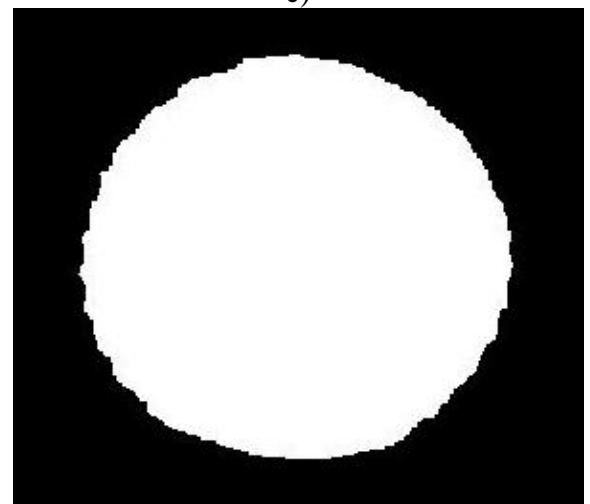
b)



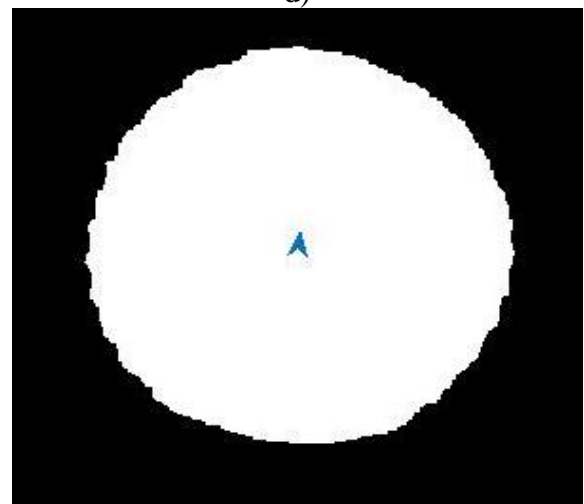
c)



d)



e)



f)

Figura 17. Proceso del tratamiento de las imágenes capturadas en cada una de las pruebas. a) Imagen original, b) Imagen filtrada, c) Imagen normalizada, d) Imagen binarizada, e) Imagen binaria con arreglos morfológicos y, f) Spot del haz con el centroide calculado. Fuente: autores.

3.4 Análisis de resultados

En esta sección se presentan cada una de las pruebas realizadas y su análisis durante el desarrollo del proyecto además de la verificación de la sincronización en los datos adquiridos.

3.4.1 Sincronización de las pruebas. Para verificar la simultaneidad en los datos adquiridos en cada una de las pruebas realizadas, es conveniente analizar y verificar sus tiempos de sincronización. Una vez adquiridas las muestras de los montajes experimentales de las Figura 7 y 8, se procede a verificar la sincronía de las imágenes adquiridas por los computadores conectados a los sensores CMOS-1, CMOS-2 y CMOS-3. En la Tabla 13, se muestran los tiempos promedios para cada una de las pruebas tomadas además de la desviación estándar de los datos.

Tabla 13

Tiempos de sincronismo para cada prueba

<i>Pruebas</i>	<i>PC-1 vs PC-2 [ms]</i>		<i>PC-2 vs PC-3 [ms]</i>		<i>PC-3 vs PC-1 [ms]</i>	
	<i>Tiempo</i>	<i>Desv</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Desv</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Desv</i>
	<i>Promedio</i>	<i>Estándar</i>	<i>Promedio</i>	<i>Estándar</i>	<i>Promedio</i>	<i>Estándar</i>
Laboratorio	7,3030	0,6479	16,6057	4,4526	9,3027	4,4697
Prueba 1	55,2160	5,3067	51,7517	7,3989	6,5357	2,5790

En	Prueba 2	52,1703	1,3648	50,1519	0,8017	22,3222	1,4002
campo	Prueba 3	5,1969	20,3391	1,2408	8,6195	3,9561	20,9796
	Prueba 4	17,6443	10,474	30,2809	8,0257	12,6366	11,0647
	Prueba 5	6,3799	7,6787	29,9269	10,5407	23,5470	11,4561
	Prueba 6	43,3558	7,8700	51,3639	10,3341	8,0080	11,1317

Como se puede evidenciar en la Tabla 13 anterior, ninguno de los tiempos registrados supera los 100 [ms], con lo cual se puede determinar que las pruebas realizadas cumplen la teoría de atmosfera congelada de Taylor, el tiempo mayor registrado fue de 55,2169 [ms], como se muestra en color amarillo.

3.4.1 Prueba a escala de Laboratorio. Una vez adquiridos los datos del montaje experimental de la Figura 7, se procedió a realizar el estudio de las mismas. En la prueba en laboratorio en condiciones ambientales normales (sin ser alteradas, ni controladas las variables físicas), se verificó el correcto funcionamiento del montaje experimental, además, se estableció una prueba de referencia para compararla con las pruebas en campo abierto donde el haz láser se encuentra influenciado por los cambios naturales del medio. En la Figura 18, se percibe el histograma temporal de las posiciones del centroide reconstruido por estimación desde las cámaras CMOS-1 y CMOS-2 (al plano de la cámara CMOS-3), en dicha reconstrucción se tiene en cuenta los efectos intracavidad del láser, y las posiciones del centroide medidas a partir de las capturas hechas por la cámara CMOS-3.

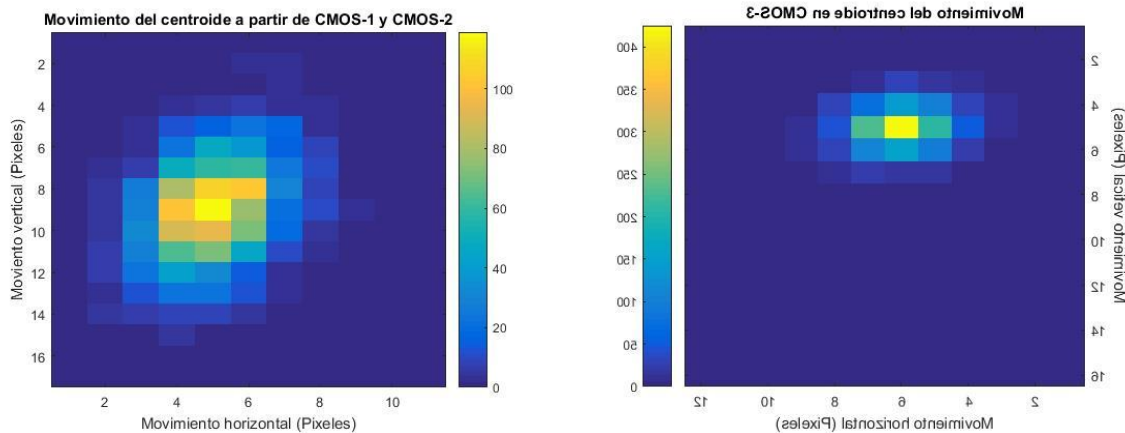


Figura 18. Dispersión del centroide en la prueba de laboratorio. a) A partir de CMOS-1 y CMOS-2 (Izquierda). b) Visto desde el sensor CMOS-3 (Derecha).

Se percibe una dispersión menor en la cámara 3 dada las condiciones de laboratorio en las cuales los parámetros ambientales como temperatura, humedad, presión y flujo de aire se mantuvieron prácticamente constantes durante la prueba, dichos parámetros ambientales son reportados en las Figura 22 a la Figura 25.

En la Figura 19, 20 y 21, se observa en color azul el comportamiento temporal del centroide capturado directamente por la cámara CMOS-3 a lo largo de la prueba, en color rojo la estimación que se obtiene a partir de las cámaras CMOS-1 y CMOS-2 proyectada a la misma distancia donde se posiciona la cámara CMOS-3. La Figura 19 describe el movimiento radial en píxeles del centroide y en las Figura 20 y 21 se muestran, el movimiento horizontal y vertical del centroide en píxeles, respectivamente. Se evidencia que las gráficas obtenidas describen un comportamiento similar con una diferencia de sólo un píxel, el cual se corresponde, con la resolución del sensor CMOS-3 para el movimiento radial estimado desde la CMOS-1 y CMOS-2 y el capturado por la

cámara CMOS-3; en comparación para cada uno de los casos presentados dado que no se cuenta con modificación del ambiente a la hora de aplicar la prueba.

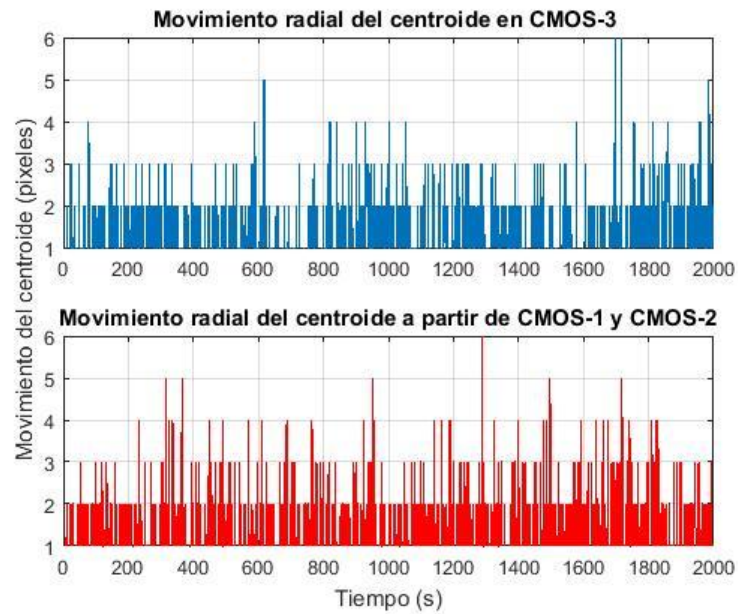


Figura 19. Movimiento radial del centroide obtenido en la prueba de laboratorio, vista desde la cámara CMOS-3 (AZUL) y estimada a partir de las cámaras CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).

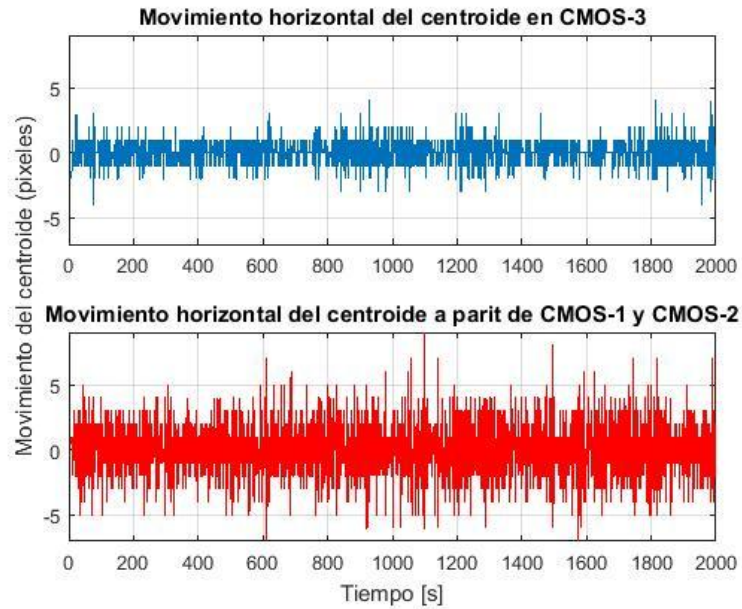


Figura 20. Movimiento horizontal del centroide obtenido en la prueba de laboratorio, vista desde la cámara CMOS-3 (AZUL) y estimada a partir de las cámaras CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).

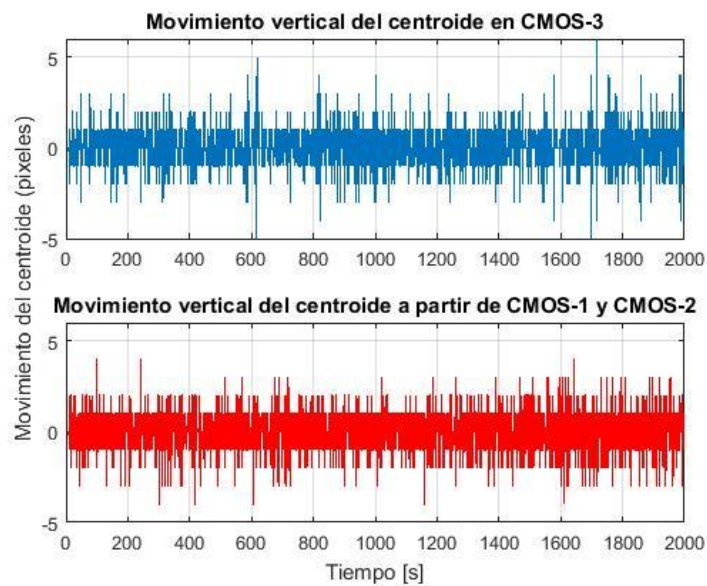


Figura 21. Movimiento vertical del centroide obtenido en la prueba de laboratorio, vista desde la cámara CMOS-3 (AZUL) y estimada a partir de las cámaras CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).

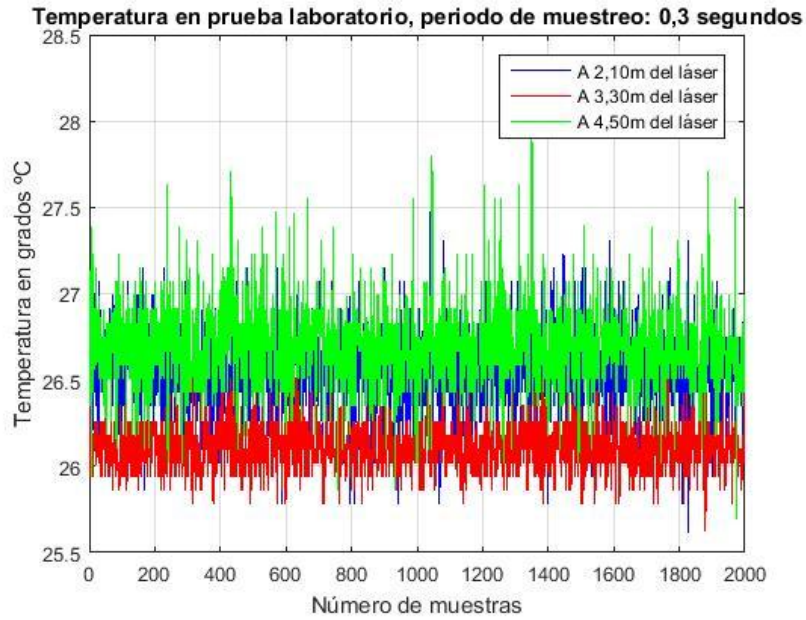


Figura 22. Temperatura a lo largo del camino de propagación del haz láser durante la prueba de laboratorio.

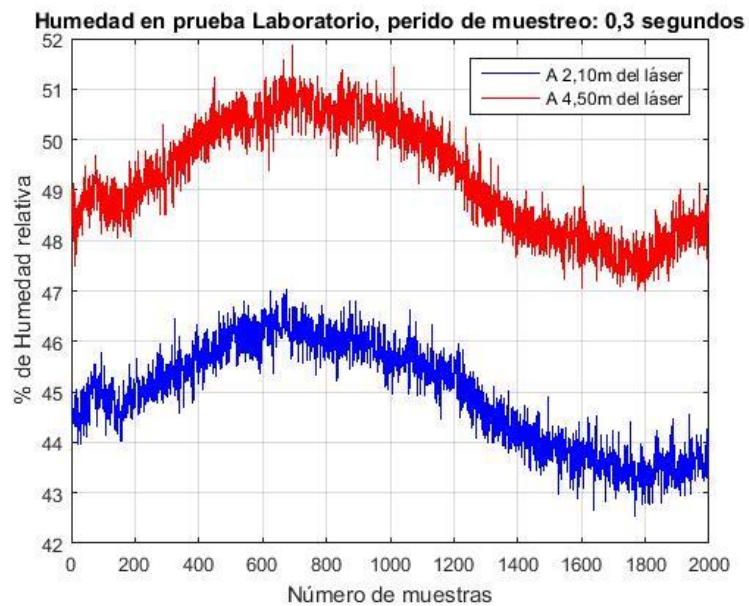


Figura 23. Humedad a lo largo del haz láser durante la prueba de laboratorio. a) Humedad a 2,10m del haz láser. b) Humedad a 4,50m del haz láser.

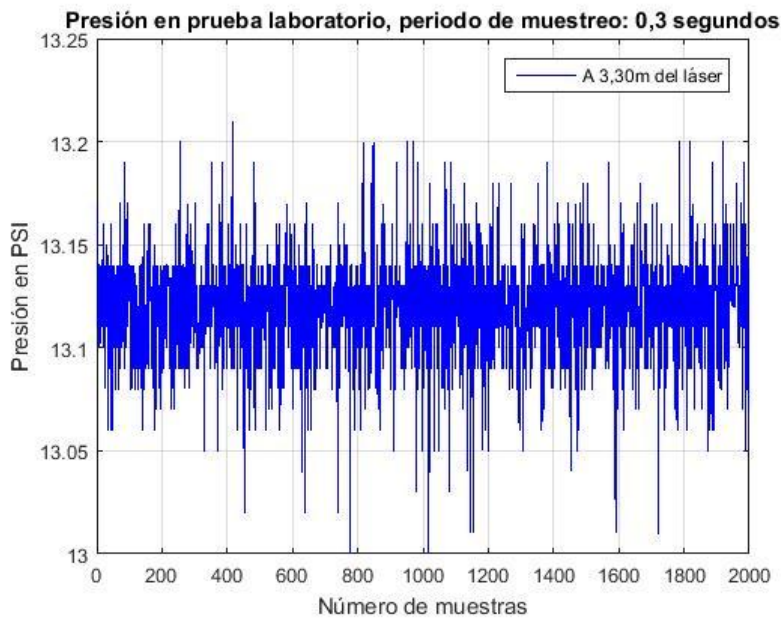


Figura 24. Presión capturada durante la prueba de Laboratorio ubicado a 3 m del haz láser.

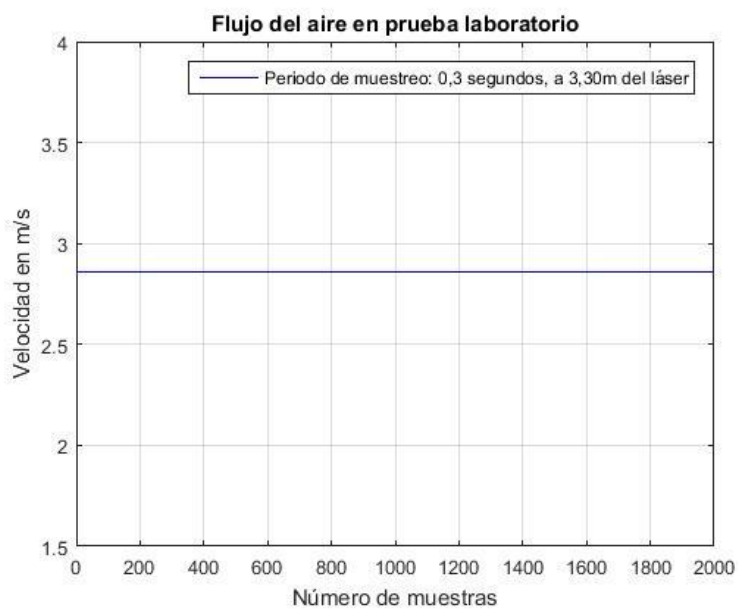


Figura 25. Flujo del viento durante la prueba de laboratorio a 3m del haz láser.

De la *Figura 22* a la *Figura 25*, se muestran los diferentes parámetros ambientales adquiridos durante la prueba a escala del laboratorio, en ellos se evidencia el comportamiento de la temperatura, humedad, presión y flujo del viento, asociando de esta manera los parámetros físicos ambientales de la prueba experimental. Se observa que dichos valores se mantienen relativamente constantes debido al entorno de laboratorio en el que fueron adquiridas las pruebas. Cabe destacar que el sensor de flujo de aire registró una velocidad constante dado los minúsculos cambios en dichos parámetros para el ambiente de laboratorio. En la *Tabla 14*, se muestra el promedio del valor medido por cada sensor además de la desviación estándar de cada medición. Después de analizar la prueba de laboratorio, se inicia el análisis de los datos adquiridos en campo.

Tabla 14

Valores promedio y desviaciones estándar de las variables ambientales en la prueba en laboratorio

Variables atmosféricas		Promedio	Desviación estándar
	A 2,10m del láser	26,55	0,21
Temperatura [°C]	A 3,20m del láser	26,11	0,13
	A 4,50m del láser	26,68	0,24
Humedad [% Humedad relativa]	A 2,10m del láser	44,94	1,02
	A 5,50m del láser	49,25	1,11
Presión [PSI]	A 3,20m del láser	13,11	0,02
Flujo del viento [m/s]	A 3,20m del láser	2,86	0

3.4.2 Pruebas en campo. A continuación, se presentan los resultados de las seis (6) pruebas estipuladas para el montaje experimental de la Figura 8, donde seguidamente se analiza el movimiento del centroide y cada uno de los parámetros ambientales medidos.

En la *Figura 26*, se muestra la distribución del centroide obtenido en la prueba 3 en la cual el sensor CMOS-3 se encontraba a una distancia de 39,56 [m] con respecto a la ventana de salida del láser, dicha prueba fue adquirida a las 2:27 PM. La duración aproximada de cada prueba en campo realizada es de 10 minutos.

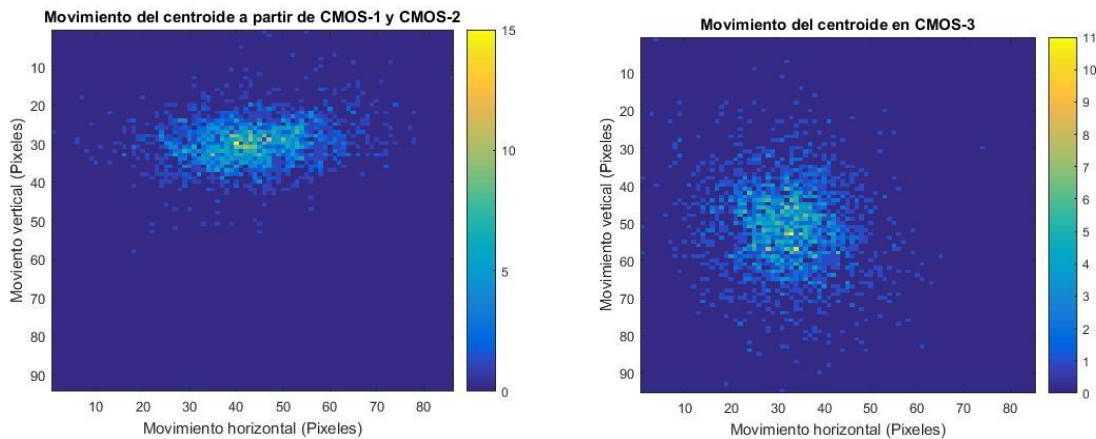


Figura 26. Dispersión del centroide obtenido en la prueba 3. a) A partir de CMOS-1 y CMOS-2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS-3 (Derecha).

En la *Figura 26* (derecha) se observa una leve distribución mayor del centroide en las imágenes capturadas por la cámara CMOS-3 y las estimadas a partir de las cámaras CMOS-1 y CMOS-2, obteniendo como repeticiones máximas en el mismo punto de solo 11 veces, mientras que en el otro caso el centroide se repite alrededor de 15 veces en el mismo punto. Comparando la imagen de la derecha con la obtenida en la *Figura 18*, para la prueba en laboratorio en la cual la dispersión

capturada por el sensor CMOS-3 es menor a la estimada, se nota un contraste en las dispersiones que es ocasionado por el medio influenciado por las variables físicas ambientales durante la prueba, en las *Figura 30* a la *Figura 33* se muestran las mediciones de los parámetros de humedad, temperatura, presión y flujo del viento respectivamente durante la prueba.

De la *Figura 27* a la *Figura 29*, es posible comparar la fluctuación del movimiento del centroide para cada muestra obtenida por la cámara CMOS-3 (azules) y la estimada a partir de las cámaras CMOS-1 y CMOS-2 (rojas). En dichas imágenes se evidencia un movimiento radial y horizontal mayor para las curvas azules alcanzando un valor máximo de 94 píxeles para el caso del movimiento horizontal, mientras que con los resultados obtenidos por estimación a partir de las cámaras CMOS-1 y CMOS-2 se encontró una fluctuación máxima de 55 píxeles. Para el caso del desplazamiento vertical se muestra un movimiento similar en todas las curvas, azules y rojas, en cada una de las pruebas realizadas.

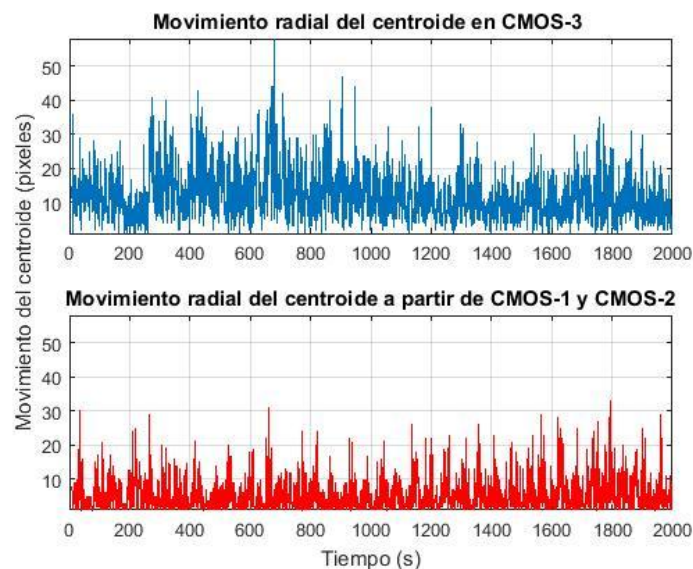


Figura 27. Movimiento radial del centroide obtenido en la prueba 3, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).

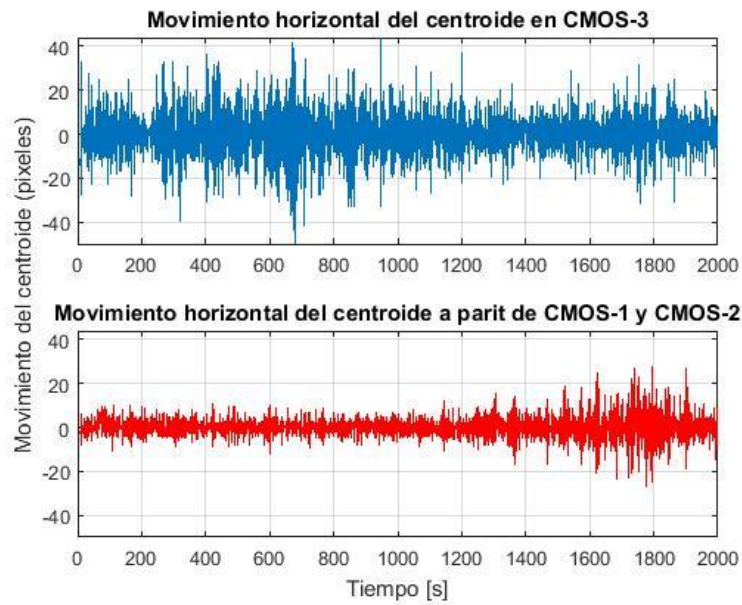


Figura 28. Movimiento horizontal del centroide obtenido en la prueba 3, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).

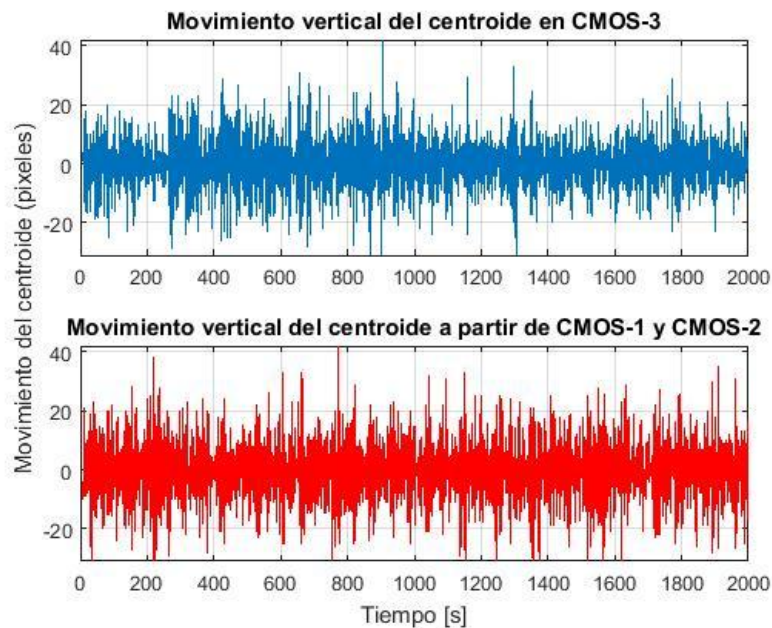


Figura 29. Movimiento vertical del centroide obtenido en la prueba 3, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).

De la *Figura 30* a la *Figura 33*, se muestra la humedad, temperatura, presión y flujo del viento respectivamente, en dos puntos espaciales diferentes durante la ejecución de la prueba la cual inició a las 2:27 PM y terminó a las 2:37 PM. Se describen los cambios significativos en la humedad, la cual varió entre 52% y 68% de humedad relativa en el camino de propagación del haz, la temperatura es otro factor que experimentó una gran variación entre 29,7°C a 35°C, debido a la exposición de luz solar durante la medición.

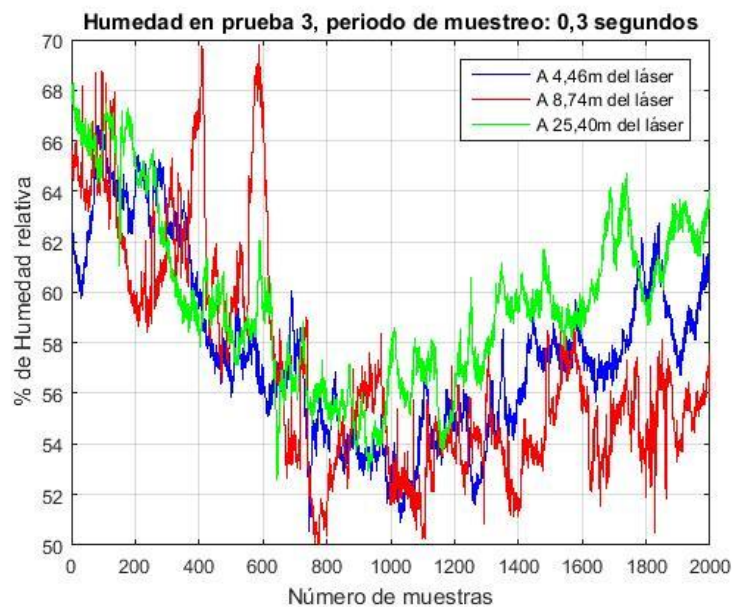


Figura 30. Humedad en la prueba 3. El color indica la distancia medida desde la salida del láser hasta el respectivo sensor.

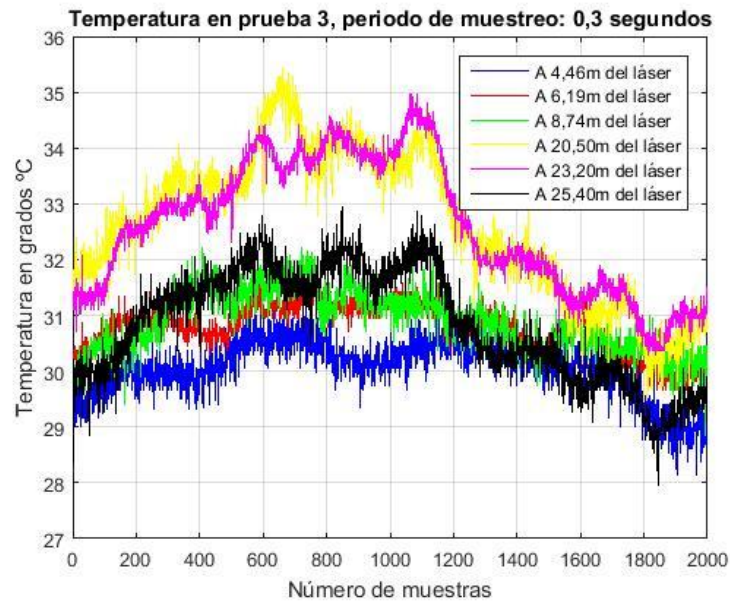


Figura 31. Temperatura en la prueba 3. Cada color indica la distancia medida desde la salida del láser hasta el respectivo sensor.

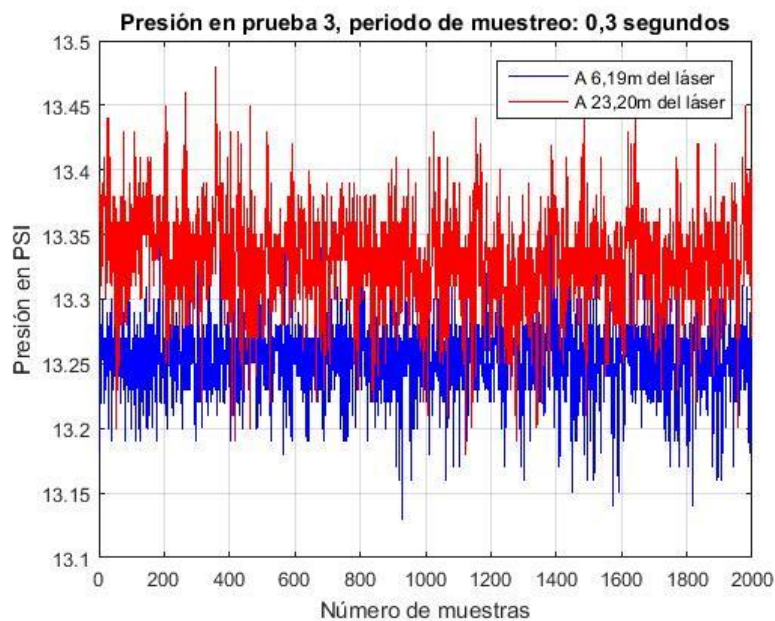


Figura 32. Presión en la prueba 3. a) Presión a 6,19 m de la salida del haz láser (AZUL). b) Presión a 23,20 m de la salida del haz láser (ROJO).

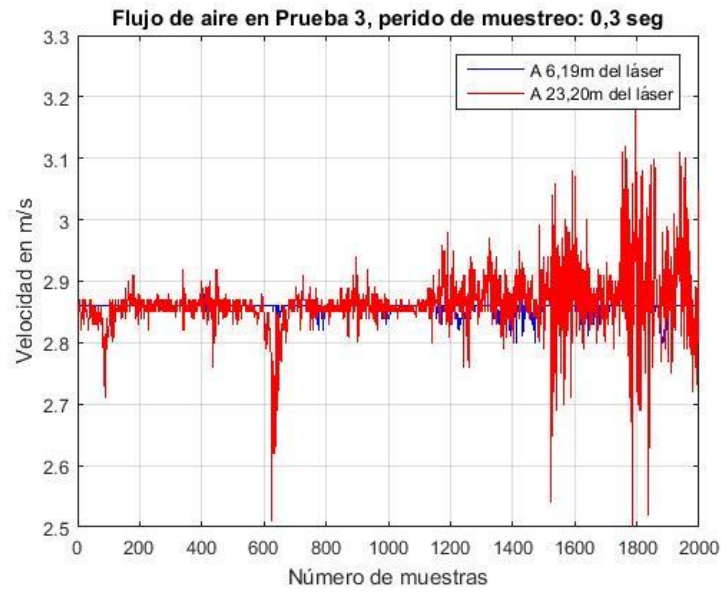


Figura 33. Flujo del aire en la prueba 3. a) Flujo del aire a 6,19 m de la salida del haz láser (AZUL). b) Flujo del aire a 23,20 m de la salida del haz láser (ROJO).

Cabe destacar la diferencia en las fluctuaciones percibidas por cada sensor de flujo de aire empleado en las mediciones de dicha variable física. El sensor ubicado en una posición de 23,20 m a la salida del láser cuenta con un rango de medición más amplio comparado al sensor ubicado en una posición de 6,19 m, debido a la ubicación del montaje experimental de la Figura 8, dicho sensor cercano quedó posicionado muy próximo del edificio EDI de la sede UIS – Guatiguará, lo que ocasionó que el flujo de aire disminuyera de manera significativa comparado con el flujo de aire en espacio abierto. Se evidenció una variación en la velocidad del aire entre 2,5 m/s y 3,2 m/s en la dirección de propagación del haz. La presión se mantuvo estable con fluctuaciones mínimas durante la prueba.

En la *Figura 34*, se muestra la distribución del centroide para la prueba 4 en la cual la cámara CMOS-3 se encuentra posicionada a una distancia de 31,66 m, con respecto a la salida del láser, dicha prueba fue adquirida a las 3:18 PM. Allí, se muestra una dispersión similar en las imágenes capturadas por la cámara CMOS-3 para la prueba 4 y las estimadas a partir de las cámaras CMOS-1 y CMOS-2, en la imagen derecha se muestra una repetición de máximo 31 píxeles para la posición del centroide en comparación al máximo de 34 píxeles encontrados como repetición máxima en la distribución de la imagen estimada de la izquierda.

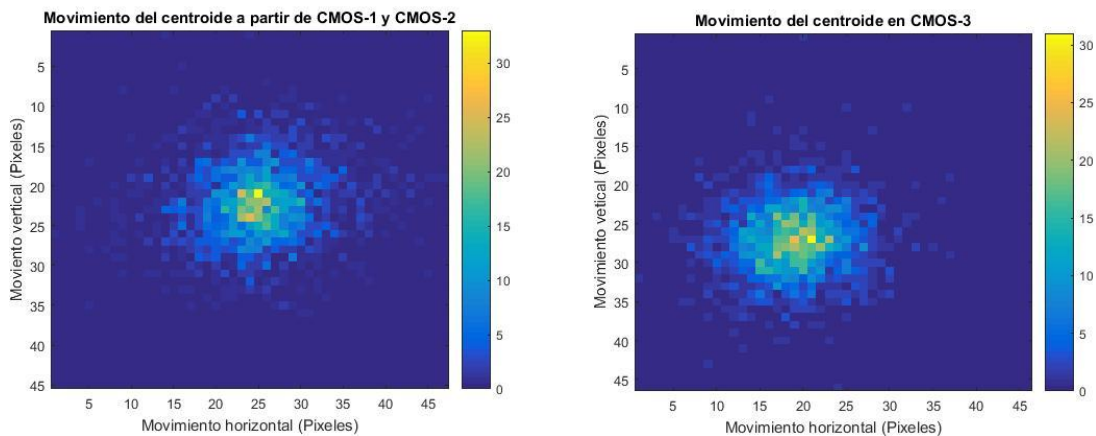


Figura 34. Dispersión del centroide obtenido en la prueba 4. a) A partir de CMOS-1 y CMOS-2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS-3 (Derecha).

En comparación con la distancia de la cámara CMOS-3 de la prueba 3 (mayor), en esta prueba se evidencia un movimiento del centroide menor, lo cual sugiere que a menor distancia de propagación el haz experimenta menores fluctuaciones también.

En las *Figura 35* a *Figura 37*, se describe el movimiento del centroide capturado por la cámara CMOS-3, curvas en azul, que evidencia un movimiento similar comparado con el movimiento estimado desde las cámaras CMOS-1 y CMOS-2, gráficas en rojo, sin embargo la fluctuación máxima es menor posiblemente por la distancia menor a la cual fue posicionado el sensor CMOS-3.

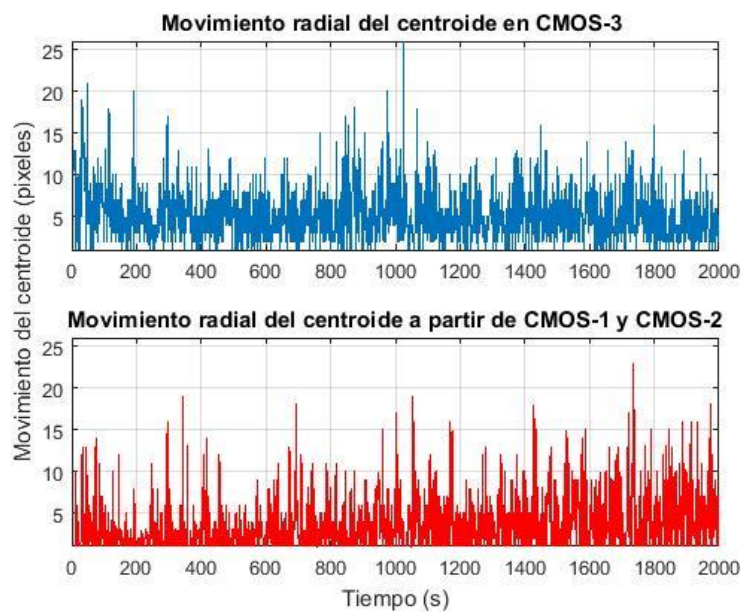


Figura 35. Movimiento radial del centroide obtenido en la prueba 4, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).

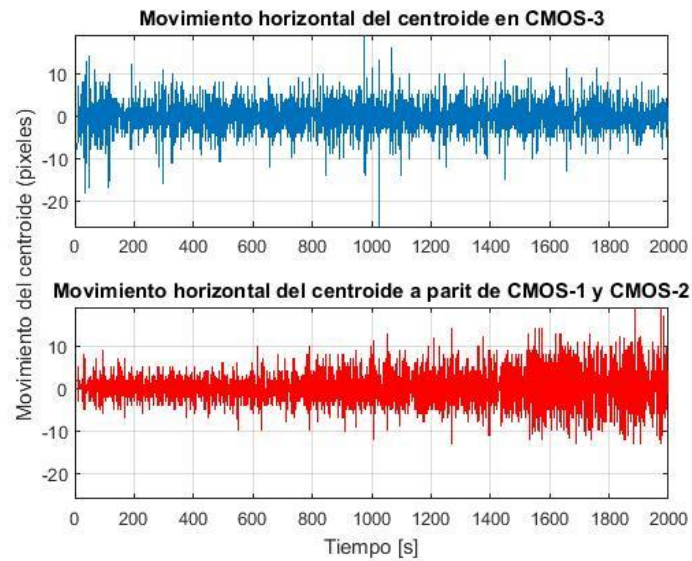


Figura 36. Movimiento horizontal del centroide obtenido en la prueba 4, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).

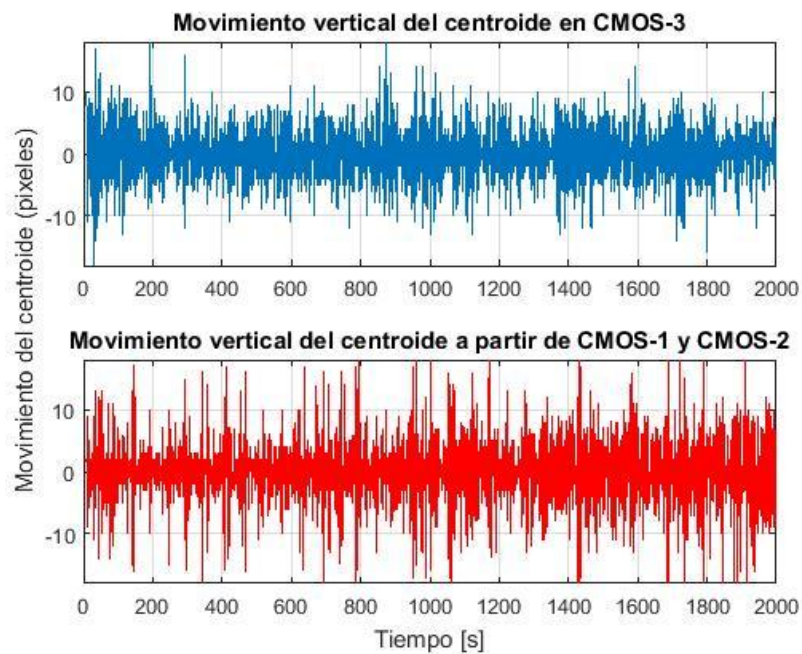


Figura 37. Movimiento vertical del centroide obtenido en la prueba 4, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).

En la *Figura 38* a la *Figura 41*, se muestra la medición de las variables físicas: humedad, temperatura, presión y flujo de aire, respectivamente, en la prueba 4 la cual fue sensada de 3:18 PM a 3:28 PM. En ella se evidencia una variación en la humedad entre el 54% al 76% de humedad relativa, dicha variación de debió a las condiciones atmosféricas que mostraron la tendencia a precipitaciones a dicha hora, hecho en particular que incrementa la humedad relativa significativamente. La temperatura también se vió afectada durante la prueba con una disminución entre 29,2°C hasta 27,8°C debido a la falta de iluminación solar durante la captura de datos. También se registró variación en la velocidad del aire, con cambios entre 2,4 m/s a 3,3 m/s.

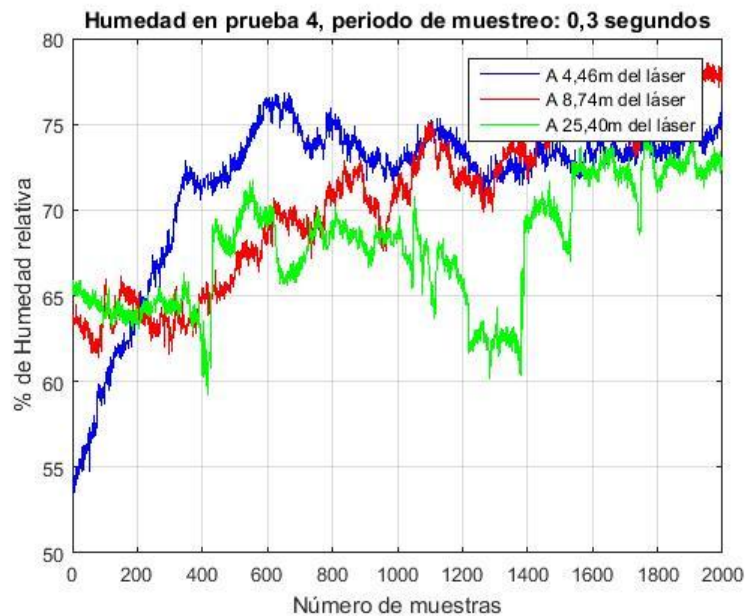


Figura 38. Humedad en la prueba 4. El color indica la distancia medida desde la salida del láser hasta el respectivo sensor.

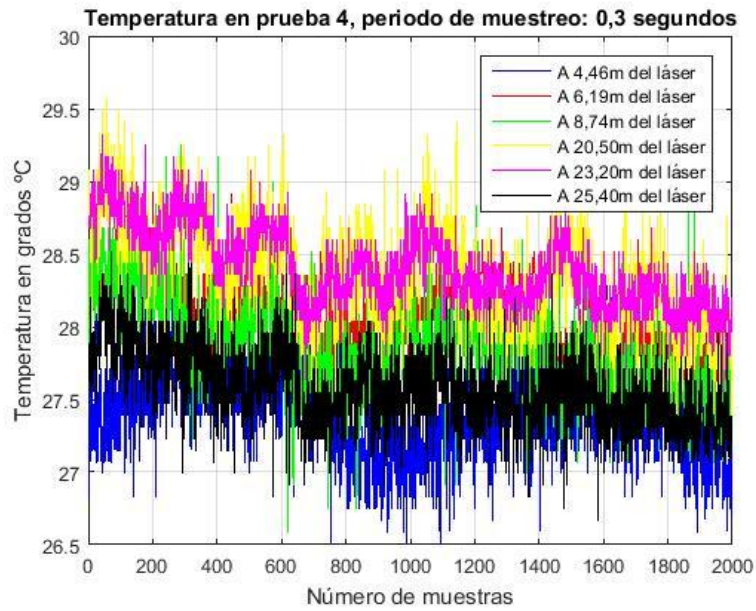


Figura 39. Temperatura en la prueba 4. Cada color indica la distancia medida desde la salida del láser hasta el respectivo sensor.

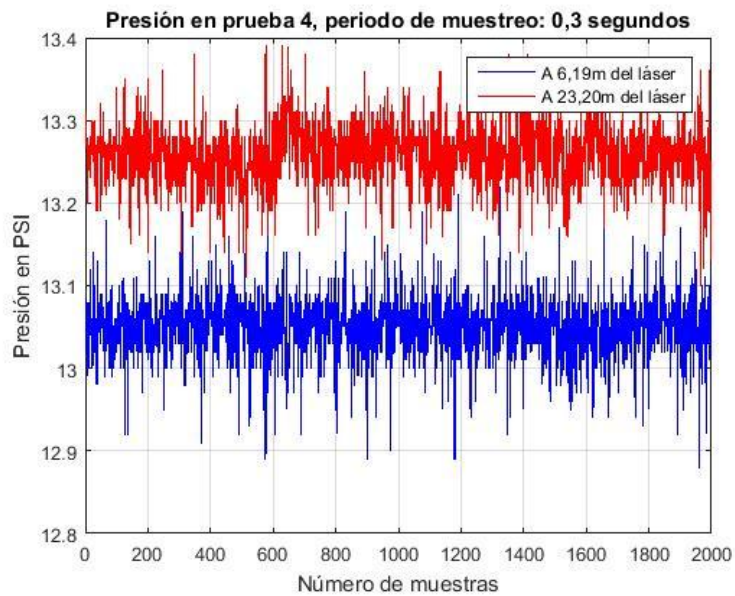


Figura 40. Presión en la prueba 4. a) Presión a 6,19 m de la salida del láser (ROJO). b) Presión a 23,20 m de la salida del láser (AZUL).

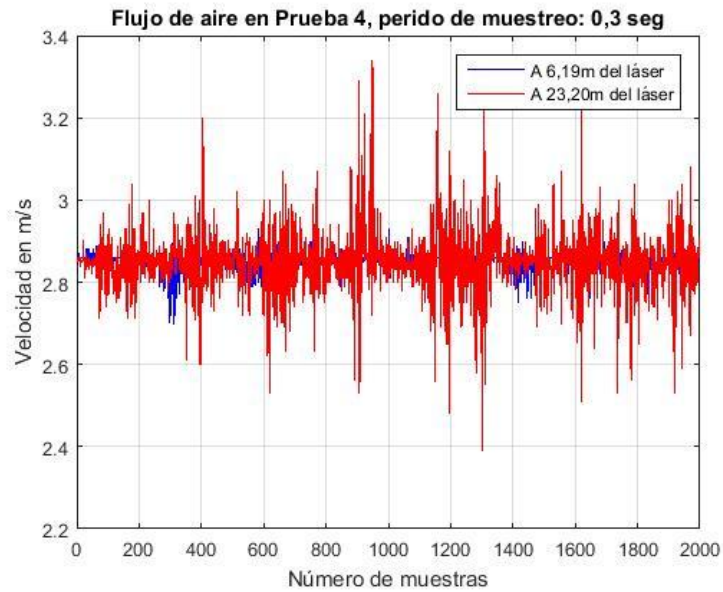


Figura 41. Flujo de aire en la prueba 4. a) Flujo de aire a 6,19 m de la salida del láser (AZUL). b) Flujo de aire a 23,20 m de la salida del láser (ROJO).

En la *Figura 42*, se muestra la dispersión del centroide en la prueba 6 en la cual la cámara CMOS-3 se encuentra posicionada a una distancia de 26,10 m con respecto a la salida del láser, dicha prueba 6 fue adquirida a las 5:22 PM.

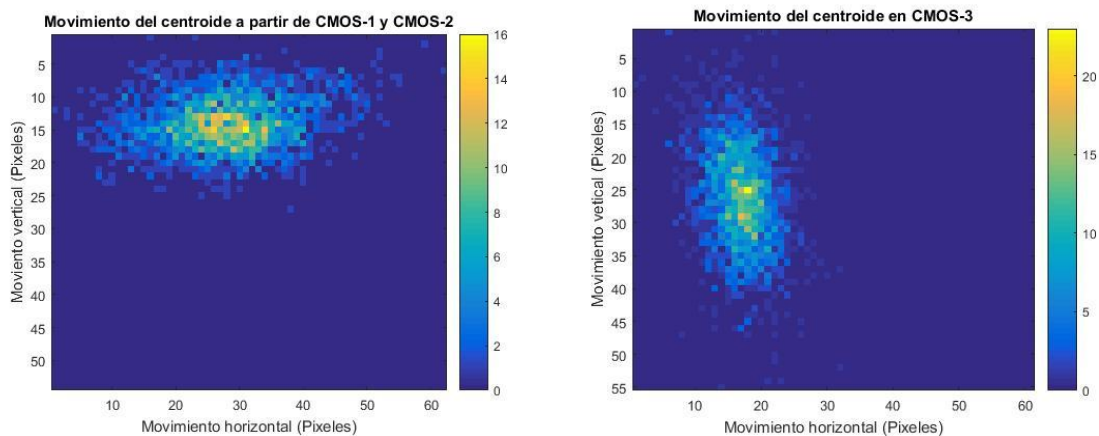


Figura 42. Dispersión del centroide obtenido en la prueba 6. a) A partir de CMOS-1 y CMOS-2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS-3.

En la *Figura 42*, se muestra una distribución en la imagen capturada por la cámara CMOS-3 (derecha), alargada verticalmente con una repetición máxima del centroide de 24 veces, para la imagen estimada desde las cámaras CMOS-1 y CMOS-2 (izquierda) se percibe una distribución más esparcida en el eje horizontal con una repetición máxima 16 veces. Cabe resaltar que en dicha prueba, igual que en la prueba 1, en la cual la cámara CMOS-3 se posicionó a la menor distancia (26,10 m) no se empleó el expansor del haz invertido del montaje experimental de la *Figura 8*, usado para focalizar el spot del haz en la cámara lejana, ya que el spot del haz láser era capturado en su totalidad por el sensor CMOS-3.

De la *Figura 43* a la *Figura 45*, se muestran las fluctuaciones radial, horizontal y vertical del centroide en la prueba 6, respectivamente. En las curvas de color azul, las cuales fueron capturadas por la cámara CMOS-3 el sensor registró un movimiento radial y horizontal mayor con un máximo de 54 pixeles para el caso del movimiento horizontal comparado con un máximo de 22 pixeles en la curva de color rojo. En el caso del movimiento vertical del centroide se encontró un máximo de 58 pixeles para la curva estimada desde las cámaras CMOS-1 y CMOS-2 con respecto al máximo de 31 pixeles medido por el sensor CMOS-3.

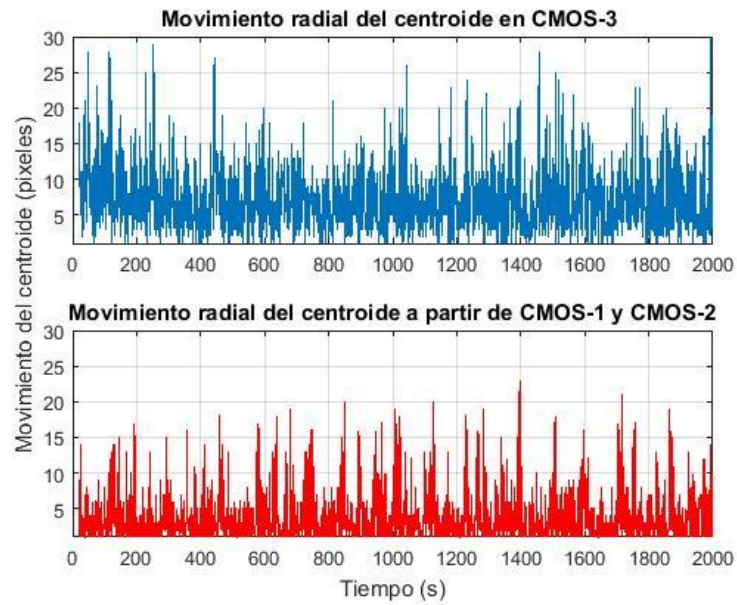


Figura 43. Movimiento radial del centroide obtenido en la prueba 6, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).

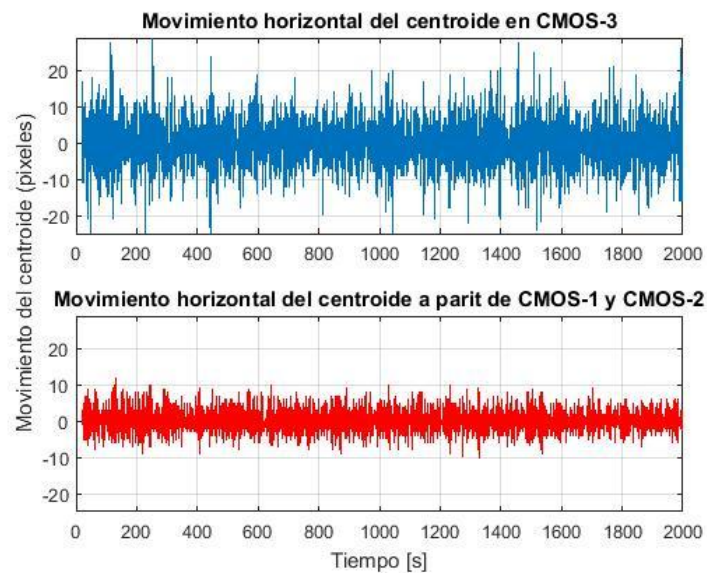


Figura 44. Movimiento horizontal del centroide obtenido en la prueba 6, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).

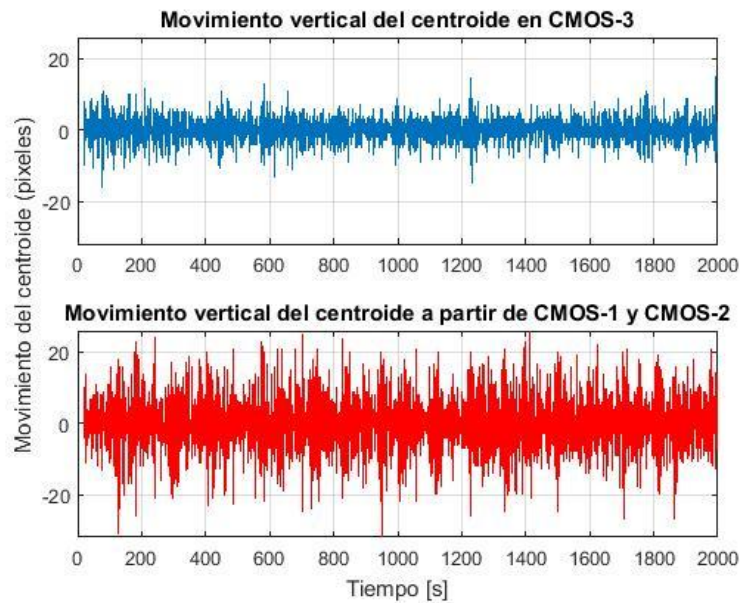


Figura 45. Movimiento vertical del centroide obtenido en la prueba 6, en CMOS-3 (AZUL) y a partir de CMOS-1 y CMOS-2 (ROJO).

De la *Figura 46* a la *Figura 49*, se muestran las variables físicas medidas: humedad, temperatura, presión y flujo del viento, respectivamente y durante la prueba 6 la cual fue realizada entre las 5:22 PM y las 5:32 PM. La humedad experimenta un cambio entre el 67% y el 79% de humedad relativa debido a la disminución rápida en luz solar durante la captura de datos debido al atardecer, y una ligera precipitación que se dio justo antes de empezar la prueba. La temperatura también experimenta un cambio entre 26,5 °C y 29,2 °C por la misma razón. El flujo de aire igualmente tuvo cambios entre 2,8 m/s a un máximo de 3,27 m/s.

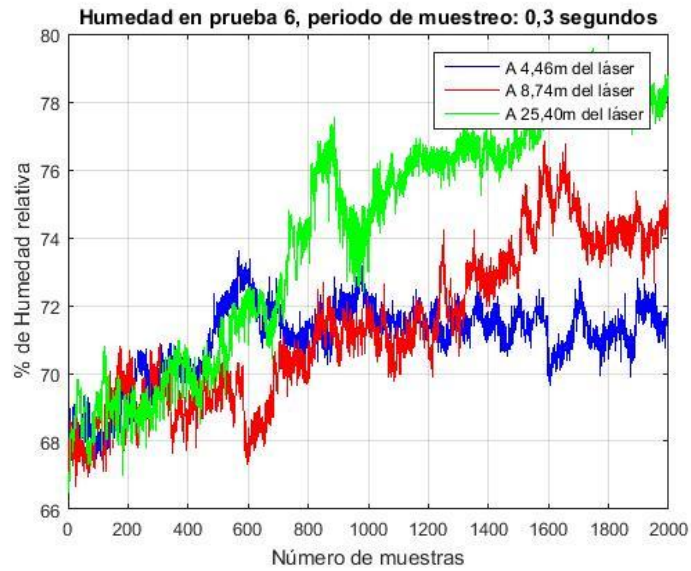


Figura 46. Humedad en la prueba 6. El color indica la distancia medida desde la salida del láser hasta el respectivo sensor.

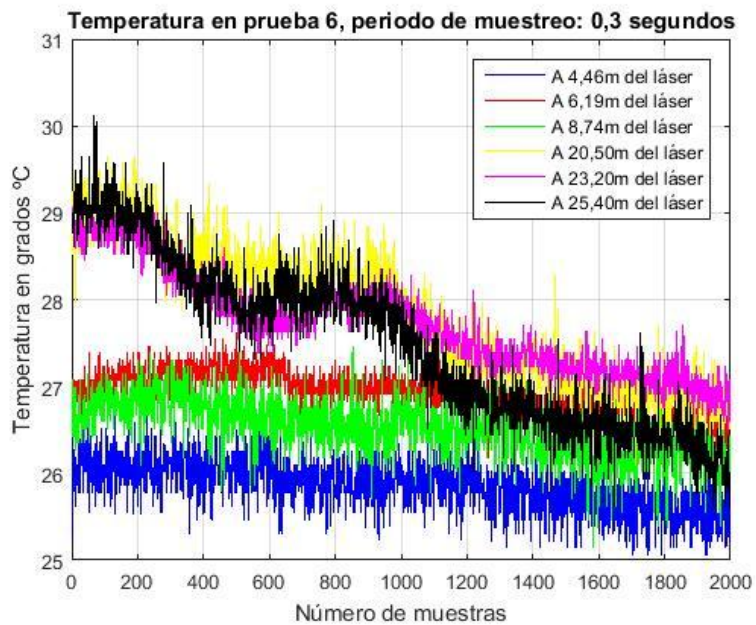


Figura 47. Temperatura en la prueba 6. Cada color indica la distancia medida desde la salida del láser hasta el respectivo sensor.

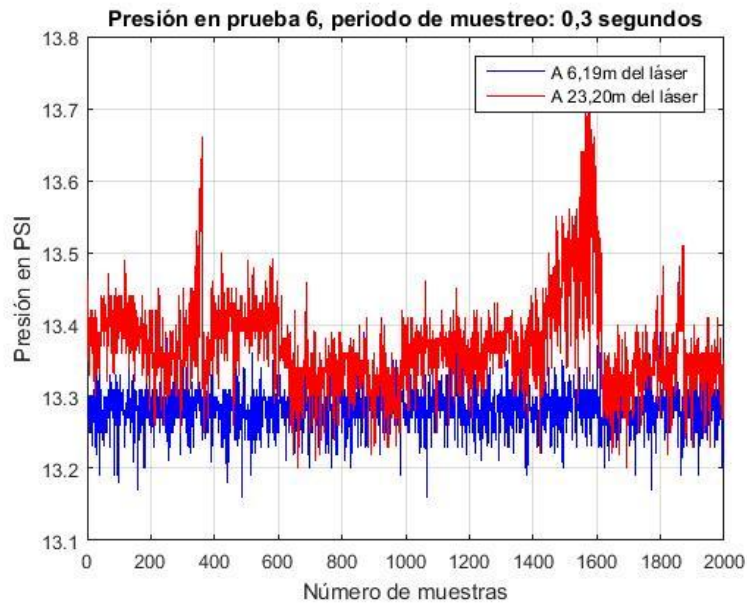


Figura 48. Presión en la prueba 6. a) Presión a 6,19 m de la salida del láser (AZUL). b) Presión a 23,20 m de la salida del láser (ROJO).

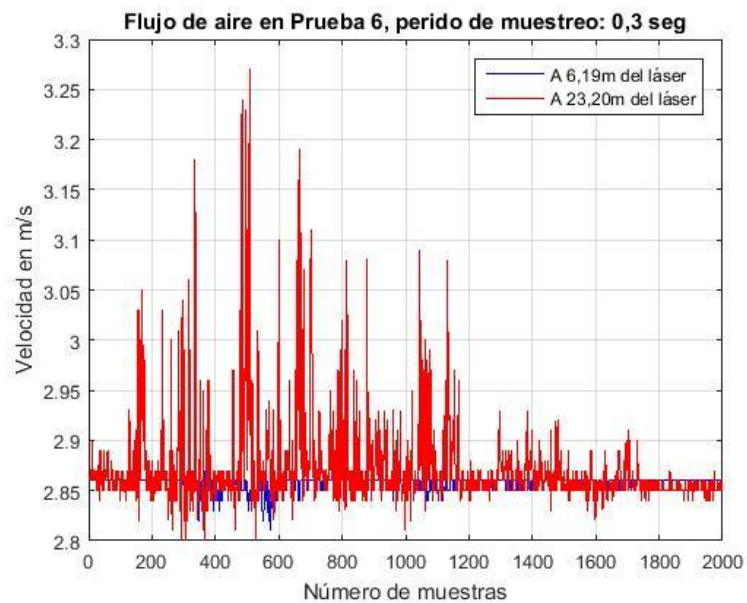


Figura 49. Flujo de aire en la prueba 6. a) Flujo de aire a 6,19 m de la salida del láser (AZUL). b) Flujo de aire a 23,20 m de la salida del láser (ROJO).

De la misma forma que se hizo con cada uno de los experimentos presentados, se analizaron todas las pruebas realizadas, desde la prueba a escala de laboratorio, hasta la última prueba evidenciando lo que ocurre en cada una de ellas. En la Tabla 15, se indican los valores máximos de la fluctuación del centroide para cada una de las pruebas realizadas, obteniendo resultados para desplazamientos radiales, horizontales y verticales. Las distancias máximas de propagación y la hora de adquisición en cada una de las pruebas pueden ser consultadas en la Tabla 12.

Tabla 15

Resultados del centroide para las pruebas realizadas en cada experimento

		Movimiento del centroide (pixeles)					
Pruebas		Radialmente		Horizontalmente		Verticalmente	
		Estimado	Medido	Estimado	Medido	Estimado	Medido
Laboratorio		5	6	16	8	8	11
	Prueba	36	28	22	63	45	27
	1						
Campo	Prueba	24	37	45	68	73	56
	2						
	Prueba	30	58	55	94	86	73
	3						
	Prueba	18	26	33	45	45	36
	4						
	Prueba	22	30	41	56	83	45
	5						

Prueba	19	30	22	54	58	31
6						

De la tabla anterior se puede ver el movimiento del centroide en cada una de las pruebas realizadas en campo en la sede UIS-Guatiguará, en ella se infiere que la prueba 4 la cual fue realizada con el sensor CMOS-3 posicionado a una distancia de 31,66 desde la salida del láser, muestra la distribución más simétrica del frente de onda del haz láser y a su vez el menor movimiento del centroide con solo 8 pixeles de diferencia en el máximo del movimiento radial medido directamente por la cámara CMOS-3 y el estimado a partir de las cámaras CMOS-1 y CMOS-2; y una diferencia de 12 y 9 pixeles entre el máximo del movimiento horizontal y vertical, respectivamente, entre el movimiento medido por el sensor lejano y el estimado a partir de las primeras dos cámaras.

Dicho resultado corresponde a los parámetros ambientales durante la adquisición de los datos, la prueba 4 se realizó desde las 3:18 PM hasta las 3:28 PM, durante el lapso de tiempo variables como la temperatura, la cual tiene un fuerte impacto en el centroide del haz láser, como se demostró en trabajos anteriores (Contreras Lopez, 2016), se encuentra relativamente estable con pequeñas fluctuaciones de máximo 3°C durante el camino de propagación del haz.

En la Tabla 16 se muestra el promedio de la temperatura medido por cada sensor de temperatura posicionados a lo largo del camino de propagación del haz láser, además de la desviación estándar en cada medida para cada una de las pruebas realizadas en campo.

Tabla 16*Promedios y desviación estándar de la temperatura en cada una de las pruebas en camp.*

Temperatura [°C]		Prueba	Prueba	Prueba	Prueba	Prueba	Prueba
		1	2	3	4	5	6
A 4,46	Promedio	28,62	30.40	30.04	27.39	24.64	25.86
[m]	Desv	0,41	0.65	0.51	0.30	0.25	0.29
	Estd						
A 6,19	Promedio	29,72	30.88	30.79	28.06	26.88	26.92
[m]	Desv	0,47	0.69	0.43	0.25	0.17	0.22
	Estd						
A 8,74	Promedio	30,85	32.61	30.89	27.86	26.39	26.52
[m]	Desv	0,54	1.24	0.55	0.34	0.23	0.32
	Estd						
A 20,5	Promedio	33,55	32.26	32.63	28.37	27.54	27.83
[m]	Desv	1,02	1.35	1.30	0.35	0.47	0.78
	Estd						
A 23,2	Promedio	31,34	32.10	32.60	28.40	27.62	27.72
[m]	Desv	0,87	1.02	1.19	0.27	0.39	0.57
	Estd						
A 25,4	Promedio	29,58	29.82	30.83	27.57	27.21	27.49
[m]	Desv	13,26	0.54	0.99	0.27	0.64	0.94
	Estd						

En la Tabla 16, se evidencia la menor variación y mayor estabilidad en la medición de la temperatura para la prueba 4, en ella la máxima desviación estándar fue de 0,35°C para el sensor posicionado a una distancia de 20,5 m, dicho sensor tuvo un promedio de 28,37°C durante la prueba.

De la Tabla 17 a la Tabla 19, se muestran los promedios y la desviación estándar en las mediciones de humedad, presión y flujo del viento respectivamente, en cada una de las pruebas adquiridas en campo. En ellas se percibe una leve variación en las mediciones de presión y flujo del viento con un máximo de 0,06 PSI en la desviación estándar para el sensor de presión ubicado a la distancia de 23,20 m en la prueba 6, en dicha prueba el promedio del sensor fue de 13,37 PSI. También en el caso del flujo de aire la mayor desviación estándar se encontró para el sensor ubicado a la distancia de 23,20 m para la prueba 5 la cual fue de 0,12 m/s, en dicha prueba el sensor de flujo de aire midió 2,91 m/s en promedio.

Tabla 17

Promedios y desviación estándar de la humedad en cada una de las pruebas en campo

Humedad, %Humedad Relativa						
Pruebas	A 4,46[m]		A 8.74[m]		A 25.40 [m]	
	<i>Prom</i>	<i>Desv Estd</i>	<i>Prom</i>	<i>Desv Estd</i>	<i>Prom</i>	<i>Desv Estd</i>
1	61.57	1.71	59.47	2.38	56.93	2.79
2	64.75	3.53	61.65	2.90	61.48	1.57
3	57.73	3.55	56.99	4.43	59.62	3.40
4	71.59	4.67	70.58	4.59	67.85	3.42
5	75.22	3.58	78.08	2.77	71.12	2.29

6	71.01	1.17	71.37	2.30	74.24	3.52
----------	-------	------	-------	------	-------	------

Tabla 18*Promedios y desviación estándar de la presión en cada una de las pruebas en campo*

Presión [PSI]				
Pruebas	A 6.19[m]		A 23.20[m]	
	Prom	Desv Estd	Prom	Desv Estd
1	13.26	0.02	13.52	0.04
2	13.18	0.03	13.35	0.03
3	13.25	0.02	13.33	0.03
4	13.05	0.03	13.25	0.03
5	13.20	0.03	13.40	0.04
6	13.28	0.02	13.37	0.06

Tabla 19*Promedios y desviación estándar del flujo de aire en cada una de las pruebas en campo*

Flujo de Aire [m/s]				
Pruebas	A 6.19[m]		A 23.20[m]	
	Prom	Desv Estd	Prom	Desv Estd
1	2.85	0.009	2.81	0.06
2	2.85	0.01	2.87	0.07

3	2.85	0.009	2.86	0.05
4	2.84	0.02	2.84	0.07
5	2.85	0.01	2.91	0.12
6	2.85	0.005	2.87	0.04

En el caso de la humedad se percibe una mayor variación en cada una de las pruebas realizadas debido a la sensibilidad del sensor a las condiciones ambientales a las que fue expuesto y dada la alta humedad al mediodía el día de las mediciones. La mayor desviación estándar encontrada fue de 4,59%HR para el sensor de humedad ubicado a 8,74 m en la prueba 4, dicho sensor tuvo un promedio de 70,58% de humedad relativa para ésta prueba.

3.4.3 Función estructura. La turbulencia atmosférica es un proceso no estacionario porque su valor medio varía constantemente en el tiempo. Por tanto, se hace necesario usar una expresión para interpretar las fluctuaciones y los incrementos estacionarios. Para ello se usa la función estructura (Funes, 2011).

$$D_x(k_i) = \langle [x(k_i) - \langle x(k_i) \rangle]^2 \rangle \quad (1)$$

A fin de analizar las fluctuaciones del centroide se calculó la función estructura para cada una de las pruebas realizadas en laboratorio y en campo, a las imágenes capturadas por la tercera cámara CMOS-3. Cada una de las gráficas posee ventanas de 10 muestras. Se inicia analizando la prueba en laboratorio.

En la *Figura 50* se puede observar el resultado de las fluctuaciones del centroide horizontal, vertical y radialmente en la prueba a escala de laboratorio, a partir de la función estructura. Se

observa que las fluctuaciones del centroide son muy pequeñas debido a que la prueba fue realizada sin alteración de las condiciones ambientales.

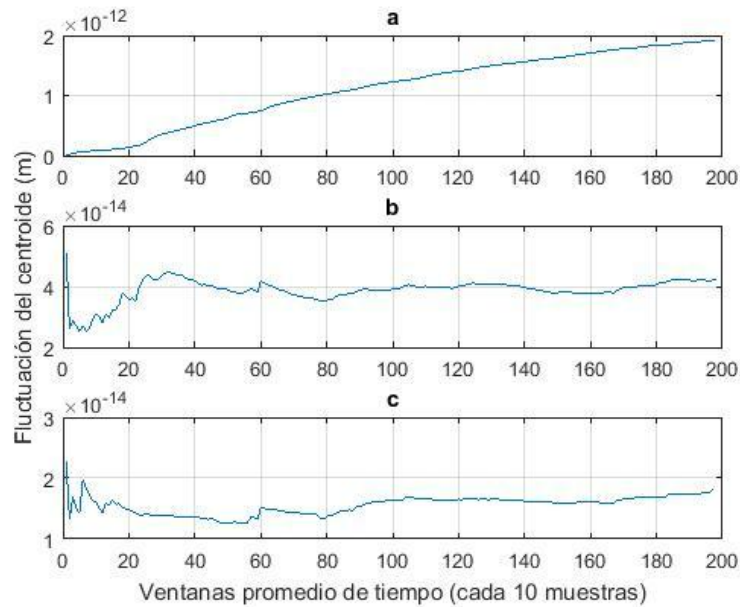


Figura 50. Función estructura del movimiento del centroide en la prueba en laboratorio. a) Horizontal b) Vertical. c) Radial.

De la *Figura 51* a la *Figura 53*, se muestran las fluctuaciones máximas del centroide horizontal, vertical y radialmente para las pruebas 3, 4 y 6, respectivamente. En ellas se perciben fluctuaciones mayores comparadas con la prueba a escala de laboratorio, dadas las variaciones en las variables físicas ambientales en cada experimento a campo abierto.

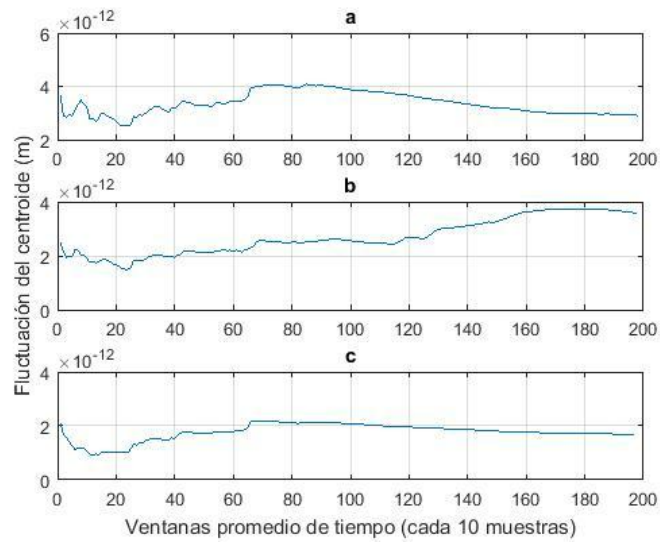


Figura 51. Función estructura del movimiento del centroide en la prueba 3. a) Horizontal b) Vertical. c) Radial.

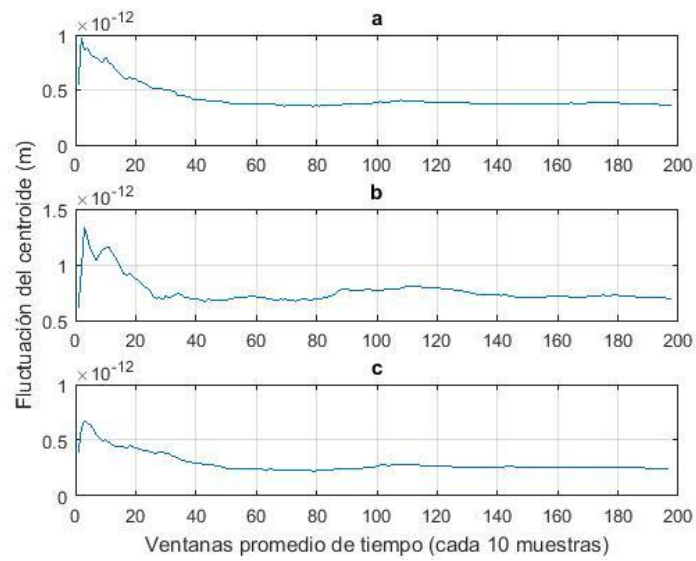


Figura 52. Función estructura del movimiento del centroide en la prueba 4. a) Horizontal b) Vertical. c) Radial.

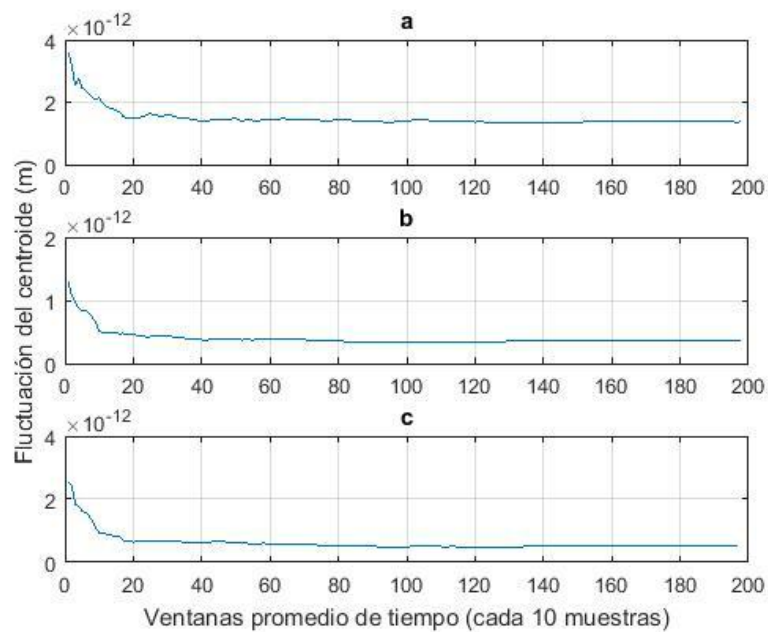


Figura 53. Función estructura del movimiento del centroide en la prueba 6. a) Horizontal b) Vertical. c) Radial.

A partir de la información obtenida al calcular la función estructura en cada una de las pruebas realizadas, se observa que las pruebas con una mayor fluctuación en el centroide corresponden a la etiquetada como prueba 3 y como prueba 5, las cuales cuentan con la mayor distancia de propagación, 39,56 m. A su vez también se percibe una fuerte fluctuación en la prueba 2 la cual fue adquirida a la máxima temperatura, por las condiciones ambientales bajo la cual fue conducida. Además, de las fluctuaciones que sufrió esta variable física, cabe señalar que la rapidez del aire experimentó grandes cambios como se puede deducir de los datos presentados en la Tabla 19.

Tabla 20*Máxima fluctuación del centroide en todas las pruebas*

Pruebas	Fluctuaciones del centroide ($m^{-2/3}$)		
	Horizontal	Vertical	Radial
Prueba Laboratorio	1,9137e-12	5,0986e-14	2,2604e-14
Prueba 1	3,6063e-12	1,2832e-12	2,5220e-12
Prueba 2	4,3751e-12	2,9172e-12	2,8058e-12
Prueba 3	4,8111e-12	3,7410e-12	2,8378e-12
Prueba 4	9,7392e-13	1,3356e-13	6,7359e-13
Prueba 5	7,8814e-12	2,7434e-12	6,8515e-12
Prueba 6	3,6062e-12	1,2832e-12	2,5220e-12

4. Conclusiones y observaciones

- En el presente trabajo de grado, se analizó el comportamiento de la desviación de un haz láser al ser propagado por un medio turbulento en campo abierto; con variables físicas gobernadas por las condiciones ambientales a diferentes horas del día. Se estiman los efectos intracavidad del láser y se miden los efectos de la turbulencia atmosférica a diferentes distancias horizontales de propagación y a ras del piso.

- Se diseñó e implementó un prototipo de hardware, alimentado con baterías, capaz de realizar mediciones de temperatura, humedad, presión y flujo del aire. Almacena los datos en una plataforma de demostración y desarrollo STM32F746G – Discovery. Además de emplear dicho microcontrolador para la adquisición de las variables físicas atmosféricas, se realizó el procesamiento de las mismas basado en el desarrollo de un algoritmo en lenguaje C capaz de medir en tiempo real todas las variables anteriormente descritas y mostrarlas en una pantalla LCD-TFT de 4.3 pulgadas incluida en la misma plataforma para su mejor verificación y manejo.
- Para cada una de las pruebas realizadas se utilizó un periodo de muestreo de 0,3 segundos, garantizando que cada imagen obtenida por los sensores CMOS se corresponde con mediciones estadísticamente independientes de temperatura, humedad, presión y flujo de aire. Los respectivos sensores de dichas variables físicas, son ubicados a lo largo del camino de propagación del haz láser. En la sincronización de la adquisición de los datos, se encontró un máximo de 55,21 ms de diferencia temporal entre los sensores, lo cual garantiza que los datos obtenidos cumplen con la hipótesis de atmósfera congelada de Taylor.
- Para cada prueba se realizó un estimado de la posición del centroide a la misma distancia donde se colocó la cámara CMOS-3, dicha estimación incluye esencialmente los efectos producidos en la intracavidad del láser. El sensor CMOS-3 registra los efectos reales de ésta y los producidos por la turbulencia atmosférica. En el caso de la prueba a escala de laboratorio, en la cual se mantuvieron constantes los parámetros ambientales, se encontró un máximo de fluctuación de cuatro pixeles a lo largo del radio, lo cual se asemeja a los cinco pixeles como máximo en el movimiento radial medido por la cámara CMOS-3. Dada

la precisión de un sensor matricial (la cual es de un pixel) se concluye que el comportamiento del centroide en ausencia de un medio turbulento, así sea la turbulencia muy débil, se comporta de manera similar tanto en la estimación como en la medición.

- Si se comparan las primeras tres pruebas en campo abierto, en las cuales se contó con condiciones ambientales similares, y ya que en cada una de las mismas se incrementó la distancia a la cual se posicionó la cámara CMOS-3, que se percibe una mayor dispersión del centroide a medida que aumenta la distancia de propagación del láser, como se puede ver en la Tabla 15. La máxima fluctuación del movimiento radial del centroide aumentó en 30 pixeles entre la prueba 1 a la distancia de 26,10 m y la prueba 3 a la distancia de 39,56 m. Por otra parte, la máxima fluctuación del movimiento horizontal incremento en 31 pixeles de la prueba 1 a la prueba 3.
- Para el segundo bloque de pruebas, (prueba 4, 5 y 6), la menor dispersión y movimiento del centroide se encuentra en los resultados de la prueba 4. Dichos resultados están correlacionados con una menor fluctuación en las variables de temperatura y flujo del viento como se puede inferir de las Tablas 16 y 19, respectivamente. De la misma manera, se corroboró este resultado en la Tabla 20, en la que se percibe un mínimo en la función estructura de las fluctuaciones horizontales máximas del centroide en $9,7392e-13 [m^{(-2)3}]$. De ahí se concluye el efecto distorsionador del medio circundante sobre el haz propagado, es decir que, en condiciones estables del ambiente se percibe una dispersión y movimiento del centroide menor comparado con un medio fuertemente influenciado por las fluctuaciones en su temperatura y el flujo de aire.
- Utilizando la función estructura se analizaron las fluctuaciones máximas del centroide en ventanas de tiempo para una mejor comprensión del comportamiento del medio

atmosférico. En este análisis se pudo observar que las fluctuaciones se incrementan a medida que la distancia de propagación aumenta cuando se mantienen similares las condiciones ambientales como se puede percibir en la Tabla 20. Se encontró un incremento en las fluctuaciones máximas horizontales del centroide en $1,2048e-12$ [$m^{(-2)/3}$] entre la prueba 1 y la prueba 3, cuando se incrementó 13,46 m la posición del sensor CMOS-3, es decir la distancia de propagación del haz láser. De la misma manera se percibió un incremento de $2,4578e-12$ y $0,3158e-09$ en las fluctuaciones máximas del centroide vertical y radial, respectivamente, bajo el mismo escenario.

Referencias bibliográficas

- Andrews, L. C., Phillips, R. L., Sasiela, R. J., & Parenti, R. (2005). Beam wander effects on the scintillation index of a focused beam. In C. Y. Young & G. C. Gilbreath (Eds.) (p. 28). <https://doi.org/10.1117/12.604855>
- Asociados, M. & M. (2008). La Guía MetAs Sensores de humedad tipos y aplicaciones, 12. Retrieved from <http://www.metas.com.mx/guiamet/la-guia-metas-08-05-sensores-de-humedad.pdf>
- Bååk, T. (1969). Thermal Coefficient of Refractive Index of Optical Glasses*. *Journal of the Optical Society of America*, 59(7), 851. <https://doi.org/10.1364/JOSA.59.000851>
- Bharmal, N. A. (2015). Frozen flow or not? Investigating the predictability of the atmosphere. *Journal of Physics: Conference Series*, 595(1), 12003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/595/1/012003>
- Coherent. (2011). Verdi Family: Lasers, Diode-pumped Solid-state Output, High-power C W, 7–8.
- Contreras Lopez, 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*. Universidad Industrial de Santander.
- Dios, F., Rubio, J. A., Rodríguez, A., & Comerón, A. (2004). Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink. *Applied Optics*, 43(19), 3866–73.

<https://doi.org/10.1364/AO.43.003866>

Dischner, Z. (2015). Cómo funciona el sensor de una cámara digital. Retrieved from <http://quecamarareflex.com/como-funciona-el-sensor-de-una-camara-digital/>

Elementos y equipos electricos: sensores de temperatura. (n.d.), 160. Retrieved from http://www.efn.uncor.edu/departamentos/electrotecnia/cat/eye_archivos/apuntes/a_practico/Cap 6 Pco.pdf

EO-1312C 1/1.8" CMOS Color USB Camera | Edmund Optics. (n.d.). Retrieved July 15, 2017, from <https://www.edmundoptics.com/cameras/usb-cameras/eo-1312c-11.8-cmos-color-usb-camera/#specs>

Fernández, B. A., Tobalina, I. A., Varillas, R. B., & Salazar, A. C. (2010). *El láser, la luz de nuestro tiempo*. (B. Alonso Fernández, R. Borrego Varillas, C. Hernández García, J. A. Pérez Hernández, & C. Romero Vázquez, Eds.), *El láser, la luz de nuestro tiempo*. Salamanca. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Freire, A. P. S., Ilha, A., & Colaço, M. J. (n.d.). Turbulência. Retrieved from <http://www.turbulencia.coppe.ufrj.br/publicacoes/turbulencia-tomo1-capt7.pdf>

Freud, S. (1979). Capítulo VII. Sensores. *La Identificación” En Obras Completas Psicología de ...*, 108–136. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:CAPITULO+VII#8>

Funes, G. (2011). *Determinación de la constante de estructura del aire turbulento mediante interferometría Young*. Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional de la Plata.

Hawkes, P. W. (1978). *Digital image processing*. *Nature* (Vol. 272). Prentice Hall.

<https://doi.org/10.1038/272740a0>

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*. Universidad Industrial de Santander.

Honeywell. (2016). Honeywell Zephyr™ Digital Airflow Sensors: HAF Series—High Accuracy 10 SLPM, 15 SLPM, 20 SLPM, 50 SLPM, 100 SLPM, 200 SLPM or 300 SLPM Datasheet, 16. Retrieved from http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=144883

Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. Facultad de Ingeniería Eléctrica., P., Martín Rodríguez, E., Loredó-Souza, A., & Camano Schettini, E. B. (2014). *Ingeniería electrónica, automática y comunicaciones. Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* (Vol. 35). Facultad de Ingeniería Eléctrica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282014000100007

Ishimaru, A. (1981). Theory Of Optical Propagation In The Atmosphere. *Optical Engineering*, 20(1), 200163. <https://doi.org/10.1117/12.7972665>

Kouro, S. (2001). Sensores De Humedad. *Departamento de Electrónica*, 25. Retrieved from [http://ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca Internet/Articulos Tecnicos de Consulta/Instalaciones Electricas Industriales/Sensores de Humedad.pdf](http://ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Articulos%20Tecnicos%20de%20Consulta/Instalaciones%20Electricas%20Industriales/Sensores%20de%20Humedad.pdf)

Licchelli, D. (n.d.). The transit of Venus and the Black Drop Effect. *Suppl*, 6. Retrieved from http://adsbit.harvard.edu/cgi-bin/nph-article_query?2005MSAIS...6...17L&defaultprint=YES&filetype=.pdf

Malacara Hernández, D. (2002). *Optica tradicional y moderna*. Fondo de Cultura Económica.

Retrieved from

https://books.google.com.co/books/about/Óptica_tradicional_y_moderna.html?id=03zyPAAACAAJ&redir_esc=y&hl=es-419

Marshall, G., & Stutz, G. (2011). Handbook of Optical and Laser Scanning, Performance, and

Design. *Handbook of Optical and Laser Scanning, Second Edition, 20112767*, 247–279.

<https://doi.org/10.1201/b11090>

Martinez Morillo, M., Pastor Vega, J. M., & Sendra Portero, F. (1998). Láser. *Manual de Medicina*

Fisica.

Mphacu, T. (2011). Freescale Semiconductor High Temperature Accuracy Integrated Silicon

Pressure Sensor for Measuring Absolute Pressure , On-Chip Signal Conditioned , Temperature Compensated and Calibrated MP3H6115A. *High Temperature*, 2006–2009.

Retrieved from <http://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPXHZ6250A.pdf>

PAC-Performance-centered Adaptive Curriculum for Employment Needs Programa ERASMUS:

Acción Multilateral -517742-LLP-1-2011-1-BG-ERASMUS-ECUE Contenido. (n.d.).

Retrieved from

http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_IS_E5_3_1.pdf

Rincón Correa, J. O., & Hernandez Quintero, J. S. (2016). *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.

Ruido y Filtrado. (2015). Retrieved from

<http://www.dc.uba.ar/materias/t1/2015/c2/archivos/ClaseRuidoFiltrado2C2015.pdf>

Ruiz Fernández, nombre, & Ángel, L. (n.d.). La transformada de Fourier. Aplicación al filtrado de imágenes. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68301/Ruiz - La transformada de Fourier. Aplicación al filtrado de imágenes.pdf?sequence=1>

Self-heating, L., & Output, L. I. (2013). LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors, (November), 1–13. Retrieved from <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>

Shirai, T., Dogariu, A., & Wolf, E. (2003). Mode analysis of spreading of partially coherent beams propagating through atmospheric turbulence. *Journal of the Optical Society of America A*, 20(6), 1094. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.20.001094>

Sierra Pinzón, 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 baja alturas*. Universidad Industrial de Santander.

Specialties, M. (2012). HTS2030SMD – Temperature and Relative Humidity Sensor, 1–10. Retrieved from <http://www.meas-spec.com/downloads/HTS2030SMD.pdf>

Spectra-Physics. (n.d.). Model 107B/Model 127 25 or 35 mW HELIUM-NEON LASERS. *Spectra-Physics*, 4. Retrieved from http://www.asi-team.com/asi_team/brookhaven/35mW-Laser.pdf

ST. (2015). UM1907 User manual Discovery kit for STM32F7 Series with STM32F746NG MCU. *St*, (June 2015), 1–46. Retrieved from http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/f0/14/c1/b9/95/6d/40/4d/DM00190424.pdf/files/DM00190424.pdf/jcr:content/translations/en.DM00190424.p

df

Tatarskiĭ, V. I. (Valer'ian I., & Silverman, R. A. (n.d.). *Wave propagation in a turbulent medium*.

Tíjaro Rojas, O. J., Galeano Traslaviña, Y. A., & Torres Moreno, Y. (2016). Simple method to measure effects of horizontal atmospheric turbulence at ground level. In A. M. J. van Eijk, C. C. Davis, & S. M. Hammel (Eds.) (p. 99790P). <https://doi.org/10.1117/12.2238045>

Volumetric, F., & Pstd Tstd Tm Flow Volumetric, P. Q. (2001). Standard Flow Rate Vs. Volumetric Flow Rate, (December), 3–4. Retrieved from http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Application_Notes/GenPurp-Standard_vs_Volumetric.pdf

Xatakafoto. (2009). Sensores con tecnología CCD vs CMOS. Retrieved from <http://www.xatakafoto.com/camaras/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos>

Apéndices

Apéndice A. Sensores

En este Apéndice se muestran en detalle los sensores empleados para la ejecución del proyecto.

Sensor de Humedad. Se empleó el sensor de humedad capacitivo HTS2030SMD el cual permite medir la humedad relativa usando la variación de una capacitancia interna como se muestra en la Figura 54, la cual muestra el comportamiento de dicha cantidad en función de la humedad relativa

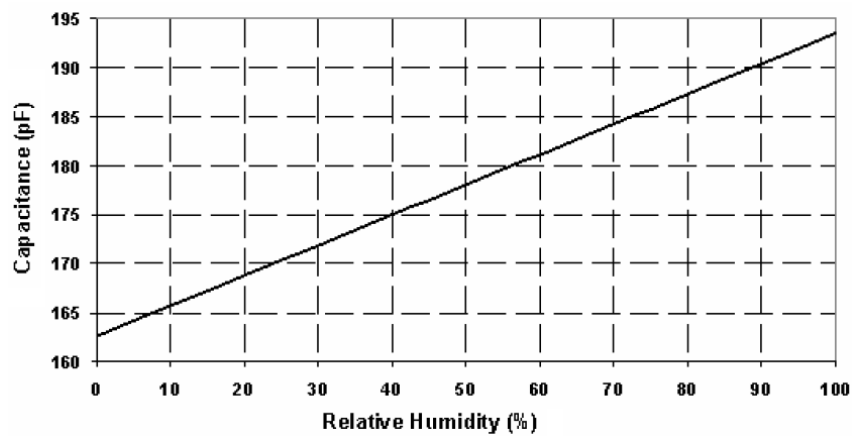


Figura 54. Relación humedad vs. Capacitancia, adaptado de (Specialties, 2012).

RH (%)	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Fout	6600	6550	6500	6450	6400	6350	6305	6260	6210	-
(Hz)										

Acople Electrónico. Una vez realizado el circuito oscilador propuesto en la hoja de datos del sensor HTS2030SMD, se implementaron 4 etapas más como se aprecia en la Figura 56, para así poder lograr la adquisición de datos mediante el microcontrolador STM32F7.

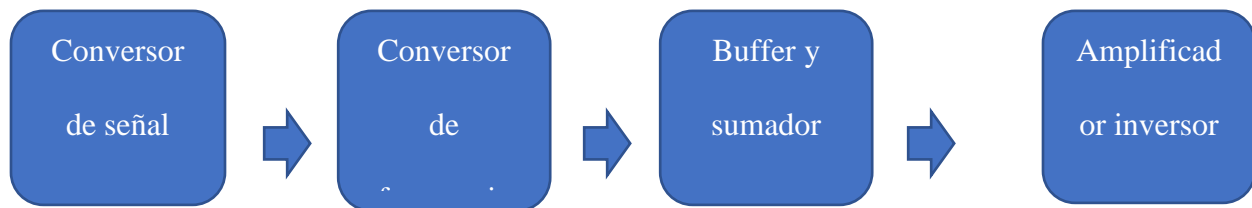


Figura 56. Etapas de acople electrónico

Estas etapas fueron diseñadas en un trabajo previo y son descritas específicamente en (Herreño Vanegas & Villamizar Conde, 2016).

Sensado de la velocidad del Aire. Las velocidades y fluctuaciones de flujos se pueden medir utilizando diferentes metodologías, como pueden ser: anemometría de hilo caliente, velocimetría por imagen de partículas (PIV) o anemometría laser-Doppler (LDA). El método de la anemometría de hilo caliente es la más utilizada para las mediciones de la turbulencia en flujos por ser la más

económica y por presentar un alta respuesta en frecuencia (Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. Facultad de Ingeniería Eléctrica., Martín Rodríguez, Loredou-Souza, & Camano Schettini, 2014). Un anemómetro de hilo caliente consiste en un filamento calentado que queda expuesto al paso de un flujo. Este filamento se encuentra conectado a un circuito eléctrico que es capaz de monitorear las variaciones de resistencia eléctrica por la acción del flujo. Entonces, se puede establecer una relación entre la velocidad del flujo y la resistencia observada en el filamento calentado (Freire, Ilha, & Colaço, n.d.).

Se decidió utilizar un sensor de flujo de aire, el cual determina la velocidad con la que el aire atraviesa un área determinada. El tipo de sensor utilizado en la práctica fue un sensor de flujo de aire por micropuente, el cual funciona basado en la teoría de transferencia de calor. El flujo de aire es dirigido a través de la superficie de los elementos de detección. El voltaje de salida del sensor varía en relación con el flujo de aire u otros gases a través de los puertos de entrada y salida, la carcasa dirige y controla con precisión el flujo de aire a través del elemento de detección de la microestructura (Honeywell, 2016).

El sensor de flujo por micropuente utilizado es el Honeywell Zephyr de la serie HAF (High Accuracy), tal y como se muestra en la *Figura 57*, y fue manipulado para medir el flujo de aire en la dirección de propagación del haz láser en cada una de las pruebas experimentales realizada en la sede UIS – Guatiguará.

Después de realizada la programación y obtener la salida digitalizada del sensor se realizó un arreglo matemático de manera que sea posible obtener la velocidad del aire circulando en el medio circundante al haz láser en unidades de metros por segundo. De esta manera se aplican algunas ecuaciones de conversión.

Tabla 22*Ecuaciones de conversión de litros por segundo a metros por segundo****Conversión de litros por segundo (SLMP) a metros por segundo (m/s)***

<i>Litros por segundo (SLMP)</i>	<i>Litros por minuto estándar (LPM) a metros cúbicos por segundo (m³/s)</i>	<i>Metros cúbicos por segundo (m³/s) a metros por segundo (m/s)</i>
----------------------------------	--	--

$$LPM = SLPM * \frac{P_s * T_x}{P_x * T_s}$$

Donde

Ps: Presión atmosférica estándar.

Px: Presión atmosférica del medio.

Ts: Temperatura estándar.

Tx: Temperatura del medio.

$$Q = LPM * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{1Min}{60s}$$

Donde:

L: Litros.

Min: Minutos.

Q: Flujo volumétrico en m³/S.

$$U = \frac{Q}{A}$$

Donde:

U: Velocidad en m/s.

A: Área transversal del sensor de flujo.

Sensado de presión. Adicional a las demás variables adquiridas en la prueba, también se midió la presión del medio en cada uno de los test realizados, para ello se hizo uso del sensor de presión MPXHZ6250A de Freescale Semiconductor debido a su alta precisión. El sensor MPXHZ6250A integra en el chip amplificadores operacionales bipolares y redes de resistencia de película delgada para proporcionar una señal de salida alta y compensada en temperatura. En la *Figura 58*, se puede apreciar el sensor de presión utilizado.



Figura 58. Sensor de presión MPXHZ6250A de Freescale Semiconductor, adaptado de (Mphacu, 2011).

Sensores de tecnología CMOS. En los sensores CMOS (del inglés, Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) cada celda incluye un fotodiodo que convierte la luz en movimiento de cargas eléctricas. Además, incluye la electrónica necesaria para que cada elemento funcione de manera independiente y poder leer la información de cada pixel cada vez que se realiza una toma de imagen. Las celdas solo pueden detectar la intensidad de la luz, no el color, por lo que incorporan filtros denominados mosaico de Bayer, los cuales transmiten la luz en tres componentes: rojo, verde y azul, de tal forma que unas celdas reciben solo la luz correspondiente a la componente roja, otras solo a la componente azul y otras solo a la componente verde (Dischner, 2015). En la *Figura 59* se aprecia la conformación del sensor CMOS.

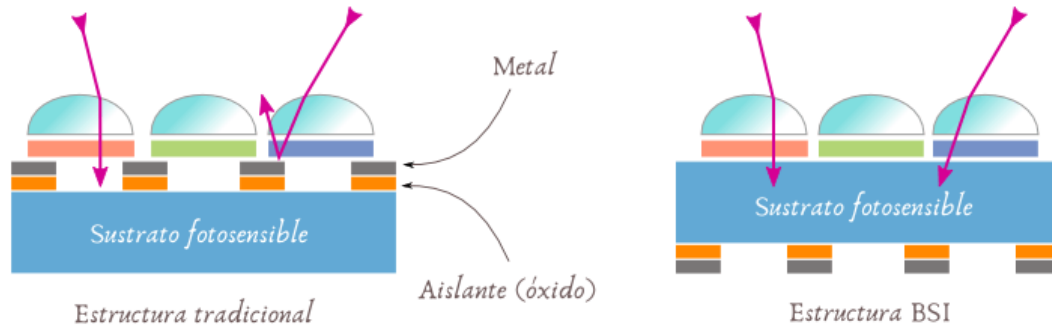


Figura 59. Fabricación de sensores de imagen basados en tecnología CMOS, adaptado de (Dischner, 2015).

Apéndice B. Diseños en Eagle™ del módulo de humedad y circuito de sensado de las variables atmosféricas

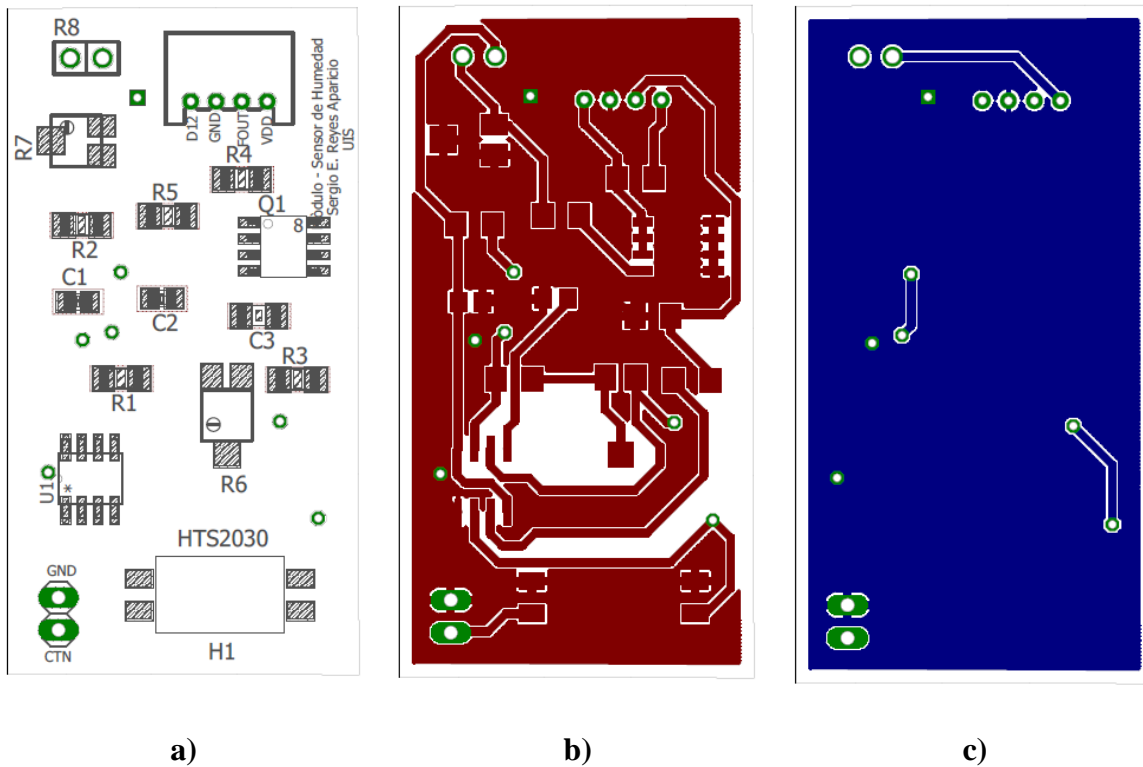


Figura 60. Diseño en Eagle del módulo de Humedad. a) Capa de nombres y elementos. b) Capa superior. c) Capa inferior

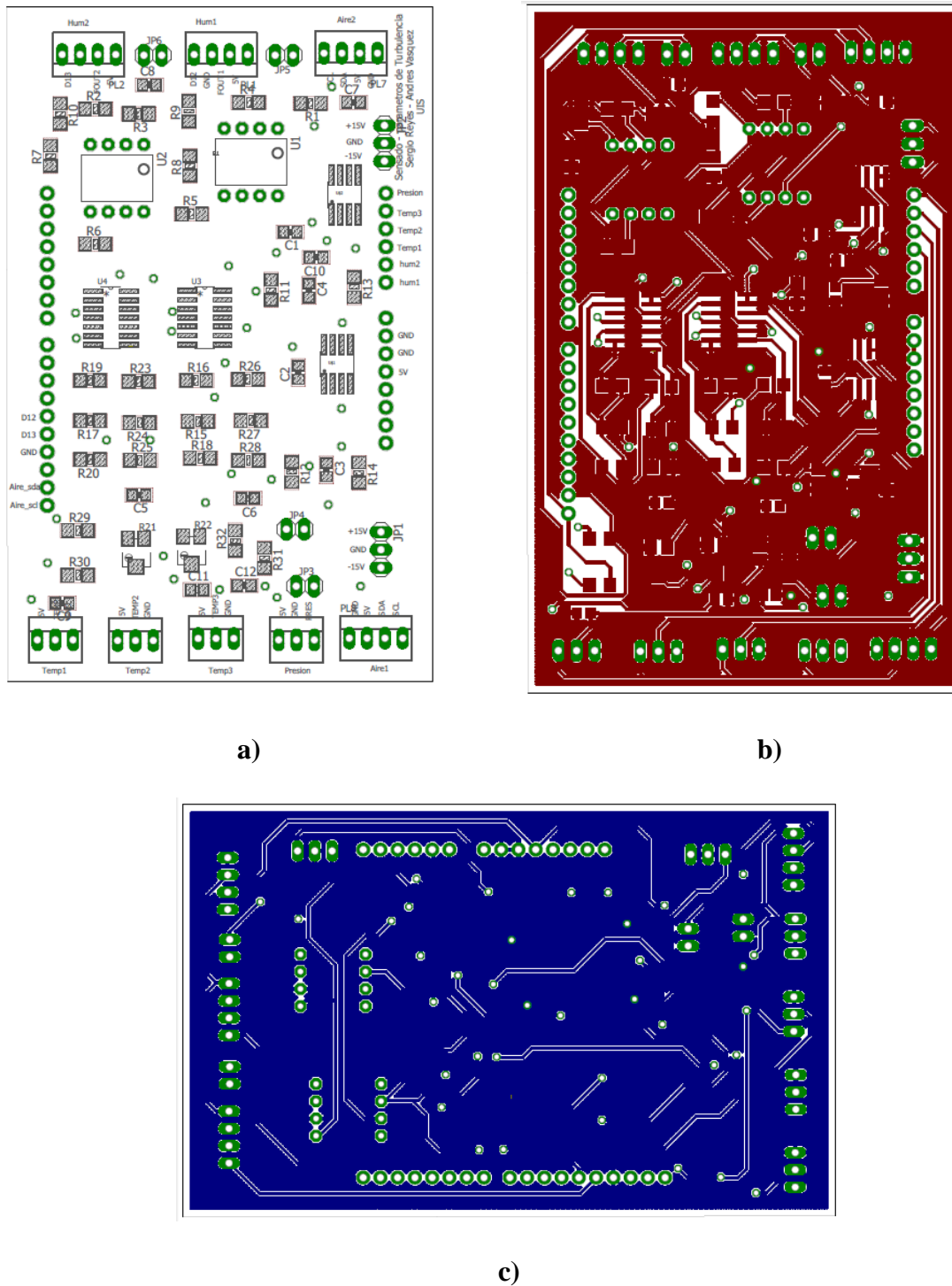


Figura 61. Diseño en Eagle de circuito de sensado de variables atmosféricas. a) Capa de nombres y elementos b) Capa superior c) Capa inferior

Apéndice C. Código de adquisición de variables atmosféricas en uVisión

```
con--;
```

```
HAL_ADC_Start(&hadc3);
```

```
ADCValue=HAL_ADC_GetValue(&hadc3);
```

```
Temperatura1 = ((330*ADCValue)/4096.00);
```

```
sprintf(buffer1,"TEMP1 = %1.2f\t", Temperatura1);
```

```
printf("Temperatura1: %f\t", Temperatura1);
```

```
HAL_ADC_Start(&hadc3);
```

```
ADCValue=HAL_ADC_GetValue(&hadc3);
```

```
Temperatura2 = ((330*ADCValue)/4096.00);
```

```
sprintf(buffer2,"TEMP2 = %1.2f\t", Temperatura2);
```

```
printf("Temperatura2: %f\t", Temperatura2);
```

```
HAL_ADC_Start(&hadc3);
```

```
ADCValue=HAL_ADC_GetValue(&hadc3);
```

```
Temperatura3 = ((330*ADCValue)/4096.00);
```

```
sprintf(buffer3,"TEMP3 = %1.2f\t", Temperatura3);
```

```
printf("Temperatura3: %f\t\t", Temperatura3);
```

```
HAL_ADC_Start(&hadc3);
```

```
ADCValue=HAL_ADC_GetValue(&hadc3);
```

```
valor4= ((5*ADCValue)/4096.00);
```

```
freq=(valor4*valor4*(float)(-4.4944))+(float)280.53*valor4+(float)5978.6; //Frecuencia
```

```
Humedad1=((float)0.000000012158222*(freq*freq*freq))-
```

```
((float)0.000219300921059*(freq*freq))          +((float)1.20941831786789*(freq))          -
```

```
(float)1869.82713712457;
```

```
sprintf(buffer4,"HUM1 = %1.2f\t", Humedad1);
```

```
printf("Humedad1: %f\t\t", Humedad1);
```

```
HAL_ADC_Start(&hadc3);
```

```
ADCValue=HAL_ADC_GetValue(&hadc3);
```

```
valor5 = ((5*ADCValue)/4096.00);
```

```
freq2=(valor5*valor5*(float)(-4.4944))+(float)280.53*valor5+(float)5978.6; //Frecuencia
```

```
Humedad2=((float)0.000000012158222*(freq2*freq2*freq2))-  
((float)0.000219300921059*(freq2*freq2))      +((float)1.20941831786789*(freq2))      -  
(float)1869.82713712457;  
  
sprintf(buffer5,"HUM2 = %1.2f\t", Humedad2);  
  
printf("Humedad2: %f\t\t", Humedad2);  
  
  
HAL_ADC_Start(&hadc3);  
  
ADCValue=HAL_ADC_GetValue(&hadc3);  
  
opr = ((3.3*ADCValue)/4096.00);  
  
Presion=(opr*(float)7.5642)+(float)1.5463;  
  
sprintf(buffer6,"PRE = %1.2f\t", Presion);  
  
printf("Presion: %f\t\t", Presion);  
  
  
HAL_I2C_Init(&hi2c1);  
  
    cmd[0]=0;  
  
    cmd[1]=0x00;  
  
HAL_I2C_Master_Transmit(&hi2c1,0x49<<1,cmd,2,1000);  
  
HAL_I2C_Master_Receive(&hi2c1,0x49<<1,cmd_1,2,1000);  
  
    int16_t a= cmd_1[0]<<8|cmd_1[1];
```

```
    flujo = 49.9*(((float)a/16383.0)-0.099)/0.79;

    float lpm = flujo*presion*temp;

    float m3s = lpm/60000;

    float ms = m3s/area;

    float velocidad = (1.5446*ms)+2.836;

    i+=1;

    sprintf(buffer7,"AIRE1 = %1.2f\t", velocidad);

    printf("Flujo_aire: %1.2f\t\t\n", velocidad);

    BSP_LCD_DisplayStringAt(0, LINE(12), (uint8_t*)buffer1, LEFT_MODE);

    BSP_LCD_DisplayStringAt(0, LINE(13), (uint8_t*)buffer2, LEFT_MODE);

    BSP_LCD_DisplayStringAt(0, LINE(14), (uint8_t*)buffer3, LEFT_MODE);

    BSP_LCD_DisplayStringAt(0, LINE(15), (uint8_t*)buffer4, LEFT_MODE);

    BSP_LCD_DisplayStringAt(0, LINE(12), (uint8_t*)buffer5, RIGHT_MODE);

    BSP_LCD_DisplayStringAt(0, LINE(13), (uint8_t*)buffer6, RIGHT_MODE);

    BSP_LCD_DisplayStringAt(0, LINE(14), (uint8_t*)buffer7, RIGHT_MODE);

    BSP_LCD_DisplayStringAt(0, LINE(15), (uint8_t*)buffer8, RIGHT_MODE);
```

```
    buffer7[13]='\n';

res1 = f_write(&Datos,buffer1,20,(void *)&byteswritten);

res2 = f_write(&Datos,buffer2,20,&byteswritten);

res3 = f_write(&Datos,buffer3,20,&byteswritten);

res4 = f_write(&Datos,buffer4,20,&byteswritten);

res5 = f_write(&Datos,buffer5,20,&byteswritten);

res6 = f_write(&Datos,buffer6,20,&byteswritten);

res7 = f_write(&Datos,buffer7,20,&byteswritten);

res8 = f_write(&Datos,buffer8,20,&byteswritten);

if(con==0){

f_close(&Datos);

    f_open(&Datos, "PRUEBA8.TXT", FA_READ);

    res1 = f_read(&Datos, buffer1, 20, (UINT*)&bytesread);

    f_close(&Datos);

f_mount(0, "", 1);

    BSP_LCD_DisplayStringAt(0, LINE(11), (uint8_t *)" YA PUEDE RETIRAR LA SD ",
LEFT_MODE);
```

```
}else{

    if (con>0){

        BSP_LCD_DisplayStringAt(0, LINE(11), (uint8_t *)" NO RETIRE LA SD ",
LEFT_MODE);

    }else{

        BSP_LCD_DisplayStringAt(0, LINE(11), (uint8_t *)" YA PUEDE RETIRAR LA
SD ", LEFT_MODE);

    }

}

FATFS_UnLinkDriver(SDPath);

if(con > 0){

f_printf(&Datos,"%1.4f\n",opr);

}

    else{

f_close(&Datos);

f_mount(0, "", 1);

}

//HAL_Delay(100);
```

Apéndice D. Código de adquisición de las cámaras

```
clc

clear all

muestras=2000;

periodo=0.3;

exp1=0.0490;

%exp1 = 0.146; %Tiempo de exposicion camara 3

retardo=0.109;

h=actxcontrol('UEYECAM.uEyeCamCtrl.1','position',[0 0 1024 1280]);

% h.methods('-full');

h.InitCamera(1);          %Camera near: #1. Camera far: #2

h.SetPixelClock(33);

h.SetFrameRate(19.20);

pause(1);

h.SetExposureTime(exp1); %ExposureTime. Camera near: 0.6 - Camera far: 0.32 - Camera
far 151Cms: 0.4

image=h.StopLiveVideo(1); %Detenemos la camara

Width=h.GetImageWidth;  %Ancho de la Imagen

Height=h.GetImageHeight; %Altura de la Imagen

image=uint8(zeros(Width,Height));
```

```
% h.SetImageSize(Width,Height);

%

Si=h.GetColorMode;    %Confirmamos la dimension de la matriz.

if Si==0      %4 Bytes por pixel RGB 32 mode

    Col=4;

elseif Si==1  %3 Bytes por pixel RGB 24 mode

    Col=3;

elseif Si==6  %Escala de grises

    Col=1;

else

    uiwait(errordlg('tamaño error',''));

end

ImSize=int32(Height*Width*Col); %Creamos variable formateada a 8 bits con la

                                %dimension de la imagen RGB.

hMem=h.GetImageMem;    %Asignamos memoria para guardar la imagen.

h.SetMemoryMode(round(4096000/(Width*Height)),50);

t =

timer('StartDelay',retardo,'Period',periodo,'TasksToExecute',muestras,'ExecutionMode','fixedRate',

'StopFcn','h.ExitCamera();close all;beep;');

t.TimerFcn={ @iol_52,h,ImSize };

t.BusyMode='drop';

disp('listo para capturar');
```

```
while 1

    h.FreezeImage(1);    %Captura una imagen con un timer de 10 fps (aprox).

    hMem=h.GetImageMem;    % Asignamos memoria para guardar la imagen.

    u=CopyImage_Matlab(hMem,ImSize);%Recupera en un vector uint8 los datos de la imagen
grabada

    I=u>30;

    if(sum(I)>2000)

        tic;

        start(t);

        disp('inicio 1');

        break

    end

end
```