

**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**

**JESÚS OMAR RINCÓN CORREA
JHONATAN STEVEN HERNÁNDEZ QUINTERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

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**

**JESÚS OMAR RINCÓN CORREA
JHONATAN STEVEN HERNÁNDEZ QUINTERO**

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electrónico

Director

**OMAR JAVIER TÍJARO ROJAS
PhD(c). Ingeniero Electrónico**

Codirector

**YEZID TORRES MORENO
Doctor en Óptica y Tratamiento de la Señal Físico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

Principalmente gracias a Dios por darme la vida, brindarme salud, darme fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado y por mantener bien a mi familia.

A mis padres José Miguel Hernández Ochoa y Alcira Quintero Castro por su incondicional amor, apoyo y consejos, que me han alentado a seguir adelante y permitido crecer como persona.

A mi hermana Camila Andrea Hernández Quintero por ese apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado en todas las circunstancias.

A todos mis amigos y colegas por ser ese soporte de confianza, de amistad y comprensión, por su compañía y afectos, por sus risas y agradables momentos.

A mi familia, que en general conforman el cimiento de mi desarrollo, todos y cada uno de ustedes que han destinado tiempo para enseñarme nuevas cosas y por darme fortaleza en la vida.

Jhonatan Hernández Quintero

Primordialmente quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de alcanzar cada uno de los logros que me he propuesto y permitirme contar con el apoyo de cada una de las personas que me rodean.

Agradezco a mi Madre Elida Correa López por ese apoyo incondicional en cada una de mis decisiones, por su gran preocupación en guiarme de la mejor manera en cada paso que doy.

A toda mi familia por el apoyo y los valores influenciados en cada etapa de mi vida, lo cual es un requisito importante para la formación de cualquier persona.

A mis compañeros por brindarme su confianza y amistad para que en conjunto fuera posible una formación como personas y profesionales que anhelan un mejor mañana.

A los profesores que hicieron parte de mi formación como un nuevo profesional.

Y por último a la Universidad Industrial De Santander por permitirme hacer parte de esta gran comunidad UIS tan prestigiosa y reconocida a nivel internacional.

Jesús Omar Rincón Correa

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

A Dios, que por su voluntad y generosidad fue posible culminar este proyecto, gracias por estar presente no sólo en esta etapa que es muy importante para nosotros, sino en todos los momentos, gracias por hacer que cada circunstancia imprevista de este proyecto haya sido un reto de aprendizaje y lecciones.

Agradecer al profesor Omar Javier Tíjaro, nuestro director de proyecto, por su apoyo y confianza, por permitirnos ser parte del grupo de investigación (GOTS), que además se tomó el arduo trabajo de transmitirnos todos y cada uno de sus conocimientos acerca del tema y por orientarnos en cada paso en nuestra formación como ingenieros.

A Yezid Torres Moreno nuestro codirector, por su apoyo, disposición y acompañamiento a lo largo del proyecto.

A los miembros del grupo de investigación GOTS de la Universidad Industrial de Santander, por el espacio y apoyo que nos brindaron para la correcta ejecución del trabajo de grado.

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 Telecomunicaciones por ser partícipes de nuestro proceso de formación que nos permite tener un progreso tanto intelectual como personal.

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron en la realización de este proyecto.

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 19 |
| 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO | 20 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 20 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN | 21 |
| 1.3 OBJETIVOS | 21 |
| 1.31 Objetivo General. | 21 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos. | 21 |
| 1.4 ALCANCES | 22 |
| 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 23 |
| 2.1 LÁSER | 23 |
| 2.1.1 Algunos conceptos básicos sobre Láser. | 23 |
| 2.1.2 Propiedades de la luz láser | 25 |
| 2.1.3 Partes del láser | 26 |
| 2.2 EFECTO DEL BANDEO | 27 |
| 2.3 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE PROCESAMIENTO ÓPTICO | 28 |
| 2.3.1 Divisor de haz | 28 |
| 2.3.2 Filtros de densidad neutra | 29 |
| 2.4 TURBULENCIA ATMOSFÉRICA | 30 |
| 2.4.1 Flujo Laminar | 31 |

| | |
|---|----|
| 2.4.2 Flujo turbulento | 31 |
| 2.5 VELOCIDAD DEL AIRE EN EL ESTUDIO DEL CENTROIDE | 33 |
| 2.4 SENSORES Y HERRAMIENTAS DE ADQUISICIÓN | 35 |
| 2.4.1 Sensado de aire | 35 |
| 2.4.2 Sensor de flujo de aire por micropuente | 35 |
| 2.4.3 Sensor Honeywell Zephyr de la serie HAF. | 36 |
| 2.4.4 Sensado de imágenes | 39 |
| 2.4.5 Sensor con tecnología CMOS | 39 |
| 2.4.6 Herramientas de adquisición | 41 |
| 2.5 TRATAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES | 41 |
| 2.5.1 Ruido | 42 |
| 2.5.2 Tipos de Ruido | 42 |
| 2.5.3 Procesamiento del Ruido | 44 |
| 2.5.4 Tipos de filtros | 45 |
| 3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO | 46 |
| 3.1 CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL. | 46 |
| 3.2 CALIBRACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA PARA LA VARIACIÓN DEL AIRE. | 50 |
| 3.2.1 Algoritmo de adquisición del sensor de flujo | 50 |
| 3.2.2 Calibración | 51 |
| 3.2.3 Caracterización de la estructura para la variación del aire. | 54 |
| 3.3 ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE LAS CÁMARAS, SINCRONIZACIÓN DE SENSORES Y CAPTURA DE DATOS. | 59 |
| 3.3.1 Algoritmo de adquisición de las cámaras | 59 |

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 3.3.2 Sincronización de sensores | 61 |
| 3.3.3 Captura de datos | 64 |
| 3.4 TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES | 66 |
| 3.4.1 Inicio | 67 |
| 3.4.2 Filtrado | 67 |
| 3.4.3 Normalización | 68 |
| 3.4.4 Binarización | 68 |
| 3.4.5 Arreglos morfológicos. | 69 |
| 3.4.6 Centroide | 71 |
| 3.4.7 Angulo de inclinación | 72 |
| 3.5 ANALISIS Y RESULTADOS. | 73 |
| 3.5.1 Resultados de Sincronización. | 73 |
| 3.5.2 Estudio del centroide | 74 |
| 3.5.3 Función estructura | 102 |
| 4. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES | 109 |
| 5. TRABAJOS FUTUROS | 112 |
| REFERENCIAS | 113 |
| BIBLIOGRAFÍA | 117 |
| ANEXOS | 121 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Absorción y emisión de un fotón en un átomo. | 24 |
| Figura 2. Emisión estimulada de radiación. | 25 |
| Figura 3. Partes del láser | 26 |
| Figura 4. Modelado del movimiento en la cavidad del láser | 28 |
| Figura 5. Divisor de haz. a) Por polarización. b) Por intensidad. | 29 |
| Figura 6. Filtro de densidad neutra | 30 |
| Figura 7. Representación del flujo laminar y turbulento respectivamente en el tubo | 31 |
| Figura 8. Representación del modelo de cascada de energía de Kolmogorov | 33 |
| Figura 9. Velocidad del viento | 34 |
| Figura 10. Sensor de flujo de masa de aire Honeywell Zephyr de la serie HAF. | 37 |
| Figura 11. Cámara con Sensor tipo CMOS | 40 |
| Figura 12. Influencia del ruido gaussiano según la varianza | 43 |
| Figura 13. Imagen original, con ruido Impulsional del 10% y 30% | 43 |
| Figura 14. Ejemplo de Ruido uniforme Multiplicativo. | 44 |
| Figura 15. Ejemplo de Ruido uniforme frecuencial. | 44 |
| Figura 16. Montaje Experimental de forma Longitudinal. | 47 |
| Figura 17. Montaje Experimental de forma Transversal. | 48 |
| Figura 18. a) Ventilador Centrífugo. b) Rejilla acoplada en el turbulador. | 50 |
| Figura 19. Comunicación I2C. | 51 |
| Figura 20. Curvas de calibración del sensor | 52 |
| Figura 21. Curvas del instrumento patrón y sensor calibrado | 53 |
| Figura 22. Ubicación de los sensores para la caracterización en el eje X. | 54 |
| Figura 23. Caracterización del Turbulador en el eje X | 55 |
| Figura 24. Ubicación de los sensores para la caracterización en el eje X | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 25. Caracterización del Turbulador en el eje Y. | 56 |
| Figura 26. Caracterización del Turbulador en el eje Z. | 57 |
| Figura 27. Sección transversal con acondicionamiento de flujo. | 58 |
| Figura 28. Velocidades del aire obtenidos en las pruebas. | 58 |
| Figura 29. Perfil vertical del aire a lo largo del eje Z. | 59 |
| Figura 30. Diagrama de flujo del código de adquisición de las cámaras | 61 |
| Figura 31. Esquemático del circuito de inicialización para los sensores. | 63 |
| Figura 32. Sincronización previa | 63 |
| Figura 33. Esquemático regulador de potencia del ventilador. | 65 |
| Figura 34. Secuencia de tratamiento de imágenes. | 66 |
| Figura 35. a) Imagen original. b) Imagen Filtrada empleado FFT2. c) Espectro frecuencial de la imagen original. d) Espectro en frecuencia de la imagen filtrada. | 67 |
| Figura 36. a) Imagen sin Normalizar. b) Imagen Normalizada | 68 |
| Figura 37. a) Imagen sin binarización. b) Imagen con binarización. | 69 |
| Figura 38. a) Imagen original. b) Imagen erosionada. | 70 |
| Figura 39. a) Imagen original. b) Imagen dilatada. | 71 |
| Figura 40. a) Spot debidamente tratado. b) Spot con centroide. | 72 |
| Figura 41. Descripción del ángulo del movimiento del centroide. | 73 |
| Figura 42. Dispersión del centroide a partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda) y visto desde CMOS3 (derecha), obtenido de Prueba patrón. | 75 |
| Figura 43. Movimiento radial del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de Prueba patrón. | 76 |
| Figura 44. Movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de prueba patrón. | 76 |
| Figura 45. Movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de Prueba patrón. | 77 |
| Figura 46. Ángulo del movimiento del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y COMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba patrón. | 78 |

| | |
|---|----|
| Figura 47. Ángulo del movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba patrón. | 78 |
| Figura 48. Ángulo del movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba patrón. | 79 |
| Figura 49. Dispersión del centroide a partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda) y visto desde CMOS3 (derecha), obtenido de Prueba 5. | 80 |
| Figura 50. Movimiento radial del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de Prueba 5. | 81 |
| Figura 51. Movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de Prueba 5. | 81 |
| Figura 52. Movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de Prueba 5. | 82 |
| Figura 53. Ángulo del movimiento del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5. | 83 |
| Figura 54. Ángulo del movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5. | 83 |
| Figura 55. Ángulo del movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5. | 84 |
| Figura 56. Dispersión del centroide a partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda) y visto desde CMOS3 (derecha), obtenido de la Prueba 6. | 85 |
| Figura 57. Movimiento radial del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6. | 86 |
| Figura 58. Movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6. | 86 |
| Figura 59. Movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6. | 87 |
| Figura 60. Ángulo del movimiento del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6. | 88 |
| Figura 61. Ángulo del movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6. | 88 |

| | |
|--|----|
| Figura 62. Ángulo del movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6. | 89 |
| Figura 63. Dispersión del centroide a partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda) y visto desde CMOS3 (derecha), obtenido de Prueba 5. | 90 |
| Figura 64. Movimiento radial del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de Prueba 5. | 91 |
| Figura 65. Movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de Prueba 5. | 91 |
| Figura 66. Movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de prueba 5. | 92 |
| Figura 67. Ángulo del movimiento del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5. | 93 |
| Figura 68. Ángulo del movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5. | 94 |
| Figura 69. Ángulo del movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5. | 94 |
| Figura 70. Dispersión del centroide a partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda) y visto desde CMOS3 (derecha), obtenido de la Prueba 6. | 95 |
| Figura 71. Movimiento radial del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6. | 96 |
| Figura 72. Movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6. | 96 |
| Figura 73. Movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6. | 97 |
| Figura 74. Ángulo del movimiento del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6. | 98 |
| Figura 75. Ángulo del movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6. | 98 |
| Figura 76. Ángulo del movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6. | 99 |

| | |
|---|-----|
| Figura 77. Función estructura del movimiento del centroide en prueba Patrón | 103 |
| Figura 78. Función estructura del ángulo del centroide en Prueba Patrón | 104 |
| Figura 79. Función estructura del movimiento del centroide en Prueba 5 a) Radial. b) Horizontal. c) Vertical. | 105 |
| Figura 80. Función estructura del ángulo del centroide en Prueba 5 a) Radial . b) Horizontal. c) Vertical. | 106 |
| Figura 81. Función estructura del movimiento del centroide en Prueba 5 a) Radial. b) Horizontal. c) Vertical. | 107 |
| Figura 82. Función estructura del ángulo del centroide en Prueba 5 a) Radial. b) Horizontal. c) Vertical. | 108 |
| Figura 83. Placa de Arduino | 121 |
| Figura 84. Temperatura del aire obtenido en las pruebas. | 128 |
| Figura 85. Humedad relativa del aire obtenido en las pruebas. | 129 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Especificaciones técnicas relevantes del láser usado | 27 |
| Tabla 2. Propiedades del sensor CMOS EO-1312..... | 40 |
| Tabla 3. Elementos utilizados en los montajes experimentales del proyecto. | 48 |
| Tabla 4. Tiempo de exposición y distancia de cada cámara. | 49 |
| Tabla 5. Dimensiones y ubicación del turbulador | 49 |
| Tabla 6. Especificaciones de las pruebas realizadas. | 65 |
| Tabla 7. Tiempos de sincronismo para cada prueba..... | 74 |
| Tabla 8. Resultados del centroide para las pruebas realizadas en cada situación..... | 100 |
| Tabla 9. Resultados del ángulo del centroide para las pruebas realizadas en cada situación. | 101 |
| Tabla 10. Máximas fluctuaciones del centroide y ángulo - Longitudinal..... | 106 |
| Tabla 11. Máximas fluctuaciones del centroide y ángulo – Transversal..... | 108 |
| Tabla 12. Algunas especificaciones técnicas del Arduino UNO. | 122 |
| Tabla 13. Algunas especificaciones técnicas del Sensor Honeywell..... | 122 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| ANEXO A. HERRAMIENTAS DE ADQUISICION DE DATOS..... | 121 |
| ANEXO B. ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE SENSORES..... | 124 |
| ANEXO C. ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE IMAGENES..... | 126 |
| ANEXO D. TEMPERATURA Y HUMEDAD MEDIDA EN LAS PRUEBAS REALIZADAS..... | 128 |

RESUMEN

TITULO: 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^{*}.

AUTORES: JESÚS OMAR RINCÓN CORREA
JHONATAN STEVEN HERNÁNDEZ QUINTERO^{**}

PALABRAS CLAVE: Velocidad del aire, Turbulencia Atmosférica, Haz Láser, Función estructura.

DESCRIPCIÓN:

Con el trabajo de grado realizado se conoció el comportamiento de un haz láser propagado en una trayectoria horizontal a bajas alturas, atravesando un medio turbulento causado por flujos de aire a distintas velocidades. Este medio turbulento se generó por medio de un ventilador centrífugo cuya distribución fue caracterizada a lo alto, ancho y largo del sistema turbulador, el cual fue controlado para garantizar que la velocidad del aire se mantuviese constante en los intervalos de tiempo y pruebas que se realizaron.

Para generar la turbulencia se implementó un montaje de laboratorio que consta de un turbulador, en el cual es posible hacer atravesar un haz láser, obteniendo dos imágenes no perturbadas y una imagen afectada por el medio turbulento. Esto, con la ayuda de tres cámaras CMOS y un sensor de flujo de aire HONEYWELL ZEPHYR HAFUHT0050L4AXT que estuvieron sincronizados para garantizar los resultados. La sincronización se realizó con la ayuda de la herramienta de software matemático de Matlab® y temporizadores programados mediante microcontrolador.

Para adquirir los datos de flujo de aire del sensor, se utilizó la plataforma de hardware de código abierto Arduino, la cual está basada en una sencilla placa con entradas y salidas, analógicas y digitales, dónde se hizo uso de un módulo de comunicación I2C con el que fue posible obtener los valores de flujo de aire que detectaba el sensor en un intervalo de tiempo.

La toma de datos de las cámaras y sensores sincronizados se realizó a diferentes horas del día, en el cual en algunas pruebas se varió la velocidad del aire durante la adquisición de datos y en otras se dejaron valores constantes por largos lapsos de tiempo, de esta forma se garantizó la estabilidad de flujo dentro del Turbulador y así poder aplicar las operaciones matemáticas necesarias para analizar los resultados y obtener las respectivas conclusiones.

^{*} Trabajo de Grado

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

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION OF THE AIR SPEED EFFECTS IN THE ATMOSPHERIC TURBULENCE BY THE PROPAGATION OF A LASER BEAM THROUGH A HORIZONTAL PATH AT GROUND LEVEL *

AUTHORS: JESÚS OMAR RINCÓN CORREA
JHONATAN STEVEN HERNÁNDEZ QUINTERO**

KEY WORDS: Airspeed, Atmospheric Turbulence, Laser Beam, Structure function.

DESCRIPTION:

This end of grade work performed shows the behavior of a laser beam propagation in a horizontal path at ground level, going through a turbulent environment caused by air flows for different speeds. This turbulent medium is generated by a centrifugal fan whose speed distribution was characterized along the height, width and length of the turbulator system, which was controlled to ensure that the speed air was kept constant in the time intervals when the test were conducted.

To generate the turbulence it was implemented in an experimental setup that was constituted by a turbulator, which is possible through a laser beam, obtaining two unperturbed images and one perturbed image affected by the turbulent environment. This, with the help of three CMOS cameras and air flow sensor HONEYWELL ZEPHYR HAFUHT0050L4AXT that were synchronized in order to guarantee results. The synchronization was performed with the help of mathematical software tool Matlab® and timers programmed by the microcontroller.

To acquire the data airflow from sensor it was used a platform hardware open source called Arduino, which is based on a simple plate with inputs and outputs, analog and digital and a communication module I2C which it was possible to obtain the airflow sensor data, that were detected by the sensors at the time interval.

The data collection of cameras and sensors synchronized were performed at different times of day, which in some tests the speed air was varied during the data acquisition and for others tests the values were constant for long periods of time, in this way the flow stability is guaranteed inside the turbulator so mathematical operations can be applied to analyze the results and get the respective conclusions.

* End degree work

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications (E³T) Engineering School, Director Dr(c). Omar Javier Tijero Rojas, Codirector Dr. Yezid Torres Moreno.

INTRODUCCIÓN

Desde hace algunos años los científicos dedicados al estudio de la atmósfera se han interesado por estudiar la turbulencia en los movimientos atmosféricos, puesto que esto está presente en todos los movimientos cercanos al suelo y en otras capas que pueden estar sometidas a importantes fenómenos de tipo térmico.

La investigación y profundización en la comprensión de la turbulencia en la atmósfera requiere la utilización de sofisticados equipos de medida. Los movimientos turbulentos están prácticamente presentes en todo momento, donde exista un cambio significativo de velocidad del flujo puede generarse un flujo turbulento.

El objetivo central del presente trabajo consiste en realizar un estudio de los efectos que tiene la velocidad del aire en la turbulencia atmosférica, esto se planea realizar por medio de un haz láser el cual viajará a distancias horizontales a baja altura dentro de un salón de laboratorio. Para la ejecución de éste es necesario contar con un sensor de velocidad de gas, o en su defecto sensor de flujo, con el fin de conocer las distintas velocidades con las que viaja el aire y así realizar las respectivas pruebas.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La adquisición de imágenes en alta resolución ha mostrado grandes avances en los últimos años, en el cual la proyección de imágenes a través de trayectorias con turbulencia vertical (ej. astronomía e imágenes de satélites) se obtienen importantes mejoras en el área científica; sin embargo, si se contrastan estos avances con la capacidad de adquirir imágenes en alta resolución por medio de trayectorias con turbulencia horizontal a bajas alturas, se observa que las imágenes obtenidas a tales condiciones se encuentran gravemente degradadas y sufren de borrosidad severa en el tiempo promedio [1].

Son muchas las razones por las cuales la adquisición de imágenes en dichas condiciones es tan difícil de obtener. En primer lugar, la turbulencia horizontal a baja altura es mucho más fuerte que la turbulencia en trayectorias verticales. Segundo, la turbulencia en trayectorias horizontales se distribuye, en esencia, uniformemente en todo el espacio entre el objeto y el observador, por lo tanto un modelo de pantalla delgada de fase para la turbulencia no es aplicable. En tercer lugar, el camino isoplanático es bastante pequeño, una condición que complica enormemente cualquier procesamiento después de la detección de imágenes [1].

Desarrollar un modelo que permita obtener imágenes de alta resolución a través de un medio turbulento no es tarea fácil teniendo en cuenta que existen muchos factores que afectan directamente la propagación de un haz láser, tales como la temperatura, humedad, presión y velocidad del aire, entre otros. Es por tanto, que el análisis que se realizó se centró en caracterizar los efectos de la velocidad del aire directamente en la propagación de un haz láser bajo la condición de

turbulencia atmosférica en trayectorias horizontales a bajas alturas que apoyen en un futuro, el diseño de instrumentos y aplicaciones que aprovechen mejor la precisión del láser.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El estudio plasmado en este documento consistió en conocer el comportamiento de la turbulencia atmosférica por medio de un haz láser propagado en forma horizontal, analizando los efectos que pueda tener debido a la velocidad del aire, para futuros estudios en áreas de la ciencia como la geología, biología, electrónica de consumo, tecnología de la información, la industria, el sector de seguridad, comunicaciones, entre otros.

Caracterizar los efectos que tiene la velocidad del aire en la turbulencia atmosférica en la propagación de un haz láser horizontalmente, y parametrizar este fenómeno es una labor importante para que futuros proyectos tengan en cuenta este estudio y de esta forma obtener resultados más óptimos.

1.3 OBJETIVOS

1.31 Objetivo General. Caracterizar los efectos de la velocidad del aire en la propagación horizontal de un haz láser a baja altura a través de la turbulencia atmosférica.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Analizar y comprender la propagación de un haz láser.

- Implementar un sistema para medir la velocidad del aire en un entorno de laboratorio.
- Obtener el centroide del frente de onda del haz láser y sucesivamente el ángulo que forma su movimiento con respecto al eje de propagación, sustrayendo los efectos del bandeo producidos por el láser, a partir de la adquisición de sensores CMOS bidimensionales y procesamiento digital de imágenes.
- Realizar mediciones a diferentes revoluciones de los ventiladores dentro del sistema implementado para producir diferentes velocidades en el aire y así verificar los efectos en la turbulencia atmosférica.

1.4 ALCANCES

Se obtuvieron las desviaciones de los centroides del frente de onda del haz láser y el ángulo que formó sus fluctuaciones con respecto al eje de propagación debido a la turbulencia generada por la velocidad del aire en el sistema turbulador, a través de un montaje específico de 3 cámaras CMOS bidimensionales y sensores de flujo de aire de referencia HAFUHT0050L4AXT de la empresa Honeywell. Se estudiaron previamente los efectos de bandeo producidos por el láser.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 LÁSER

La palabra láser es un acrónimo que proviene del inglés *Light Amplification By Stimulated Emission of Radiation* que traduce “Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación”, es decir, que el láser es un dispositivo que utiliza la emisión estimulada de radiación en un medio apropiado para generar un haz de luz cuyas características especiales de monocromaticidad, coherencia y direccionalidad se encuentran perfectamente controladas. Los láseres son capaces no sólo de amplificar una señal, sino también de crearla. Por lo tanto, no son únicamente amplificadores, sino también fuentes de luz [2].

2.1.1 Algunos conceptos básicos sobre Láser.

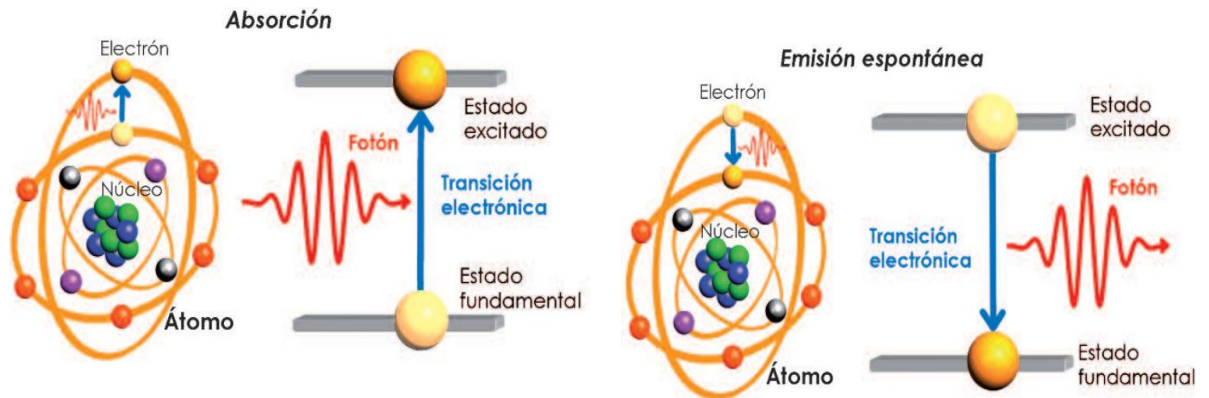
- **Absorción y emisión de luz**

La luz es capaz de inducir transiciones entre los niveles de energía del átomo (es decir, cambios de energía de los electrones), mediante procesos de absorción y emisión. La luz se encuentra formada por partículas (fotones) cuya energía es proporcional a la frecuencia de la radiación. Así pues, la absorción de luz es más eficiente cuando la energía de los fotones coincide con la diferencia entre dos niveles de energía del átomo, resultando en un mayor número de átomos excitados en el material como se muestra en la Figura 1.

El proceso inverso, como se evidencia en la Figura 1, se da cuando un electrón en el estado de energía excitado es inestable y, tarde o temprano, decae a un nivel de energía inferior emitiendo un fotón cuya energía corresponde a la diferencia

entre esos dos niveles. Dicho proceso se conoce como emisión espontánea, y es el fundamento de las fuentes de luz más habituales (bombillas, LEDs, etc) [2].

Figura 1. Absorción y emisión de un fotón en un átomo.

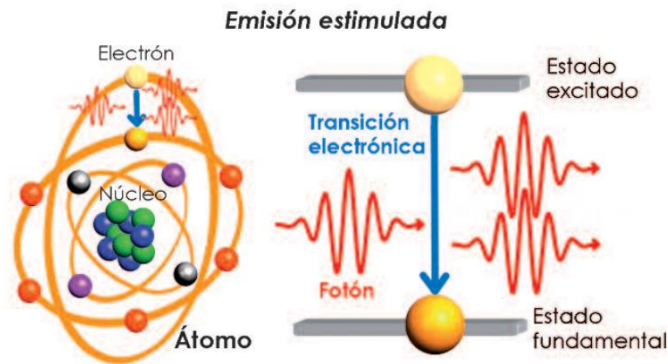


(Tomado de la referencia [2])

- **Emisión estimulada**

A diferencia de la emisión espontánea, en la emisión estimulada el átomo excitado se encuentra en presencia de un campo electromagnético como se muestra en la figura 2. Un fotón interaccionando con un átomo inicialmente excitado puede provocar que éste pase a su estado fundamental emitiendo un nuevo fotón que se suma al que provocó la transición. Este proceso, denominado emisión estimulada, se caracteriza además porque el fotón emitido por el átomo tiene propiedades idénticas al fotón inicial [2].

Figura 2. Emisión estimulada de radiación.



(Tomado de la referencia [2])

2.1.2 Propiedades de la luz láser

La amplificación y la naturaleza propia de la emisión estimulada, proporcionando fotones idénticos a los que la estimulan, son las razones fundamentales de las propiedades de la luz láser: coherencia, direccionalidad y monocromaticidad.

- **Coherencia**

Se dice que una onda electromagnética es coherente cuando su fase no varía aleatoriamente a través del espacio o a lo largo del tiempo. La coherencia del láser es resultado de la emisión estimulada, en la que cada nuevo fotón es emitido de forma idéntica a los anteriores y por tanto contribuye de igual forma a la fase del campo electromagnético [2].

- **Direccionalidad**

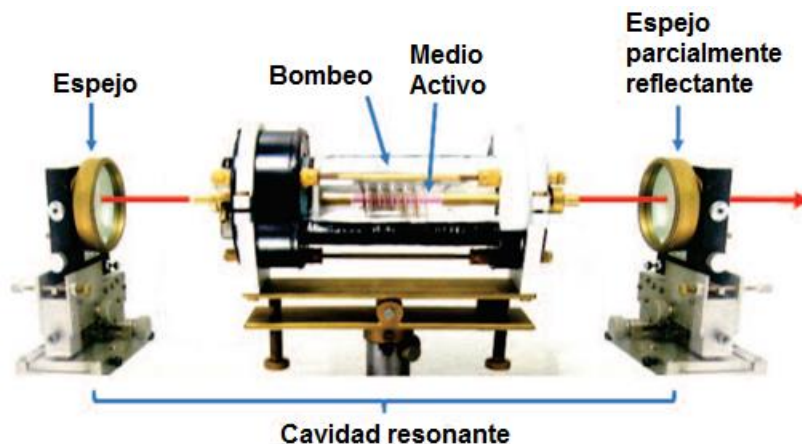
Se trata de una consecuencia directa de la cavidad, ya que sólo los fotones que viajan en dirección perpendicular a sus espejos contribuyen al proceso de amplificación [2].

- **Monocromaticidad**

La luz monocromática sólo contiene una longitud de onda. Aunque no es posible llegar a un campo monocromático ideal, los láseres emiten un intervalo de frecuencias lo suficientemente estrecho como para que en la mayoría de los casos su emisión pueda considerarse perfectamente monocromática [2].

2.1.3 Partes del láser El secreto del láser está en el medio activo que, debidamente bombeado, debe posibilitar la inversión de población y la emisión estimulada como se muestra en la Figura 3. Además de estos componentes básicos un láser puede tener otros dispositivos intracavidad para modificar o controlar las características de la luz emitida (longitud de onda, pulsación, etc.), o elementos externos a la cavidad para amplificar la luz (a través de otro medio activo con su correspondiente bombeo) [3].

Figura 3. Partes del láser



(Tomado de la referencia [2])

A su vez, cada tipo de láser posee características diferentes, dependiendo de la aplicación que se le quiera dar. En este proyecto las pruebas se realizaron con un láser de Helio-Neón con 35 mW de potencia y 632.8 nm de longitud de onda.

La Tabla 1 muestra las especificaciones técnicas relevantes correspondientes al láser utilizado para el desarrollo de este proyecto.

Tabla 1. Especificaciones técnicas relevantes del láser usado

| ESPECIFICACIONES | MODELO 107B-2 o 127-35 |
|--|-------------------------------|
| Potencia de salida | 35 [mW] |
| Longitud de onda | 632.8 [nm] |
| Ancho del haz | 1.25±0.1 [mm] |
| Divergencia del haz | 0.66±0.05 [mrad] |
| Potencia de arranque después de 20 minutos | >95% |
| Voltaje de polarización | 115 [V] |
| Corriente de polarización | 1.2 [A] |

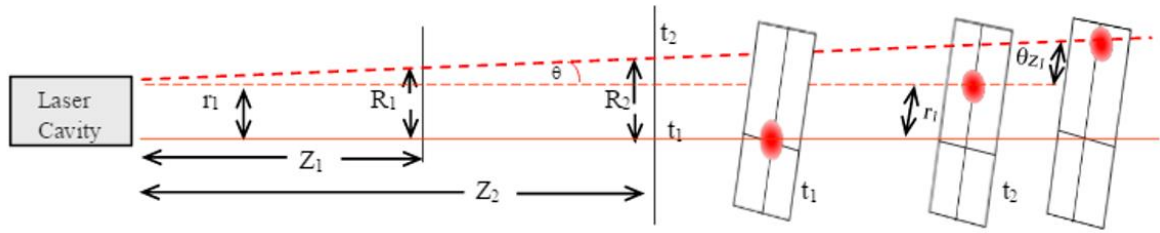
Tomado de la referencia [4].

2.2 EFECTO DEL BANDEO

Se denomina efecto del bandeo a la desviación del haz a medida que se propaga, causada por la cavidad del láser. Para estudiar este efecto se hace necesario caracterizar dicha desviación y reducir al mínimo el desplazamiento del spot causado por este fenómeno y así obtener resultados más cercanos sobre la variación del láser provocado por la turbulencia generada por las distintas velocidades del aire suministradas [5].

La Figura 4 evidencia cómo se realizó el modelado de los movimientos causados por la cavidad de láser.

Figura 4. Modelado del movimiento en la cavidad del láser



(Tomado de la referencia [5])

Es posible encontrar que la relación entre las desviaciones en los diferentes puntos está dada por las Ecuaciones 1 y 2:

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

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

El efecto de bandeo es posible evidenciarlo en un fotosensor 2D, verificando su traslación e inclinación comparado con una propagación del haz ideal

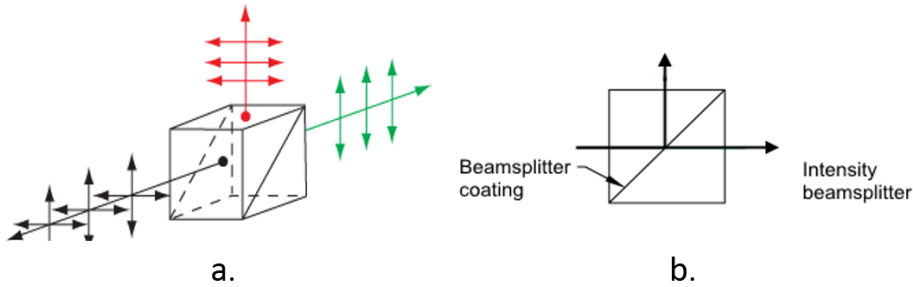
2.3 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE PROCESAMIENTO ÓPTICO

En este proyecto se trabajaron con dos elementos fundamentales para poder procesar la turbulencia, uno de ellos el divisor de haz y el otro un filtro de densidad neutra, los cuales se describen a continuación.

2.3.1 Divisor de haz Un divisor de haz es un elemento óptico que divide un haz de luz incidente, en diferentes direcciones. Está compuesto por dos prismas de vidrio triangulares que están pegados por la base, donde el grosor de la capa de resina es ajustado para una cierta longitud de onda. Se encuentran comúnmente

dos tipos de beam splitter en el mercado, uno de polarización y otro de intensidad. En la figura 5 se ilustran estos tipos de divisores de haz.

Figura 5. Divisor de haz. a) Por polarización. b) Por intensidad.



(Tomado de la referencia [6])

2.3.2 Filtros de densidad neutra Los filtros de densidad neutra son filtros grises utilizados en fotografía y óptica para controlar la cantidad de luz que pasa a la cámara, se llaman neutrales puesto que no afectan la calidad cromática de las imágenes filtrando todos los colores por igual.

Son espejos redondos de diámetro de 1 pulgada y con un rango de gama amplio de 400 a 2000 nm de longitud de onda y es adecuado para su uso con láseres de potencia moderada. En la figura 6 se muestra el filtro de densidad neutra utilizado.

Figura 6. Filtro de densidad neutra



(Tomado de la referencia [6])

2.4 TURBULENCIA ATMOSFÉRICA

En un flujo de un fluido, el número de Reynolds (Re) establece una relación entre la fuerza inercial y la fuerza de la viscosidad. Por debajo de un determinado número de Reynolds se habla de flujos laminares que tienen soluciones analíticas y numéricas sencillas modelando con una formulación matemática como la de las ecuaciones de Navier-Stokes [7]. A partir de un número de Reynolds crítico, ecuacion (3), el flujo se vuelve inestable y si sigue creciendo da lugar a un flujo turbulento [8]. En la ecuación 3 se muestra la condición que se debe cumplir para tener un flujo en el régimen turbulento [8].

$$\mathbf{Re} = \frac{\mathbf{u} * \mathbf{D}}{\mathbf{v}} > \mathbf{2000} \quad (3)$$

Donde:

u: velocidad del fluido (m/s)

D: diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido (m)

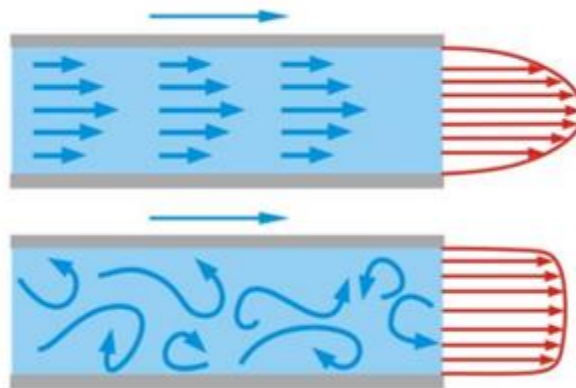
v : viscosidad cinemática del fluido (m²/s)

2.4.1 Flujo Laminar Se denomina flujo laminar al tipo de movimiento de un fluido cuando éste es perfectamente ordenado, estratificado, suave, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse. Las capas adyacentes del fluido se deslizan suavemente entre sí. El mecanismo de transporte es exclusivamente molecular. Se dice que este flujo es aerodinámico. Ocurre a velocidades relativamente bajas o viscosidades altas [9].

2.4.2 Flujo turbulento Se llama flujo turbulento cuando éste se hace más irregular, caótico e impredecible, las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos aperiódicos. Aparece a velocidades altas o cuando aparecen obstáculos abruptos en el movimiento del fluido [9].

En la Figura 7 se observa como un flujo laminar debido a una inestabilidad se hace inestable produciéndose la transición a un flujo turbulento.

Figura 7. Representación del flujo laminar y turbulento respectivamente en el tubo



(Tomado de la referencia [10])

Los estudios clásicos de turbulencia estaban interesados por las fluctuaciones en el campo de velocidades de un fluido viscoso. En particular, se observó que la

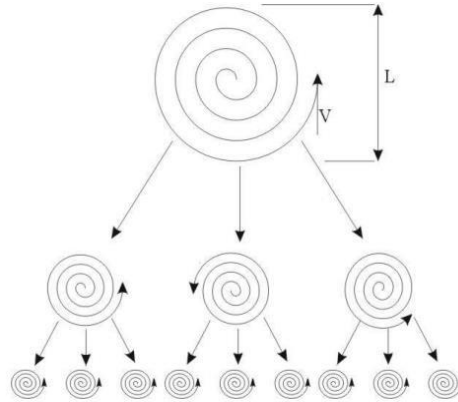
velocidad del viento longitudinal asociada con la atmósfera turbulenta fluctúa al azar alrededor de su valor medio. Es decir, el campo de velocidad del viento asume la naturaleza de un campo aleatorio o estocástico, lo que significa que cada punto en el espacio y tiempo dentro del flujo, la velocidad puede ser representada por una variable aleatoria [11].

A partir de los trabajos de Kolmogorov aparece el modelo de cascada de energía, en el cual se postula que la turbulencia está formada por torbellinos de diferentes tamaños. Los torbellinos más grandes, que tienen longitud característica del orden del dominio del fluido, se vuelven inestables y van transfiriendo energía a torbellinos más pequeños que a su vez también la van transmitiendo a torbellinos aún más pequeños creando la llamada cascada de energía [7].

Se puede comprobar que en las escalas grandes, el tiempo característico de variación del movimiento de los torbellinos, puede estimarse a partir de su longitud característica (L) y la velocidad característica (V) de las fluctuaciones turbulentas de velocidad, determinadas por las condiciones de contorno impuestas al sistema [7].

En la figura 8 se muestra una representación del modelo planteado por Kolmogorov.

Figura 8. Representación del modelo de cascada de energía de Kolmogorov



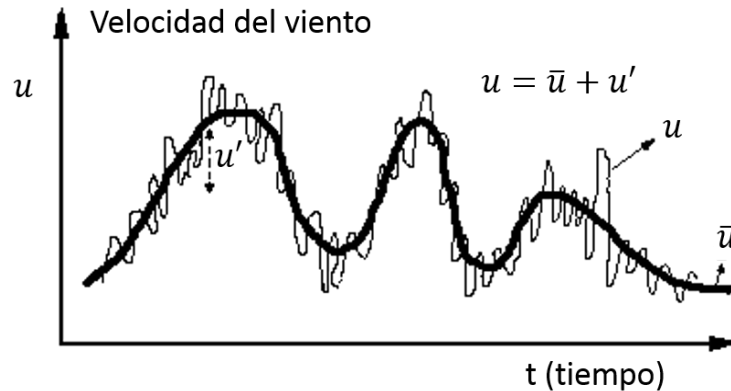
(Tomado de la referencia [7]).

El examen del registro de un anemógrafo muestra que el viento en superficie sufre variaciones rápidas e irregulares de velocidad y de dirección. Estas fluctuaciones indican que el flujo de aire es turbulento, formándose numerosos torbellinos en las proximidades de la superficie terrestre. Es difícil determinar la estructura exacta de estos torbellinos, que son muy irregulares. En particular, sus ejes de rotación pueden tener todas las direcciones [12].

2.5 VELOCIDAD DEL AIRE EN EL ESTUDIO DEL CENTROIDE

La naturaleza del flujo de aire turbulento se puede entender como una superposición de un viento medio (en el sentido de promediado de la señal de viento) y una componente turbulenta que se puede asimilar a un tren de torbellinos de diferentes tamaños que son transportados por el viento medio (véase Figura 9). Esto puede afectar en gran medida la trayectoria de un haz láser dentro de un espacio confinado debido a los cambios generados a la atmósfera terrestre en el medio de propagación [13].

Figura 9. Velocidad del viento



(Tomado de la referencia [13]).

Conviene destacar que el flujo de aire presenta un perfil no homogéneo, tanto espacial como temporal, lo que significa una mayor fluctuación en el índice de refracción del medio y por consiguiente una distorsión del frente de onda asociado al desplazamiento del centroide, por lo tanto no existe una correspondencia lineal entre la velocidad del aire y la ubicación espacial del centro de masa del láser [13].

Para el análisis de estas situaciones se han elaborado, principalmente, tres métodos: Análisis de ráfagas, análisis temporal y análisis en la función de estructura.

El método más sencillo de análisis consiste en caracterizar el viento turbulento como una sucesión de ráfagas, es decir, súbitos incrementos de la velocidad o desalineación del viento. El análisis más sencillo es el de calcular la influencia de una o varias ráfagas máximas, lo que resulta en un diseño conservativo a rotura.

El segundo método realiza la integración de los sucesos en el dominio del tiempo, que proporciona la secuencia de desviación del centroide frente a efectos estocásticos (turbulencia). La principal desventaja del método consiste en el alto costo de tiempo de los ordenadores que implica, pero a cambio se obtiene la secuencia real de eventos y la descripción en la distribución del centroide.

Por último, se aprovecha la caracterización aleatoria del viento turbulento y se define la función de estructura que describe el proceso aleatorio que está sujeto a las fluctuaciones del índice de refracción, imponiendo las condiciones de homogeneidad e isotropía al medio turbulento.

2.4 SENSORES Y HERRAMIENTAS DE ADQUISICIÓN

2.4.1 Sensado de aire Existen una gran variedad de sensores e instrumentos para medir la velocidad del aire, ya sea en la atmósfera, en ductos, salidas de aires acondicionados o cualquier entorno. Para medir los cambios repentinos de la velocidad del viento, especialmente en las turbulencias, se recurre en la mayoría de los casos al anemómetro de hilo caliente.

Este anemómetro posee ciertas características que consiste en un hilo de platino o níquel calentado eléctricamente y la acción del viento tiene por efecto enfriarlo y hace variar así su resistencia; por consiguiente, la corriente que atraviesa el hilo es proporcional a la velocidad del viento [14].

Pero para la aplicación que se requiere, este dispositivo suele ser de tamaño significativo, con baja precisión y muy costoso. Debido a lo anterior y al fácil acceso se recurre a utilizar un sensor de flujo de aire, donde es posible conocer la velocidad con que el aire atraviesa un área determinada. Estos sensores suelen ser más pequeños y fáciles de adecuar en ductos sin que interfieran mucho en las medidas al final del mismo. El tipo de sensor que se utilizó es el que funciona con un micropuente para tomar la medida de flujo.

2.4.2 Sensor de flujo de aire por micropuente El funcionamiento del sensor de flujo de aire por micropuente se basa en la teoría de transferencia de calor. El flujo de aire se envía sobre la superficie de los elementos de detección. La salida de

voltaje varía en proporción al flujo de aire o de otro gas que pasa por los puertos de entrada y salida del encapsulado. La carcasa envía y controla con precisión el flujo de aire que pasa por el elemento de detección de la microestructura [15].

Contiene una estructura con puente térmicamente aislado y una película fina, en el cual se encuentran los elementos de detección de temperatura y calor. La estructura con puente ofrece una respuesta rápida y sensible ante el flujo de aire o de otro gas que pase sobre el chip [15].

En la práctica se utilizaron sensores Honeywell Zephyr de la serie HAF (High Accuracy), los cuales midieron el flujo o caudal de aire dentro y fuera del sistema turbulador.

2.4.3 Sensor Honeywell Zephyr de la serie HAF. Los sensores Honeywell Zephyr de la serie HAF (High Accuracy) o alta precisión proporcionan una interfaz digital para la lectura de flujo de aire sobre el flujo a gran escala especificada y rangos de temperatura compensada. El calentador aislado térmicamente y los elementos de sensado de temperatura ayudan a los sensores a proporcionar una respuesta rápida al flujo de aire o gas. Los sensores están completamente calibrados y con compensación de temperatura con un Circuito Integrado para Aplicaciones Específicas (ASIC) [16].

Estos sensores funcionan a partir de la técnica descrita de sensores de flujo de aire por micropuente. En la referencia [16] se muestran las especificaciones y características más relevantes proporcionadas por la compañía fabricante de este sensor, donde cabe destacar que la unidad de medida de flujo de aire utilizada es los litros por minutos estándar.

En la Figura 10, se muestra una imagen donde se evidencia el diseño físico del sensor de flujo de aire utilizado.

Figura 10. Sensor de flujo de masa de aire Honeywell Zephyr de la serie HAF.



(Tomado de la referencia [16]).

Después de programar y obtener la salida digitalizada del sensor de flujo de aire, es necesario realizar un arreglo matemático de manera que sea posible obtener el valor de la velocidad del aire que está circulando por el turbulador. De esta manera se aplican algunas ecuaciones de conversión.

Lo primero que se debe hacer es pasar de SLMP a litros por minuto estándar (LPM) como se muestran a continuación:

$$\text{LPM} = \text{SLPM} * \frac{\text{Ps} * \text{Tx}}{\text{Px} * \text{Ts}} \quad (4)$$

(Tomado de la referencia [17]).

Donde:

Ps: Presión atmosférica estándar.

Px: Presión atmosférica del medio.

Ts: Temperatura estándar.

Tx: Temperatura del medio.

Después de tener el flujo en unidades de LPM, se procede a convertirlo en unidades de metros cúbicos por segundo (m^3/s), de la siguiente forma.

$$Q = \text{LPM} * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{1\text{Min}}{60s} \quad (5)$$

(Tomado de la referencia [18]).

Donde:

L: Litros

Min: Minutos

Q: Flujo volumétrico en m^3/s

Cuando ya se obtiene el flujo del aire en unidades de m^3/s , se procede a convertir éste en velocidad en unidades de m/s , con la siguiente ecuación.

$$U = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

(Tomado de la referencia [18]).

Donde:

U: velocidad en m/s

A: área transversal del sensor de flujo.

Debido a la dependencia de múltiples factores que pueden afectar la turbulencia atmosférica, se encuentra la necesidad de controlar parámetros de gran impacto en la variación de dicho fenómeno, como lo son la temperatura y humedad, donde sí se observan cambios en un nivel considerable pueden hacer que cambie el medio atmosférico donde se trabaja. Resaltando que el parámetro a estudiar es solo la velocidad del aire y la alteración que puede tener este en la turbulencia atmosférica, las variables que no son de interés directo, como la temperatura y la

humedad medidas en trabajos previos [19] - [20], se deben medir con el objetivo de intentar solo variar el aire que fluye por el Turbulador.

2.4.4 Sensado de imágenes Hoy día existen dos tipos de tecnologías utilizadas para la fabricación de sensores de cámaras digitales, ya sean compactas o réflex. Se trata de los CCD (Charge Coupled Device) o CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Ambos tipos de sensores están formados en su esencia por semiconductores de metal-óxido (MOS) y están distribuidos en forma de matriz.

Su función es la de acumular una carga eléctrica en cada una de las celdas de esta matriz. Estas celdas son los llamados píxeles. La carga eléctrica almacenada en cada píxel, dependerá en todo momento de la cantidad de luz que incida sobre el mismo. Cuanta más luz incida sobre el píxel, mayor será la carga que este adquiera [21]. Aunque en esencia, los CCD y CMOS funcionan de una manera muy similar, hay algunas diferencias entre ambas tecnologías. A continuación se describirá el sensor con tecnología CMOS con algunas comparaciones y ventajas respecto al de tecnología CCD.

2.4.5 Sensor con tecnología CMOS En los sensores CMOS cada celda es independiente. La diferencia principal es que la digitalización de los píxeles se realiza internamente en unos transistores que lleva cada celda, por lo que todo el trabajo se lleva a cabo dentro del sensor y no se hace necesario un chip externo encargado de esta función. Con esto se consigue reducir costes y equipos más pequeños, por lo tanto hay mayor calidad ya que los sensores CMOS son más sensibles a la luz y de mayor velocidad pues el procesamiento se realiza dentro del propio sensor

Otro aspecto en el que los sensores CMOS son superiores a los CCD es en el blooming. Este fenómeno se produce cuando un píxel se satura por la luz que

incide sobre él y a continuación empieza a saturar a los que están a su alrededor. Este defecto en el caso de los CMOS no es perceptible [21]. En la Figura 11, se muestra una imagen de la cámara utilizada.

Figura 11. Cámara con Sensor tipo CMOS



(Tomado de la referencia [21]).

Definido el tipo de sensor que se usa para la adquisición de las imágenes del frente de onda del haz láser, se verifican sus principales características en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del sensor CMOS EO-1312

| Especificaciones | |
|--|----------------|
| Número de Modelo | EO1312C |
| Área de Sensor, H x V (mm) | 6.79 x 5.43 |
| Píxeles (H x V) | 1280 x 1024 |
| Tamaño de pixel, H x V (μm) | 5.3 x 5.3 |
| Profundidad de Pixel | 8bit |
| Imágenes por segundo (fps) | 25 |
| Salida de video | USB 2.0 |
| Dimensiones (mm) | 44 x 44 x 25.4 |
| Tipo | Color Camera |
| Fabricante | Edmund Optics |
| Resolución (Megapíxeles) | 1.3 |

Este tipo de sensores vienen con conexión USB, facilitando la conexión con cualquier computador de la actualidad

2.4.6 Herramientas de adquisición Para la adquisición fue necesario utilizar cuatro equipos de cómputo, en donde tres fueron asignados a las cámaras CMOS para captura del frente de onda proveniente del láser en tres distancias distintas a lo largo del eje de propagación del haz láser.

De la misma forma se asignó un equipo de cómputo para visualizar los resultados obtenidos por los sensores a través de una plataforma de código abierto llamada Arduino. Esta plataforma Arduino se comunica a través su módulo serial a un computador y un programa nombrado HYPERTERMINAL, los datos que se adquieren desde el Arduino se visualizan y almacenan en un archivo de texto con extensión .txt generado por Hyperterminal.

En el ANEXO se enunciarán cada una de estas herramientas, teniendo gran relevancia en sus principales características y especificaciones de diseño.

2.5 TRATAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES

El procesamiento de imágenes tiene como objetivo mejorar el aspecto de las imágenes y hacer más evidentes en ellas ciertos detalles que se desean hacer notar. El tratamiento de imágenes se puede generar a través de métodos digitales, en una computadora en el cual el procesamiento digital se efectúa dividiendo la imagen en un arreglo rectangular de elementos donde cada elemento de la imagen dividida se conoce con el nombre de pixel [22].

De la misma manera, al pixel se le debe asignar un valor numérico dado por la luminosidad promedio. Así, los valores de luminosidad y las coordenadas de las posiciones de los pixeles, definen completamente la imagen [22].

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. Las técnicas de restauración de imágenes están interesadas en reconstruir o recobrar una imagen que ha sido degradada [22].

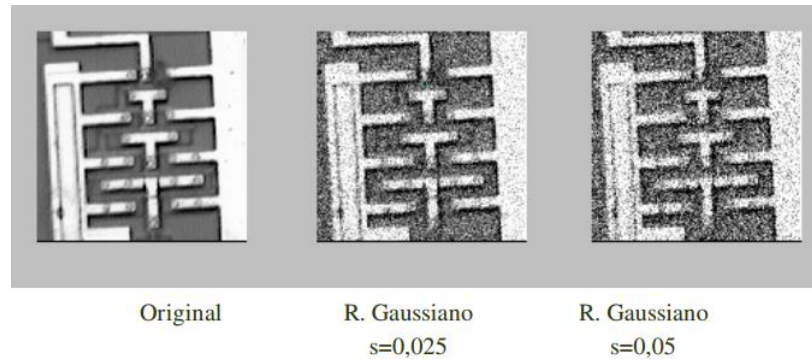
2.5.1 Ruido Según su definición, ruido es cualquier perturbación que sufre una señal en el proceso de adquisición, transmisión y/o almacenamiento, se modela usualmente como un proceso estocástico (modelo probabilístico), el ruido es un defecto de la información no deseada que contamina y degrada la imagen, se manifiesta generalmente en píxeles aislados que toman valores distintos a la realidad [23].

2.5.2 Tipos de Ruido Entre los principales tipos de ruidos que afectan comúnmente a las imágenes digitales se encuentran:

- **Ruido Gaussiano**

El valor final del píxel es el real más una cierta cantidad de error. Produce pequeñas variaciones en la imagen, suele ser debido a los componentes electrónicos como sensores o digitalizadores, el espectro de energía es constante para todas las frecuencias donde se afecta a la imagen completa y la intensidad de todos los píxeles se ve alterada.

Figura 12. Influencia del ruido gaussiano según la varianza

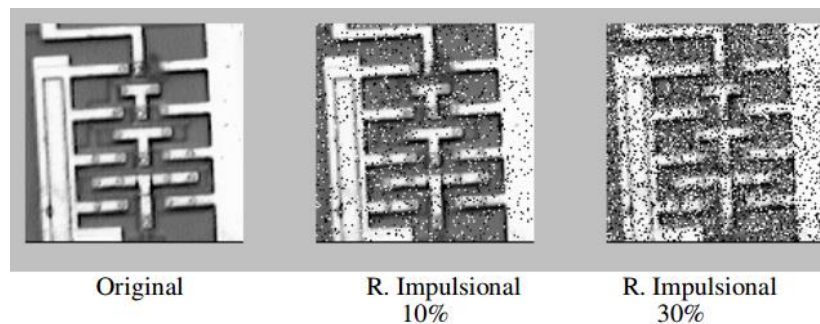


(Tomado de la referencia [23]).

- **Ruido Impulsional**

También llamado ruido de “sal y pimienta” pues en este caso el pixel toma valores que no tienen relación con el valor ideal, tomando valores muy altos y muy bajos [23].

Figura 13. Imagen original, con ruido Impulsional del 10% y 30%



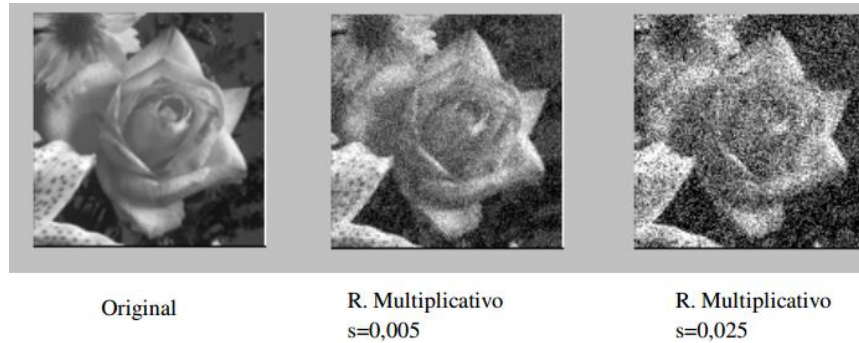
(Tomado de la referencia [23]).

- **Ruido Uniforme**

Este tipo de ruido es el que afecta a la imagen siguiendo una distribución uniforme. La probabilidad de tomar cualquier valor de gris de dentro de un intervalo definido es constante. Se encuentran dos clases, el frecuencial donde la

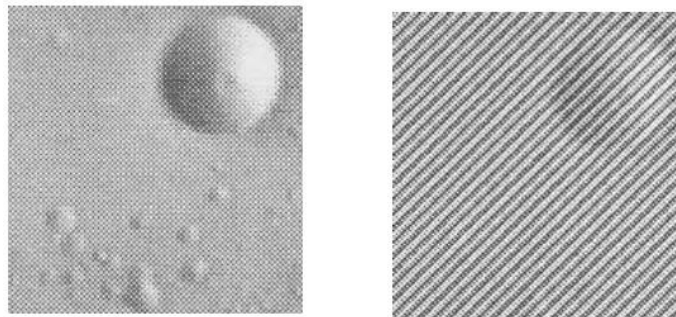
imagen obtenida es la real más una interferencia de señal periódica. Y el ruido uniforme multiplicativo en el cual la señal obtenida es fruto de la multiplicación de dos señales. En la Figura 14 se muestra un ejemplo para cada tipo de ruido Uniforme [23].

Figura 14. Ejemplo de Ruido uniforme Multiplicativo.



(Tomado de la referencia [23])

Figura 15. Ejemplo de Ruido uniforme frecuencial.



(Tomado de la referencia [23]).

2.5.3 Procesamiento del Ruido El ruido uniforme frecuencial fue uno de los procesados durante la ejecución de este proyecto. Los principales objetivos para procesar el ruido en imágenes digitales son:

- **Suavizar la imagen:** Reducir las variaciones de intensidad entre píxeles vecinos.

- **Eliminar ruido:** Modificar aquellos píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente del de sus vecinos.
- **Realzar la imagen:** Aumentar las variaciones de intensidad, allí donde se producen.
- **Detectar bordes:** Detectar aquellos píxeles donde se produce un cambio brusco en la función intensidad [23].

2.5.4 Tipos de filtros

- **Dominio espacial:** En este dominio encontramos los filtros de orden y los filtros de medias. Los de orden realizan el filtrado según la moda, la media o valores máximos y mínimos del pixel según como se requiera. En los filtros de medias pueden ser lineales y no lineales. En los lineales se utiliza la media geométrica, armónica, contra-armónica y un método de Gauss.
- **Dominio frecuencial:** En este dominio encontramos los filtros que se trabajan normalmente en electrónica, como lo son los filtros pasa-bajo, pasa-alto, pasa-banda y rechaza-banda o notch. El funcionamiento es el mismo, se le aplica la transformada de Fourier bidimensional a la imagen a tratar y teniendo su versión en frecuencia se eliminan las bandas que no se necesitan y que interfieren en la visualización óptima de la imagen [23].

3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

Para hacer posible el desarrollo del presente trabajo de grado, se llevaron a cabo las etapas de construcción del montaje experimental, caracterización y calibración del sistema de variación del aire, diseño de algoritmos de sincronización, tratamiento de imágenes y análisis de resultados. Estas se detallarán en las siguientes secciones.

3.1 CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.

Para la construcción del montaje experimental, se realizaron pruebas con un láser de Helio-Neón con baja potencia y de longitud de onda 632.8 [nm] que es uno de los instrumentos con los cuales cuenta el laboratorio de óptica y tratamiento de señales GOTS ubicado en la sede principal de la Universidad Industrial de Santander.

Como se observó en la sección 0, es necesario utilizar tres cámaras a lo largo de la propagación del haz, donde las dos primeras son empleadas para encontrar el movimiento del spot causado por el efecto del bandeo. Seguidamente se realiza una proyección de éste efecto a la tercera cámara, y así se consigue una estimación en un plano a la misma distancia que la cámara más lejana. Obtenido lo anterior, es posible comparar estos resultados con los obtenidos en la cámara tres a distintos ambientes atmosféricos variados por la velocidad del aire y midiendo la variación de temperatura y humedad.

Cada cámara se conecta a un computador independiente para ejercer su control y garantizar el sincronismo a la hora de tomar datos. Seguidamente este programa

se enlaza con Matlab para la adquisición de las matrices que componen cada imagen y realizar el procesamiento digital.

Se utilizan dos filtros de densidad neutra con el fin de atenuar la intensidad del láser y no llegar al límite de saturación de las cámaras. Al igual se usaron dos divisores de haz para poder visualizar el frente de onda en las dos primeras cámaras continuando su trayectoria hacia la tercera.

Entre la distancia de la segunda y tercer cámara, se usó un Turbulador donde se inyectan por un extremo corrientes de aire en el régimen turbulento, ubicado de forma que la corriente de aire suministrada vaya para el primer caso de forma longitudinal con el Turbulador y para el segundo caso de forma transversal a la propagación del haz como se muestra en la Figura 16 y Figura 17 respectivamente, esto con el fin de observar las variaciones que tiene el spot en los dos casos descritos.

Figura 16. Montaje Experimental de forma Longitudinal.

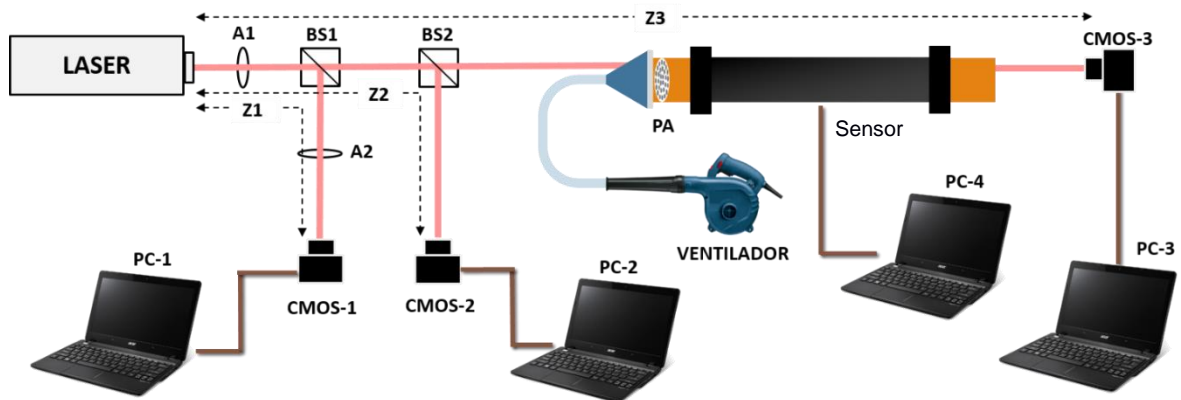
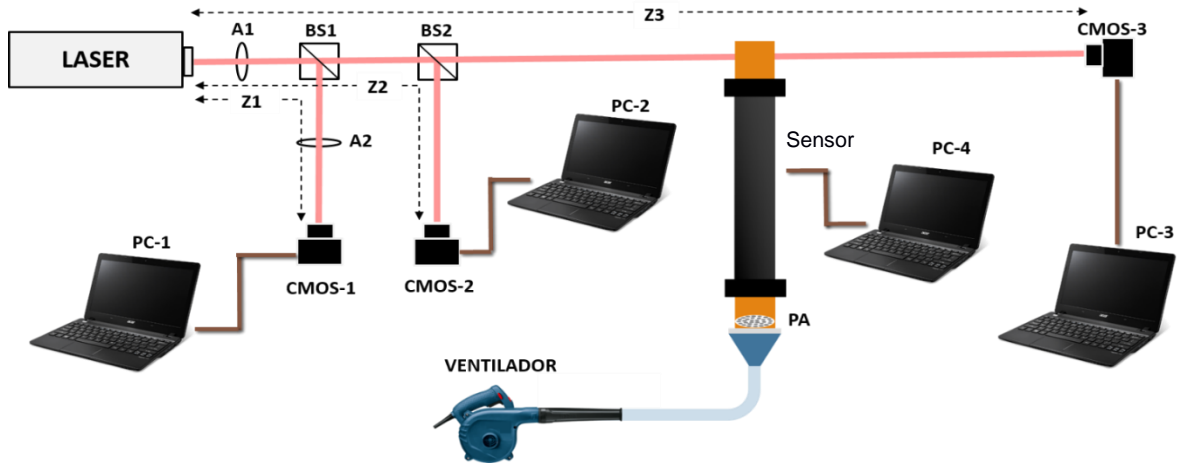


Figura 17. Montaje Experimental de forma Transversal.



Donde en la Tabla 3 se describen cada uno de los elementos:

Tabla 3. Elementos utilizados en los montajes experimentales del proyecto.

| Elemento | Nombre |
|-------------|---|
| A1 | Primer filtro de densidad neutra |
| A2 | Segundo 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 |
| PA | Rejilla de Panal de abejas |
| PC-1 a PC-4 | Los cuatro (4) computadores usados en el proyecto |

El tiempo de exposición y la distancia correspondiente de la apertura de salida del haz láser para cada una de las cámaras se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Tiempo de exposición y distancia de cada cámara.

| | CMOS-1 | CMOS-2 | CMOS-3 |
|---------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Distancia [cm] | 118 | 145 | 397 |
| Tiempo de exposición [ms] | 0,29 | 0,0706 | 0,25 |

Las dimensiones y ubicación del Turbulador desde la apertura de salida del haz láser se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones y ubicación del turbulador

| Largo [cm] | Diámetro interno [cm] | Diámetro externo [cm] | Distancia al láser [cm] |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 132 | 7 | 9,7 | 166 |

El instrumento utilizado para inyectar aire es un ventilador centrífugo como el que se muestra en la Figura 18a. el cual es un aparato compuesto de un rodete de aletas que gira dentro de una carcasa espiral, suministrando aire de forma más definida que los ventiladores axiales a través de toda la región de propagación.

Debido a que las dimensiones de salida del aire del ventilador y el diámetro del turbulador son diferentes se opta por realizar un acople por medio de un embudo y un tubo flexible, de tal manera que el aire se propague a través de éste e ingrese al turbulador sin que interfieran con la trayectoria del haz. Para minimizar movimientos caóticos en el inicio del turbulador se implementa una rejilla con agujeros pequeños en forma de panal de abejas, como la que se muestra en la Figura 18b, para así garantizar un perfil de aire definido a lo largo del turbulador. Otra utilidad de este acoplamiento es que el ventilador se aleja del sistema turbulador evitando que su motor produzca vibraciones indeseadas al montaje óptico.

Figura 18. a) Ventilador Centrífugo. b) Rejilla acoplada al turbulador.



Se utiliza un microcontrolador ATMEGA328P-PU de la compañía Atmel y la plataforma Arduino para realizar la adquisición de los datos de los sensores y a la vez para el sincronismo temporal de estos con las cámaras CMOS. En el ANEXO se muestra con detalle las principales características y componentes del microcontrolador utilizado.

El sensor de flujo durante las pruebas se ubica al extremo final del turbulador, haciendo la medida cerca de la última cámara (CMOS-3). Los sensores de humedad y temperatura debido a sus pequeñas dimensiones se colocan en el interior del turbulador.

3.2 CALIBRACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA PARA LA VARIACIÓN DEL AIRE.

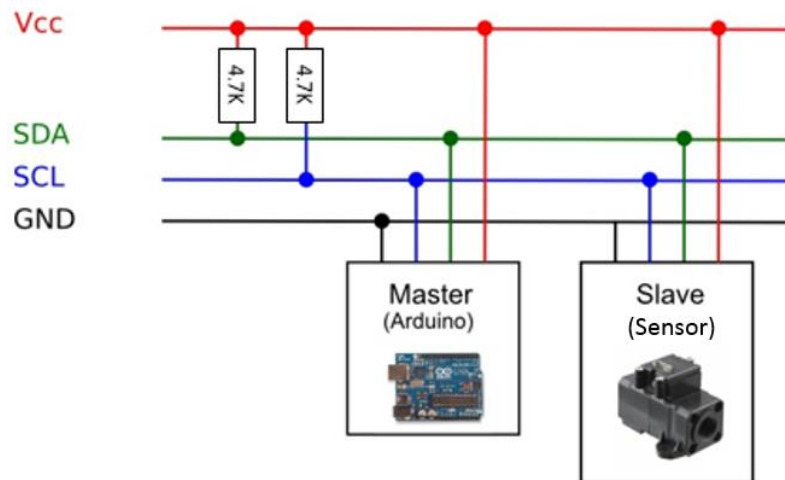
3.2.1 Algoritmo de adquisición del sensor de flujo El medidor con el cual se sensa el aire que circula por el turbulador, es un sensor de flujo de masa de aire por micropuente de la compañía Honeywell, cómo se describió en la sección 0 y 0.

Debido a que los resultados que arroja el sensor son digitales, se utiliza un microcontrolador para interpretar los datos de protocolo de comunicación I2C y

obtener las variaciones de velocidad presentes en el ambiente en una pantalla de una computadora.

En la **Figura 19** se muestra el esquema de conexión que se utilizó para establecer la comunicación a través del protocolo I2C.

Figura 19. Comunicación I2C.



(Tomado de la referencia [24])

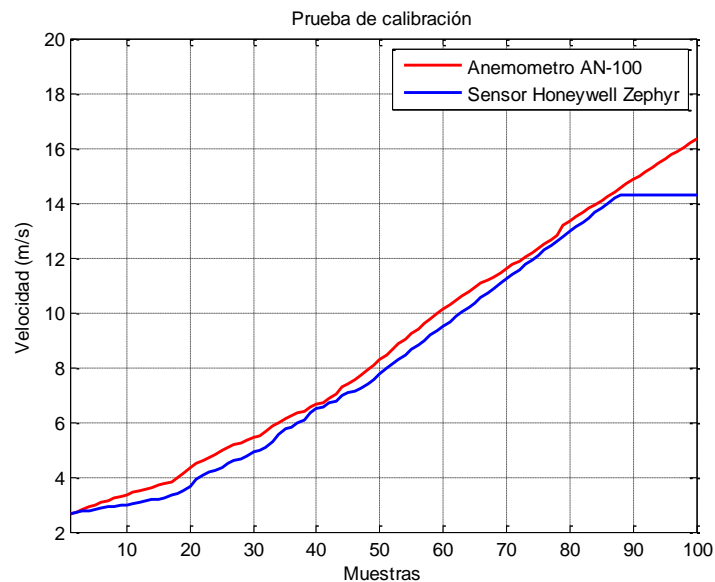
Las dos líneas del bus están en un nivel lógico alto cuando están inactivas. El valor de los resistores de polarización no es muy crítico, puede ser desde 1.8KΩ a 4.7KΩ. Un valor menor de resistencia incrementa el consumo de los integrados pero disminuye la sensibilidad al ruido y mejora el tiempo de los flancos de subida y bajada de las señales.

3.2.2 Calibración La calibración se realiza con el termo-anemómetro digital de la compañía EXTECH debidamente calibrado, el cual es utilizado como instrumento patrón [25]. Esta herramienta de calibración fue facilitada por la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad industrial de Santander.

Para ejecutar la calibración, se toman datos desde un flujo mínimo de aire (3,17 m/s) hasta el máximo que puede medir el sensor de flujo, que son 50 litros por minuto estándar (SLPM) o aproximadamente 14,3 metros por segundo (m/s).

La prueba se hace variando la velocidad del ventilador centrifugo utilizado y tomando las medidas en el sensor y en el anemómetro seguidamente, haciendo que pase el aire a la misma velocidad, el algoritmo de control de velocidad se ejecuta por medio de la plataforma Arduino la cual va guardando los datos a medida que se va variando la velocidad. Con esto se obtiene de la Figura 20 la curva para cada instrumento.

Figura 20. Curvas de calibración del sensor



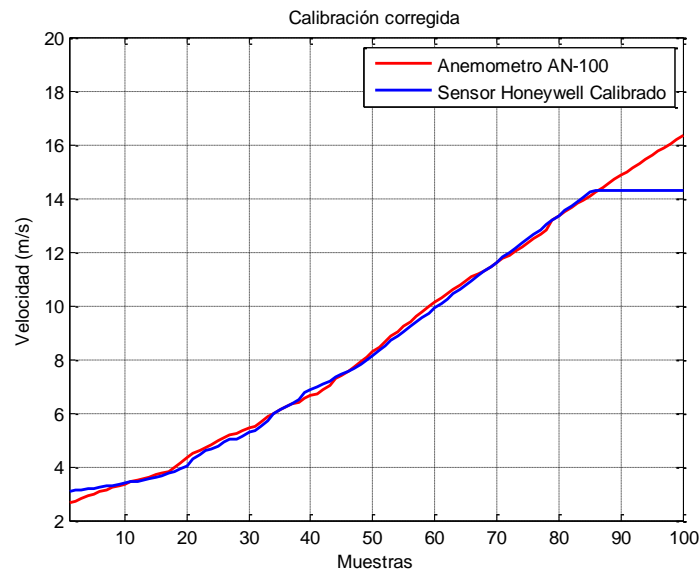
Después de tomados los datos y evidenciar las diferencias entre el sensor y el instrumento patrón, donde se obtiene una diferencia hasta el 6,26% en el caso más crítico; se procede a realizar un ajuste de la curva obtenida por el sensor. Aplicando corrección de ganancias y cruce por cero se obtiene la siguiente ecuación.

$$Y = 0,9961X + 0,4458 \quad (7)$$

Donde **Y** serán los valores calibrados del sensor, y **X** los obtenidos antes de la calibración.

En la Figura 21 se muestra la nueva curva del sensor después de la calibración comparada con la obtenida por el anemómetro digital.

Figura 21. Curvas del instrumento patrón y sensor calibrado



Como se puede evidenciar en la anterior figura, los valores del sensor se ajustan a los del anemómetro digital utilizado como instrumento patrón de calibración, obteniendo con esto una diferencia de 0,2% para el peor de los casos.

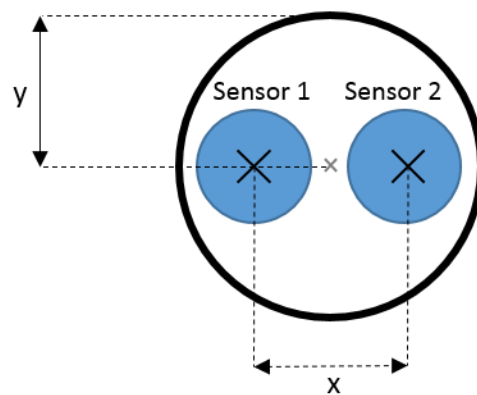
Con esto se puede garantizar que el sensor utilizado está debidamente calibrado. Calibrado el sensor, se procede a hacer la respectiva caracterización del turbulador.

3.2.3 Caracterización de la estructura para la variación del aire. Es de gran importancia conocer el comportamiento que tiene el aire dentro del sistema turbulador, por esto es pertinente caracterizar este a distintas velocidades de aire y en los tres ejes de coordenadas espaciales (X,Y,Z). En ésta caracterización se varía la potencia de consumo del ventilador, con el fin de inyectar las mismas velocidades en las pruebas que se realizan para cada eje, siendo en total nueve velocidades distintas.

- **Caracterización del turbulador en el eje X**

Estas pruebas se realizan colocando dos sensores de flujo de aire en el extremo final del turbulador tomando dos datos simultáneos en la posición X, dejando la posición fija Y en 0 (véase la Figura 22). De modo que es posible evidenciar la diferencia de flujo que hay en dos puntos del eje X, los sensores fueron separados una distancia de 3,6 centímetros entre ellos, y ambos a la misma distancia del centro del turbulador.

Figura 22. Ubicación de los sensores para la caracterización en el eje X.



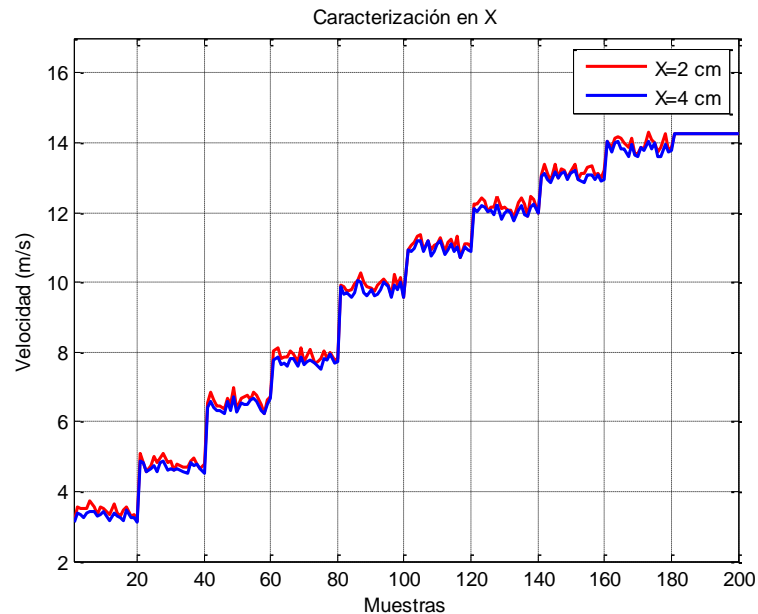
Donde:

$X = 3,6 \text{ cm}$, Y

$= 3,8 \text{ cm}$

En la Figura 23 se muestran los resultados obtenidos para esta calibración, donde se hace un barrido de velocidades y cada velocidad se mantiene constante durante 20 segundos.

Figura 23. Caracterización del Turbulador en el eje X

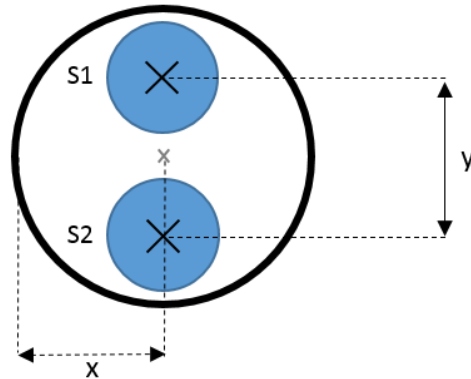


Como se puede observar, la diferencia de velocidad durante la prueba en las dos posiciones X no supera los 0,5 m/s, obteniendo resultados esperados.

- **Caracterización del Turbulador en el eje Y**

Estas pruebas se realizan colocando dos sensores de flujo de aire en el extremo final del turbulador tomado dos datos simultáneos en la posición Y, dejando la posición fija X en 0 (véase la Figura 24). Se usa una configuración similar a la caracterización del turbulador en el eje X, sólo sobre un giro de 90° de la posición de los sensores sobre el plano de medida.

Figura 24. Ubicación de los sensores para la caracterización en el eje Y

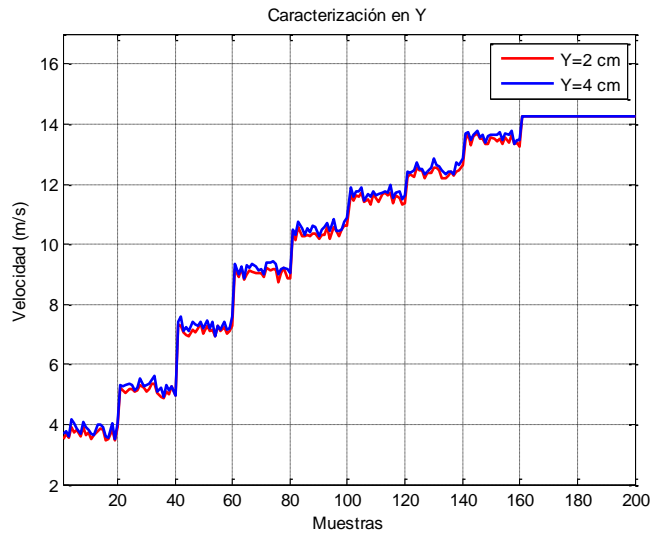


Donde:

$X = 3,8 \text{ cm}$, $Y = 3,6 \text{ cm}$

En la Figura 25 se muestran los resultados obtenidos para esta caracterización, donde se hace un barrido de velocidades y cada velocidad se mantiene constante durante 20 segundos.

Figura 25. Caracterización del Turbulador en el eje Y.



Al igual que en el eje X, las variaciones en el eje Y no superan los 0,5 m/s, haciendo que el aire a lo largo de este eje se mantenga a una velocidad definida.

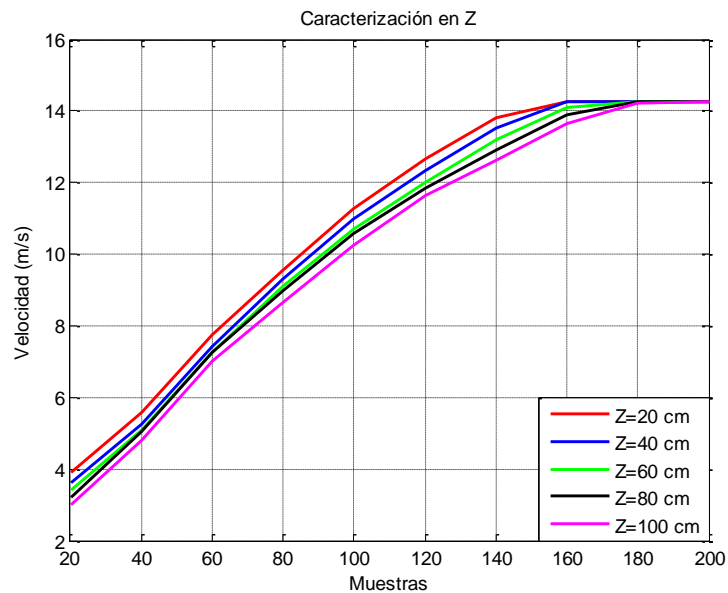
- **Caracterización del turbulador en el eje Z**

Esta última prueba de caracterización se realiza dejando el sensor en una posición fija de X, Y y variándolo a lo largo del eje de propagación del aire (Z), tomando 5 posiciones y haciendo una misma variación de la velocidad del aire en cada una.

$$Z_1 = 20 \text{ cm}, Z_2 = 40 \text{ cm}, Z_3 = 60 \text{ cm}, Z_4 = 80 \text{ cm}, Z_5 = 100 \text{ cm}$$

Con esta prueba se obtienen los resultados mostrados en la Figura 26.

Figura 26. Caracterización del Turbulador en el eje Z.



- **Perfil vertical del viento a lo largo del eje Z**

Un fenómeno que se encuentra en la medición de fluidos es el flujo rotacional en tres dimensiones, el cual se produce por números de Reynolds muy altos. Para contrarrestar el efecto rotacional; primero, se debe dejar suficiente longitud entre la entrada de flujo y el medidor para lograr la simetría y segundo, se pueden instalar

secciones de acondicionamiento de flujo (véase en la Figura 27 las secciones representadas con flechas azules). Lo que se quiere con estas medidas de prevención es conseguir que el flujo sea lo más uniforme y simétrico posible [8].

Figura 27. Sección transversal con acondicionamiento de flujo.

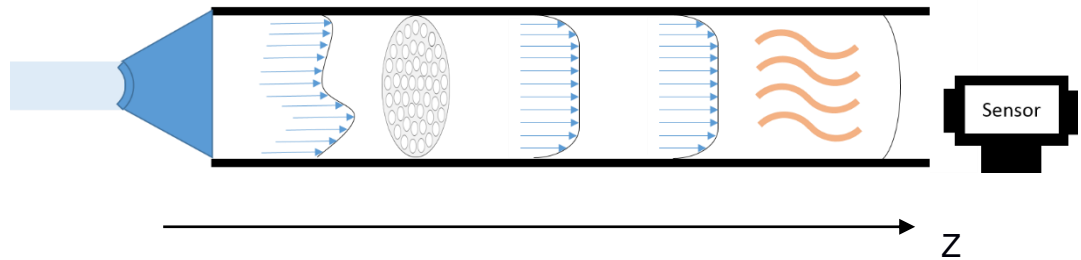
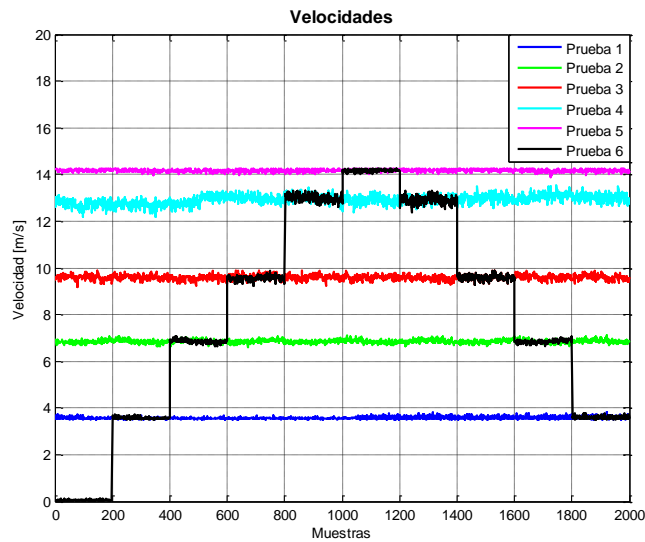


Figura 28. Velocidades del aire obtenidos en las pruebas.



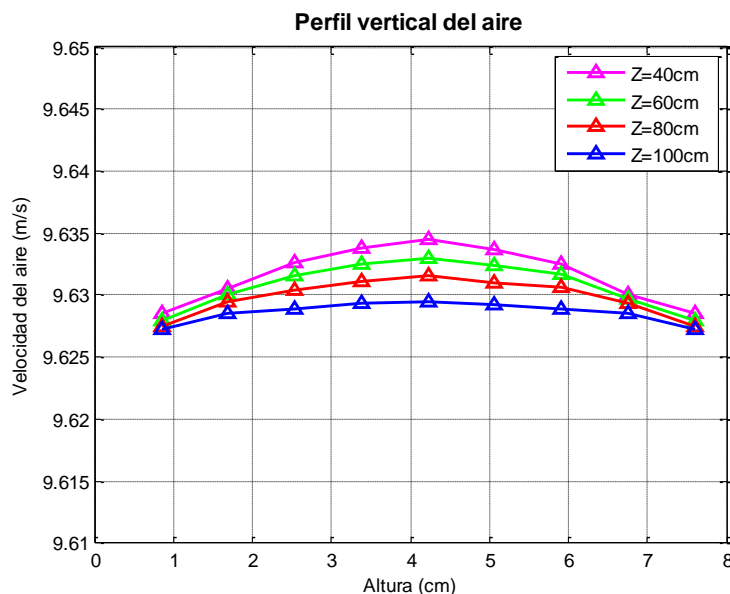
La Figura 28 representa las velocidades del aire correspondientes a las 6 pruebas que se realizan a lo largo del proyecto, donde se observan flujos de aires constantes y estables, garantizando uniformidad a lo largo del tiempo.

Para cada prueba que se efectuó en este proyecto, se tuvo en cuenta las mediciones de temperatura y humedad relativa presentes en el turbulador. En la

Figura 84 y figura 85 del ANEXO D se muestran los comportamientos de temperatura y humedad respectivamente para cada una de las pruebas realizadas.

La representación gráfica que muestra como la velocidad de un fluido varía de acuerdo con el diámetro de la sección de superficie de referencia que lo contiene se denomina “perfil de velocidades de flujo”. En la Figura 29 se muestra la representación de la variación del viento con respecto a la altura, donde se ubica el sensor de flujo en diferentes puntos del área transversal de la sección de pruebas de manera perpendicular al flujo, para evidenciar el comportamiento del viento en la sección transversal seleccionada.

Figura 29. Perfil vertical del aire a lo largo del eje Z.



3.3 ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE LAS CÁMARAS, SINCRONIZACIÓN DE SENSORES Y CAPTURA DE DATOS.

3.3.1 Algoritmo de adquisición de las cámaras Cada cámara se conectó a una computadora independientemente y fue posible tener control de estas. Seguidamente este programa se enlaza con Matlab por medio del comando

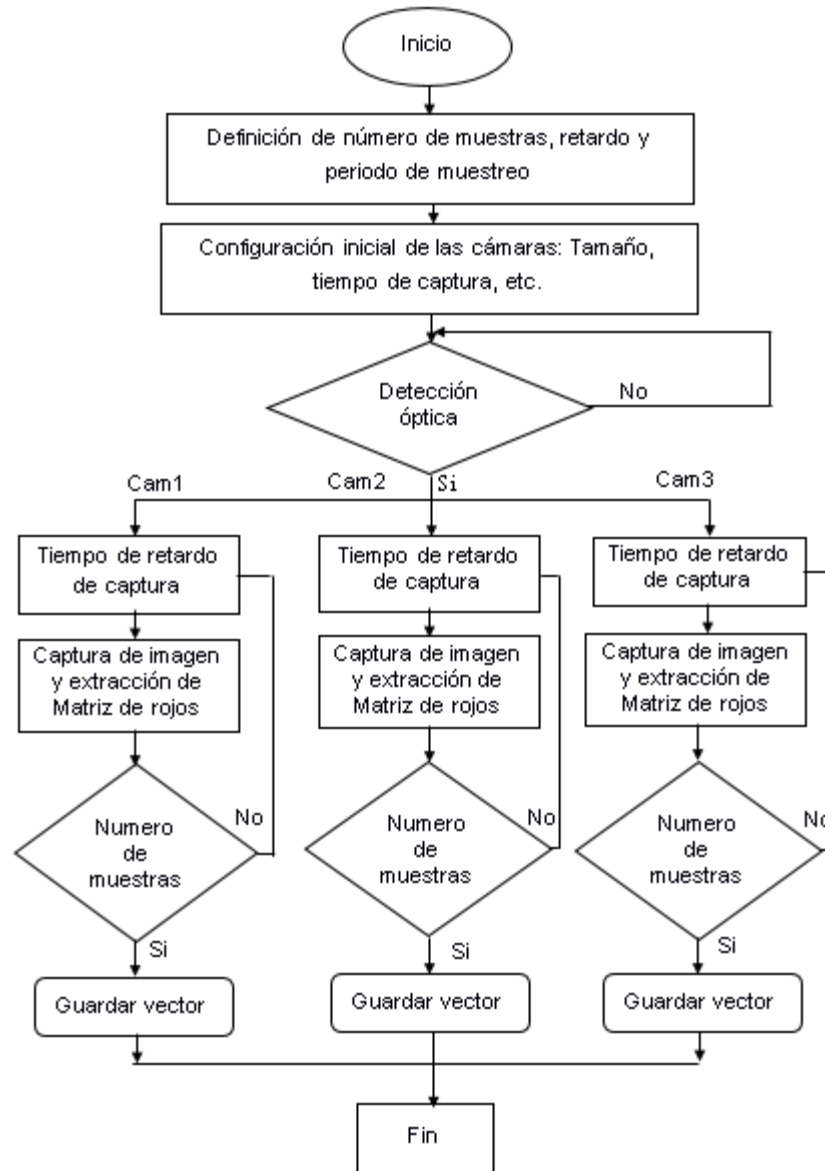
actxcontrol y a su vez se tendrá control de todos los parámetros y características de la cámara.

El proceso que se realiza para la captura de las imágenes en las cámaras, se describe en el diagrama de flujo de la figura 30. Para la configuración inicial de cada cámara se tuvo en cuenta la distancia de cada una de estas con respecto a la salida del haz, y de igual forma la cantidad de elementos que cruza éste.

Se adquieren 2000 muestras en cada prueba con el fin de garantizar el sincronismo en los datos y cumplir con el teorema de atmósfera congelada de Taylor [26].

El algoritmo implementado para la adquisición de imágenes puede ser consultado en el ANEXO .

Figura 30. Diagrama de flujo del código de adquisición de las cámaras



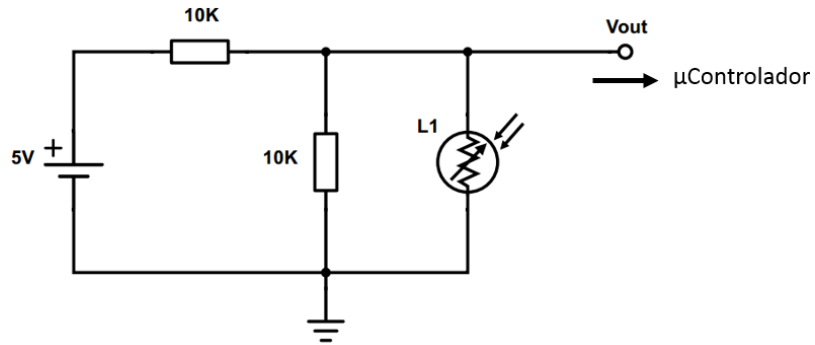
3.3.2 Sincronización de sensores En este proyecto se utilizan tres cámaras y un sensor de flujo, a los cuales fue asignado un equipo de cómputo en cada dispositivo, buscando paralelización en la toma de datos. Las diferencias de tiempos de sincronización cumplen con la teoría de atmósfera congelada descrita por Taylor, en el cual la evolución temporal de las pantallas de fase es válida para pequeñas escalas de tiempo inferiores a los 100 milisegundos, de esta manera,

se garantiza que los datos obtenidos fueron tomados bajo las mismas condiciones atmosféricas [26].

Después de hacer pruebas de sincronismo, se toma la decisión de realizar pruebas de 2000 muestras para la adquisición de datos e imágenes que se procesan y analizan sucesivamente, pues los equipos de cómputo con los que se cuentan garantizan sincronía menor a 100ms con este número de pruebas. Esta limitación se debe a varios factores, pero el principal a tener en cuenta es la diferencia de procesadores que posee cada computadora, unos con más potencia, núcleos, o memoria que otros. Para nuestro caso se usaron cuatro computadoras con procesador Intel, dos con Core i5, y dos con Core i3.

Una etapa importante para garantizar simultaneidad al momento inicial de la adquisición es la de sincronizar los datos registrados por los sensores con las matrices capturadas por las cámaras. La solución se da realizando una sincronización óptica, diseñando un circuito electrónico el cual enviara una tensión al microcontrolador que varía inversamente proporcional a la intensidad de luz percibida por una fotorresistencia o LDR por sus siglas en inglés (light-dependent resistor), el cual es un componente electrónico cuya resistencia disminuye con el aumento de intensidad de luz incidente. En la figura 31 se muestra el circuito implementado para garantizar la sincronización inicial de la toma de datos de los sensores con las cámaras.

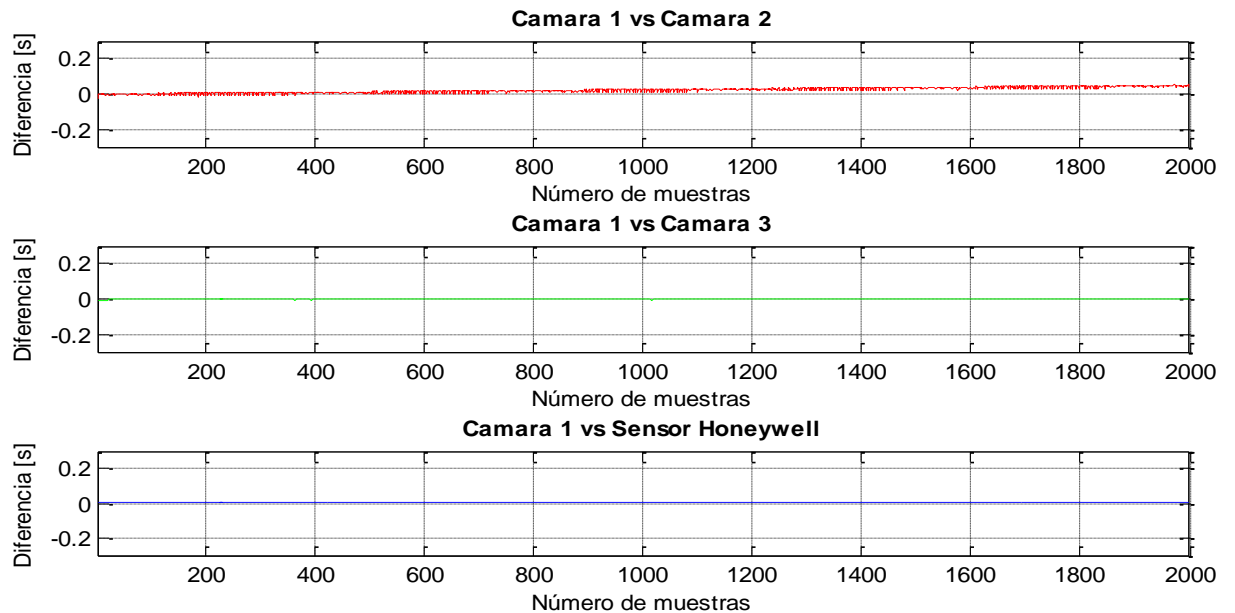
Figura 31. Esquemático del circuito de inicialización para los sensores.



En el ANEXO es posible evidenciar la condición que se utiliza para que el microcontrolador ejecute la captura de datos y los registre en el PC, guardándolos simultáneamente en un archivo de texto generado por Hyperterminal.

En la Figura 32 se observa una prueba donde se toman los tiempos de adquisición de cada sensor en enviar cada dato de las 2000 muestras a las computadoras y se comparan unos con otros, garantizando que la diferencia entre los dispositivos no supere los 100ms.

Figura 32. Sincronización previa



En el primer gráfico se tiene una comparación de los tiempos obtenidos por la cámara 1 y la cámara 2 durante las 2000 muestras tomadas. Es posible evidenciar que a medida que se avanza en la toma de datos, incrementa la diferencia, pero después de transcurrir la totalidad de las muestras, dicha diferencia no supera los 0,1 segundos, garantizando así la hipótesis de atmósfera congelada [26].

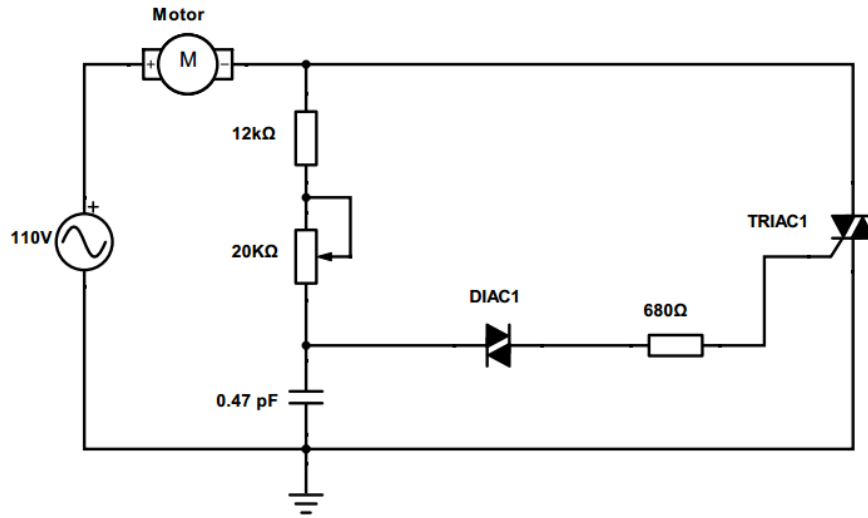
Para el caso del gráfico número dos y número tres, donde se comparan las cámaras 1 y 3, y la cámara 1 con el tiempo de captura de los sensores, es posible observar que su diferencia es casi despreciable, siendo muy cercanos a cero y garantizando así un nivel de sincronismo alto.

Después de realizada esta prueba se inicia la captura de datos.

3.3.3 Captura de datos Se deciden hacer cinco pruebas a diferentes velocidades de aire, una prueba patrón en la cual no se inyectó aire, solo a condiciones normales de laboratorio, y luego una prueba variando las velocidades del aire durante las 2000 muestras cada 200 segundos.

Para controlar la velocidad de aire se diseñó un circuito electrónico, para modificar la potencia que consume el ventilador centrífugo, y así su eje gire de forma que suministre el aire a la velocidad deseada. En la Figura 33 se muestra el esquemático del circuito implementado.

Figura 33. Esquemático regulador de potencia del ventilador.



En la **Tabla 6** se muestran las pruebas que se realizaron con la respectiva potencia de consumo del ventilador para que generara una velocidad de aire constante.

Tabla 6. Especificaciones de las pruebas realizadas.

| Prueba | Velocidad [m/s] | Desv. Estandar [m/s] | Potencia [W] | Muestras |
|----------|-----------------|----------------------|--------------|----------|
| Patrón | 0 | 0 | 0 | 2000 |
| Prueba 1 | 2,99 | ±0,11 | 54,12 | 2000 |
| Prueba 2 | 6,26 | ±0,12 | 80,56 | 2000 |
| Prueba 3 | 9,63 | ±0,17 | 137,29 | 2000 |
| Prueba 4 | 12,57 | ±0,13 | 183,37 | 2000 |
| Prueba 5 | 14,26 | ±0,03 | 230,99 | 2000 |
| Prueba 6 | 0 a 14,26 | ±0,14 | 0 a 230,99 | 2000 |

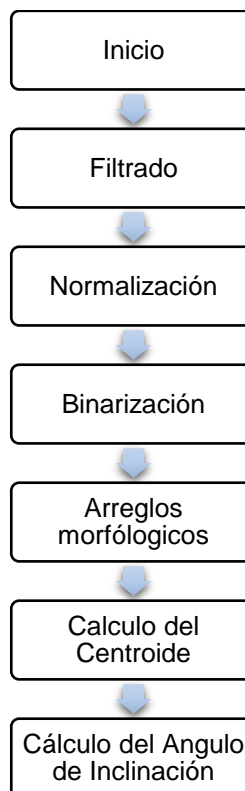
Como se observa en la Tabla 6 desde la Prueba 1 a la Prueba 5 se fijan velocidades de aire distintas para cada caso teniendo en el peor de los casos una desviación máxima de 0,17 m/s. Para la Prueba 6 se hace un barrido de velocidades desde un estado apagado hasta el valor máximo donde se satura el sensor, esto de forma ascendente cada doscientas muestras; seguidamente se

hace el proceso inverso hasta llegar a la velocidad mínima generada por el ventilador centrífugo (Prueba 1).

3.4 TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

El principal objetivo de este trabajo es analizar el movimiento del centroide y el ángulo que forma este movimiento con respecto al eje de propagación, pero previamente es necesario realizar un tratamiento digital de imágenes que ayude a obtener resultados óptimos. En la Figura 34 se muestra la progresión o secuencia de pasos que se llevaron a cabo para procesar las imágenes, donde al final se obtiene el centroide de cada muestra y así poder verificar el movimiento que tiene cuando se le inyectan distintas velocidades de aire.

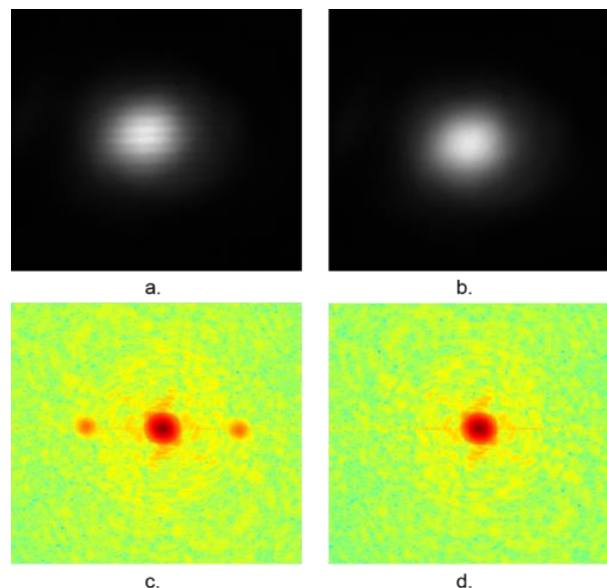
Figura 34. Secuencia de tratamiento de imágenes.



3.4.1 Inicio El inicio del diagrama es la adquisición de la matriz con los pixeles que tienen la información del color rojo de la imagen que se captura y se pasa a escala de grises. El color rojo que se da es debido a la longitud de onda del haz láser. Al visualizar esta matriz, se observan algunas franjas propias del dispositivo, debido al filtro de protección antes de que entre el haz láser al sensor CMOS.

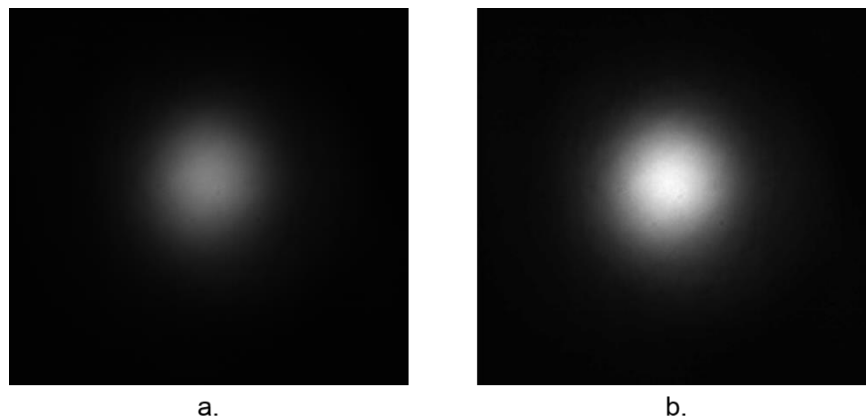
3.4.2 Filtrado Después de observar las franjas que aparecen en la imagen y al tener en claro los tipos de ruidos que pueden tener las imágenes, se decide aplicar el algoritmo de la Transformada rápida de Fourier en dos dimensiones (fft2) para observar el spot del haz en el dominio frecuencial. En este dominio aparecen dos dominios frecuenciales asociadas a las franjas en diagonal, donde se identifican las regiones afectadas, se sustraen y se visualiza la nueva imagen en el dominio espacial (véase la Figura 35).

Figura 35. a) Imagen original. b) Imagen Filtrada empleando FFT2. c) Espectro frecuencial de la imagen original. d) Espectro en frecuencia de la imagen filtrada.



3.4.3 Normalización En este paso se escala el valor de intensidad del haz, de modo que los pixeles más claros del spot se iluminen mucho más, sin alterar su forma. Es decir, se reajusta el rango de valores dentro de la matriz, permitiendo una ecualización del histograma, donde el más alto sea 255 y el más pequeño se mantenga igual. En la Figura 36 se muestra el spot antes y después de pasar por el proceso de normalización.

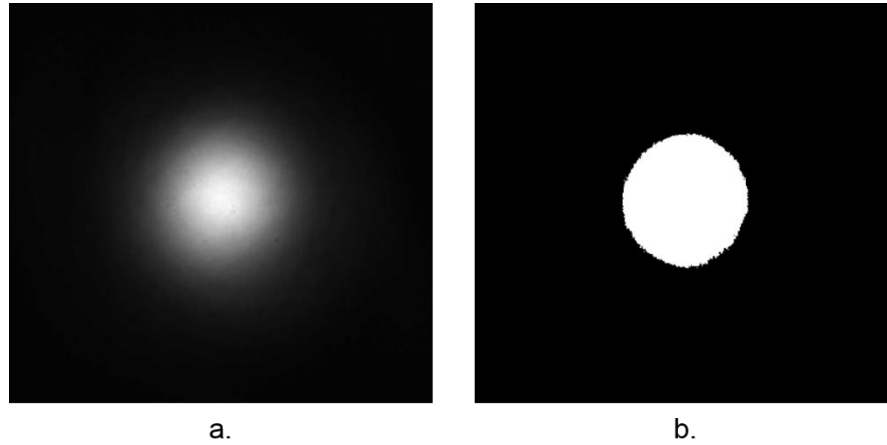
Figura 36. a) Imagen sin Normalizar. b) Imagen Normalizada



3.4.4 Binarización La Binarización consiste en una reducción de información en la que los únicos valores posibles son verdadero y falso (1 y 0). En caso de una imagen digital los valores verdadero y falso corresponden a dos colores: blanco y negro. Siendo 1 el máximo valor de la matriz que en una imagen de 8 bits representa el nivel de gris 255. Lo que quiere decir que en la nueva imagen se mostraran máximos y mínimos dependiendo del valor de umbral y de la intensidad del pixel [27]. Para este caso el umbral usado es de $\frac{1}{e^2}$, lo cual es aproximadamente 0,1353 o 13,5%, valor que corresponde al diámetro teórico del haz. Con esto se eliminan algunas intensidades que no interesan a la hora de realizar el análisis.

En la Figura 37 se muestra un ejemplo de Binarización aplicado al spot ya filtrado y normalizado.

Figura 37. a) Imagen sin binarización. b) Imagen con binarización.



3.4.5 Arreglos morfológicos. La morfología se refiere al estudio de las figuras y ha sido utilizada para interpretar la estructura o forma de objetos en imágenes. Las operaciones de morfología matemática son muy utilizadas en imágenes binarias para la eliminación de regiones pequeñas que muchas veces son originadas por el ruido.

Para realizar arreglos morfológicos es necesario aplicar operadores los cuales se crean al hacer interactuar la imagen con un conjunto especial, denominado elemento estructurante. Este es una forma simple, pre-definida, representada como una imagen binaria, que se utiliza para probar otra imagen binaria en las operaciones morfológicas, tales como erosión, dilatación, apertura y cierre [27].

Para el caso de este trabajo se aplicó erosión y dilatación con un elemento estructurante cuadrado de tres por tres píxeles, ósea una matriz de dimensiones 3x3 rellena de unos. A continuación se explican cada una de estas operaciones

➤ **Erosión.**

Es una de las operaciones básicas de morfología. Se emplea para separar regiones débilmente unidas o para eliminar pequeños detalles. Tras la erosión

quedan únicamente las formas más significativas de las regiones dependiendo del elemento estructurante utilizado. En la Figura 38 se muestra el spot antes y después de aplicar erosión con un elemento estructurante que consta de un cuadro de 3x3 [27].

Figura 38. a) Imagen original. b) Imagen erosionada.

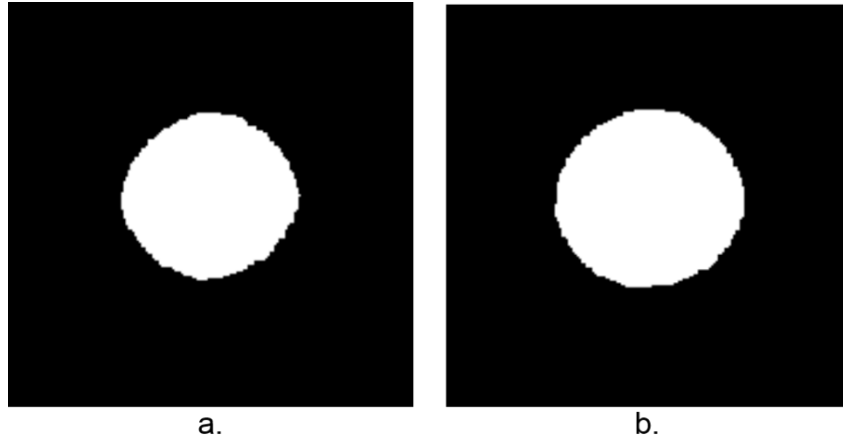


➤ Dilatación

La dilatación es una operación de morfología muy utilizada y, como su nombre indica, recrece el tamaño de las regiones. Resulta muy útil para rellenar agujeros o cuando interesa unir regiones próximas que en la imagen se han podido separar por una deficiente binarización [27].

En la figura 39 se muestra el spot antes y después de aplicar dilatación con un elemento estructurante que consta de un cuadro de 3x3 píxeles

Figura 39. a) Imagen original. b) Imagen dilatada.



Las operaciones de erosión y dilatación pueden utilizarse combinadamente para llevar a cabo operaciones de filtrado. La dilatación seguida de erosión se utiliza para rellenar agujeros espurios, por eso se la llama cierre, y la erosión seguida de dilatación se emplea para eliminar píxeles aislados y desconectar regiones débilmente unidas, por eso se la llama apertura [27].

Con lo anterior se puede afirmar que el proceso que se está aplicando al spot que se obtiene por cada una de las cámaras es una operación de apertura, y así obtener la región de la imagen que es de mayor interés.

Después de aplicarle procesos morfológicos a las imágenes, se procede a calcular el centroide para cada una de ellas.

3.4.6 Centroide El centroide o centro de masa es el punto en el cual se puede considerar concentrada toda la masa de un objeto o de un sistema. Mediante la ponderación de esos valores con las coordenadas cartesianas X y Y, haciendo posible calcular el centro de masa de la imagen. En la Figura 40 se muestra el spot de haz láser debidamente tratado con su respectivo centroide.

Figura 40. a) Spot debidamente tratado. b) Spot con centroide.



3.4.7 Angulo de inclinación Después de calcular el centroide para cada una de las muestras de las diferentes pruebas, el siguiente paso es calcular el cambio del ángulo de inclinación con respecto al eje de propagación. Esto se realiza calculando primero la magnitud de la diferencia de distancias entre la muestra n y n-1. Y conociendo la distancia desde la cavidad del haz hasta la cámara, se aplica la siguiente ecuación.

$$\phi = \text{Arcant} \left(\frac{R_3}{Z_3} \right) \approx \frac{R_3}{Z_3} \quad (8)$$

Donde:

ϕ : Angulo de inclinación del centroide

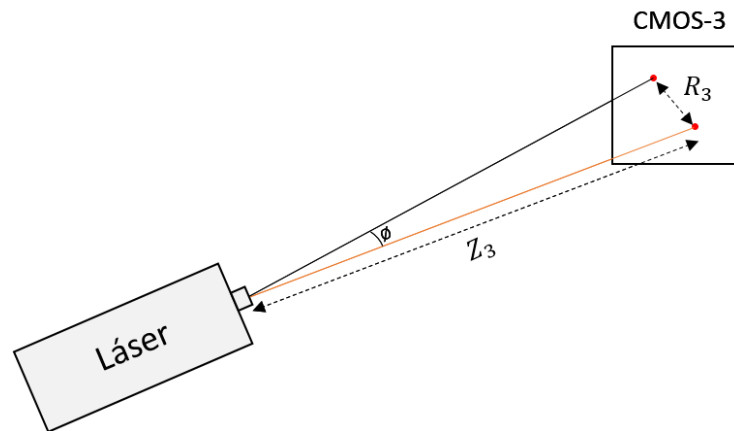
Arcant: Función trigonométrica arcotangente.

R3: distancia entre el centroide de la muestra n y n-1.

Z3: distancia del haz láser hasta la cámara 3.

En la Figura 41 se muestra la forma en que se calculó el ángulo descrito anteriormente.

Figura 41. Descripción del ángulo del movimiento del centroide.



3.5 ANALISIS Y RESULTADOS.

3.5.1 Resultados de Sincronización. Para verificar la simultaneidad de cada una de las pruebas tomadas, es conveniente primero verificar y analizar los resultados de sincronización realizados. Una vez adquiridas las muestras de los montajes experimentales en cada uno de los casos de estudio, se procede a verificar la sincronía de las muestras, con el fin de determinar que el retardo de captura se encuentre en un rango inferior a 100 ms (hipótesis de turbulencia congelada), en la tabla 7 se muestran la diferencia de tiempos promedio para cada una de las pruebas tomadas, comparando los tiempos de captura entre cada uno de los dispositivos de adquisición.

Tabla 7. Tiempos de sincronismo para cada prueba.

| Pruebas | | PC-1 vs PC-2 [ms] | | PC-1 vs PC-3 [ms] | | PC-1 vs PC-4 [ms] | |
|--------------|----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|
| | | Tiempo | Desv Estd | Tiempo | Desv Estd | Tiempo | Desv Estd |
| Patrón | | 21,20 | 11,09 | 13,24 | 0,95 | 1,62 | 0,84 |
| Longitudinal | Prueba 1 | 20,53 | 13,65 | 7,57 | 1,50 | 2,80 | 0,81 |
| | Prueba 2 | 33,64 | 15,34 | 0,66 | 0,61 | 3,98 | 0,68 |
| | Prueba 3 | 29,40 | 14,89 | 6,07 | 0,69 | 7,70 | 0,74 |
| | Prueba 4 | 14,19 | 9,15 | 6,92 | 2,70 | 8,69 | 0,79 |
| | Prueba 5 | 23,58 | 10,60 | 13,12 | 2,82 | 0,71 | 0,62 |
| | Prueba 6 | 32,34 | 15,25 | 5,93 | 1,13 | 0,80 | 0,58 |
| Transversal | Prueba 1 | 20,44 | 13,66 | 10,67 | 1,19 | 4,26 | 0,93 |
| | Prueba 2 | 32,57 | 15,27 | 13,15 | 0,87 | 5,81 | 0,77 |
| | Prueba 3 | 23,49 | 14,35 | 2,18 | 0,95 | 2,71 | 0,68 |
| | Prueba 4 | 20,99 | 14,24 | 9,43 | 0,81 | 0,56 | 0,47 |
| | Prueba 5 | 28,38 | 15,00 | 8,33 | 0,99 | 0,66 | 0,53 |
| | Prueba 6 | 29,33 | 15,00 | 1,38 | 0,99 | 4,35 | 1,04 |

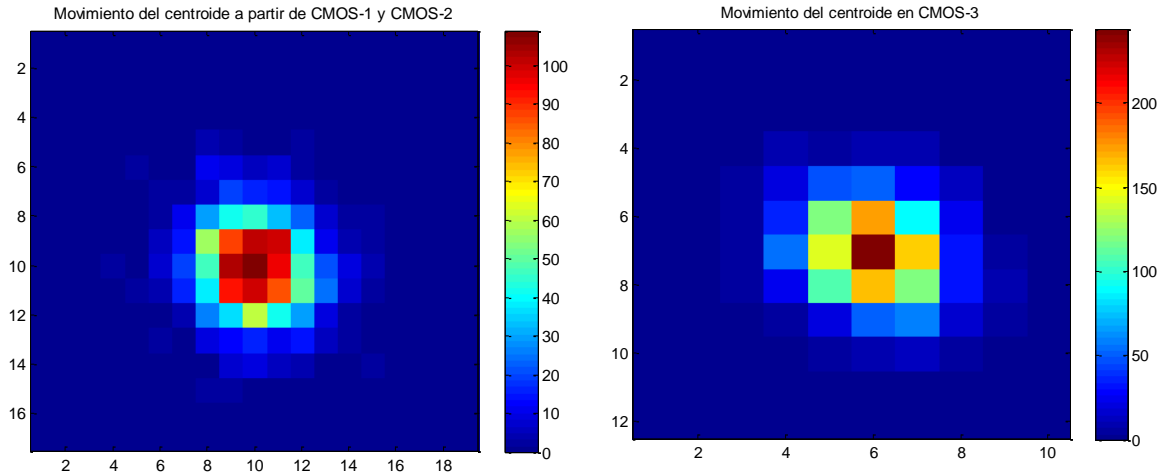
Como se puede observar en la tabla 7 ninguno de los tiempos es superior a 100ms, llegando como máximo a 33,64 ms (naranja) y cumpliendo con la teoría de atmósfera congelada.

3.5.2 Estudio del centroide

Prueba patrón

Para estudiar el efecto de la velocidad del aire en el centroide, se empieza analizando el comportamiento del haz láser en condiciones normales de laboratorio, (denominada Prueba patrón), en donde se toman datos sin alterar las condiciones ambientales dentro del sistema Turbulador. En la Figura 42 se comparan los resultados obtenidos por la cámara CMOS-3 con los reconstruidos a partir de las cámaras CMOS-1 Y CMOS-2.

Figura 42. Dispersión del centroide a partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda) y visto desde CMOS3 (derecha), obtenido de la Prueba patrón.



En la imagen izquierda de la Figura 42 se observa el centroide reconstruido en un plano en la misma distancia que la CMOS3 a partir de las cámaras CMOS1 y CMOS2 teniendo en cuenta los efectos de intra-cavidad propios del láser, efectuados en la prueba patrón, donde se puede evidenciar que el desplazamiento del centroide describe un comportamiento similar en cuánto al movimiento en pixeles en el eje Y al resultado obtenido en la figura izquierda por medio de la cámara 3. Esto sucede debido a que no se realizan cambios significativos en el entorno atmosférico.

Figura 43. Movimiento radial del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba patrón.

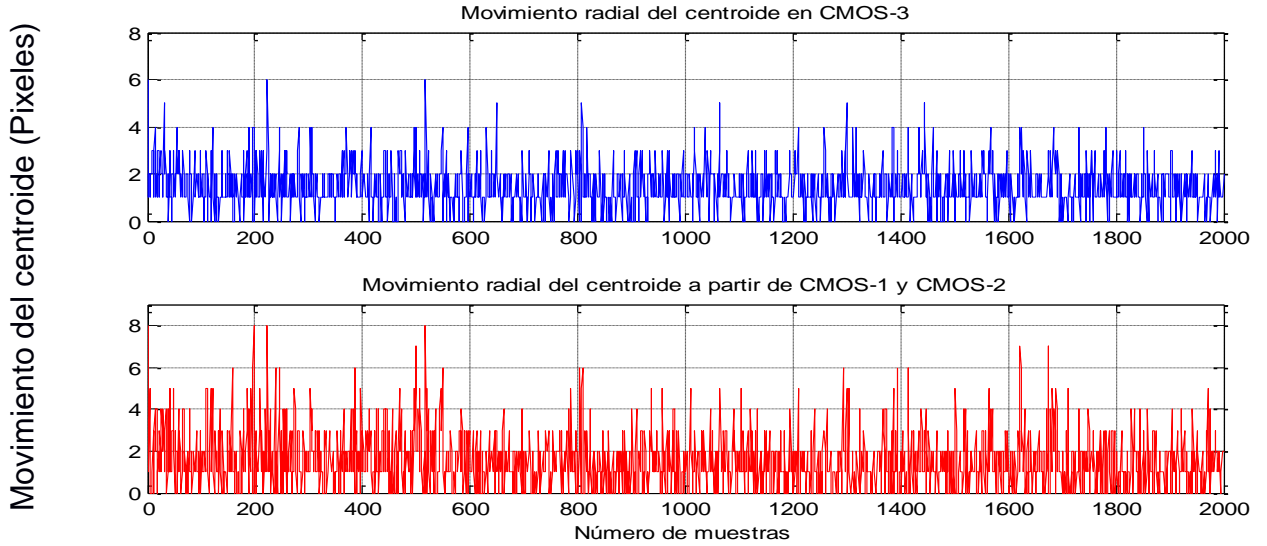


Figura 44. Movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba patrón.

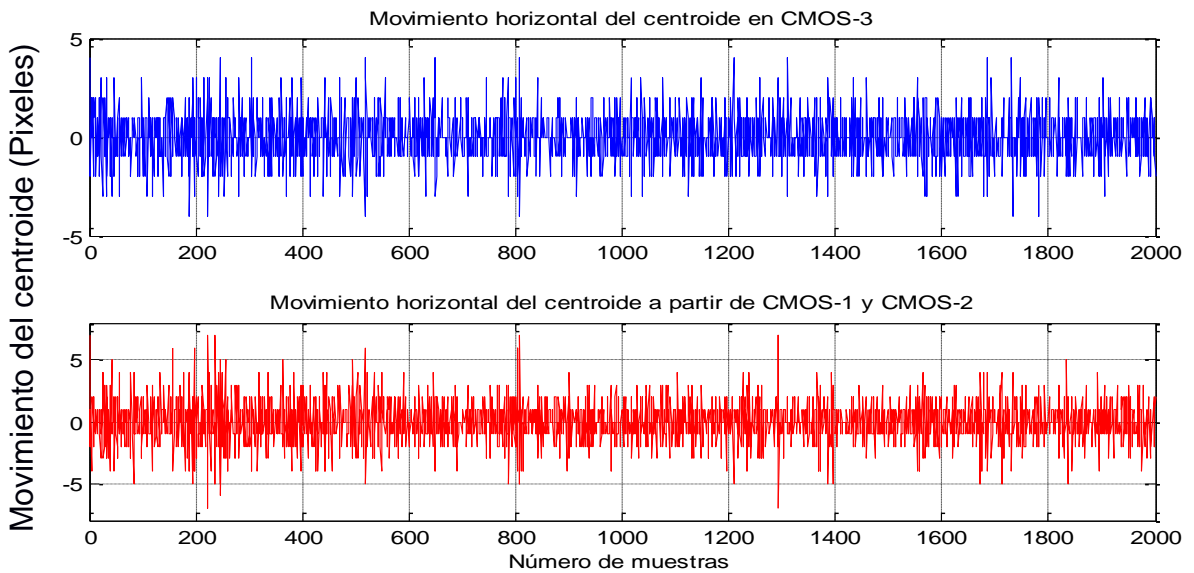
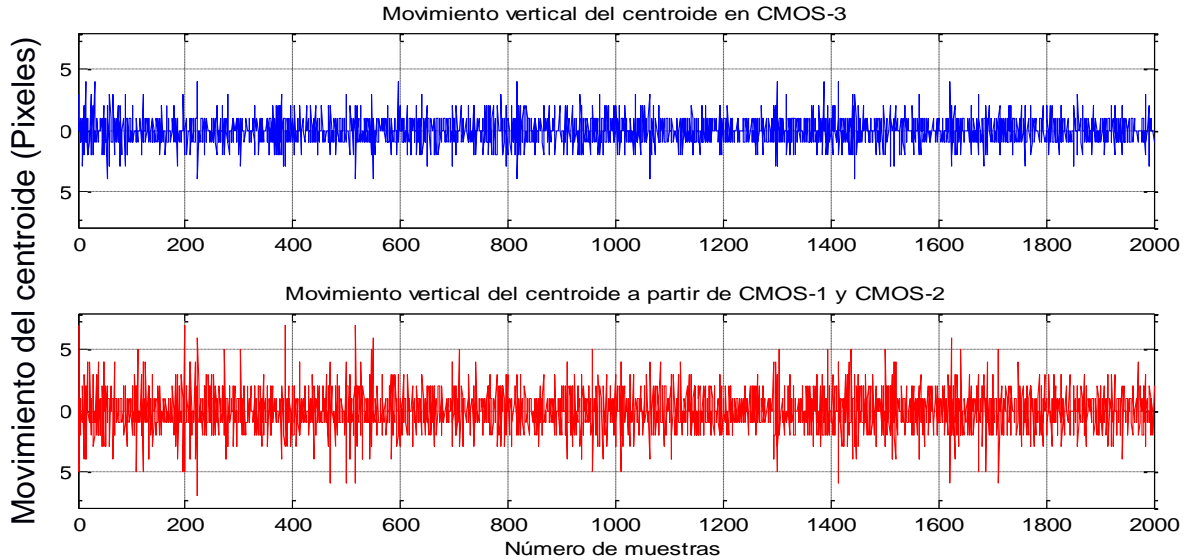


Figura 45. Movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba patrón.



Como se observa en las figura 43, a la Figura 45, para el movimiento radial, horizontal y vertical del centroide respectivamente, las gráficas de color azul representan las fluctuaciones del movimiento del centroide causado por el efecto de bandeo sumado a la turbulencia obtenida en la cámara 3, mientras que las gráficas de color rojo describen la dispersión estimada del movimiento del centroide a partir de las cámaras 1 y 2 proyectados a la distancia de la cámara 3.

Ahora, es posible observar que en los 3 casos las gráficas describen un comportamiento similar con poca variación del movimiento del centroide, pues no hay alteración en el ambiente a la hora de aplicar la prueba.

Figura 46. Ángulo del movimiento del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba patrón.

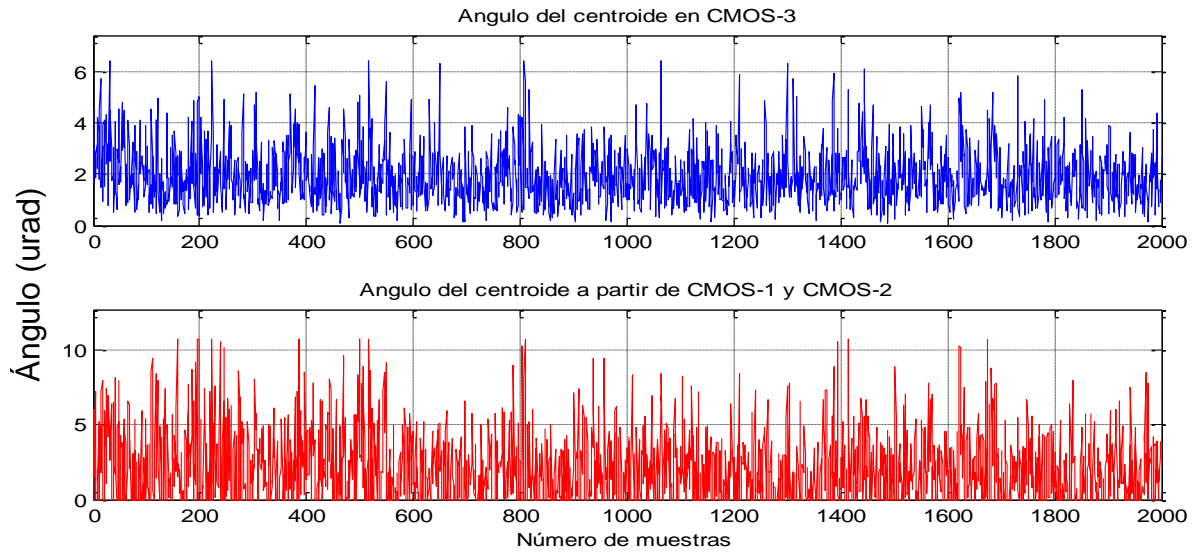


Figura 47. Ángulo del movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba patrón.

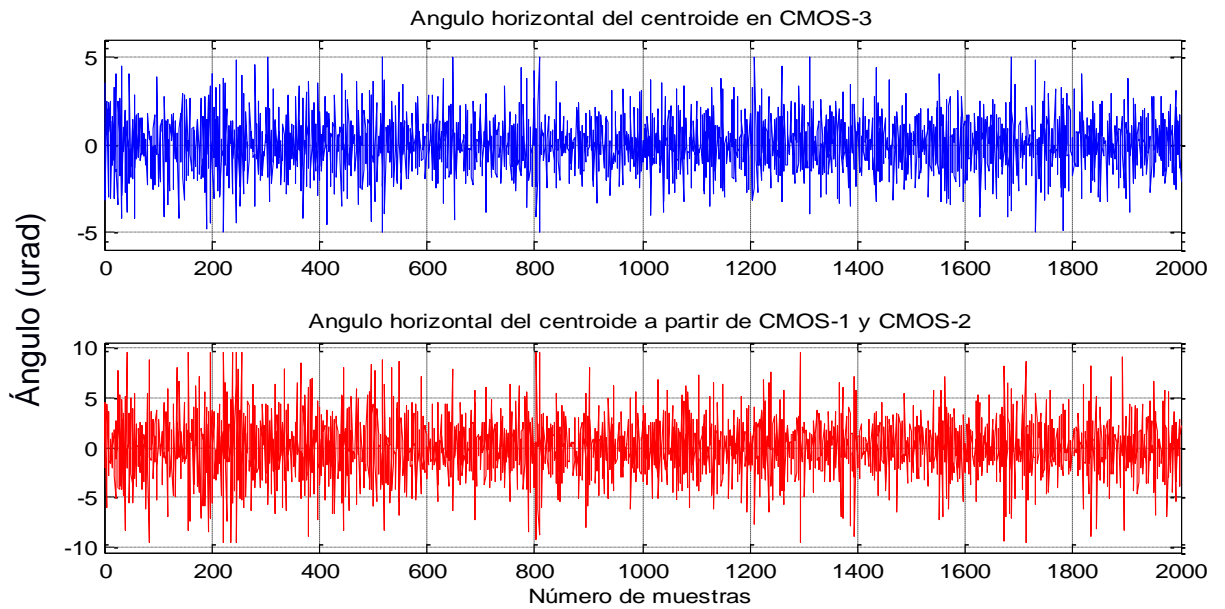
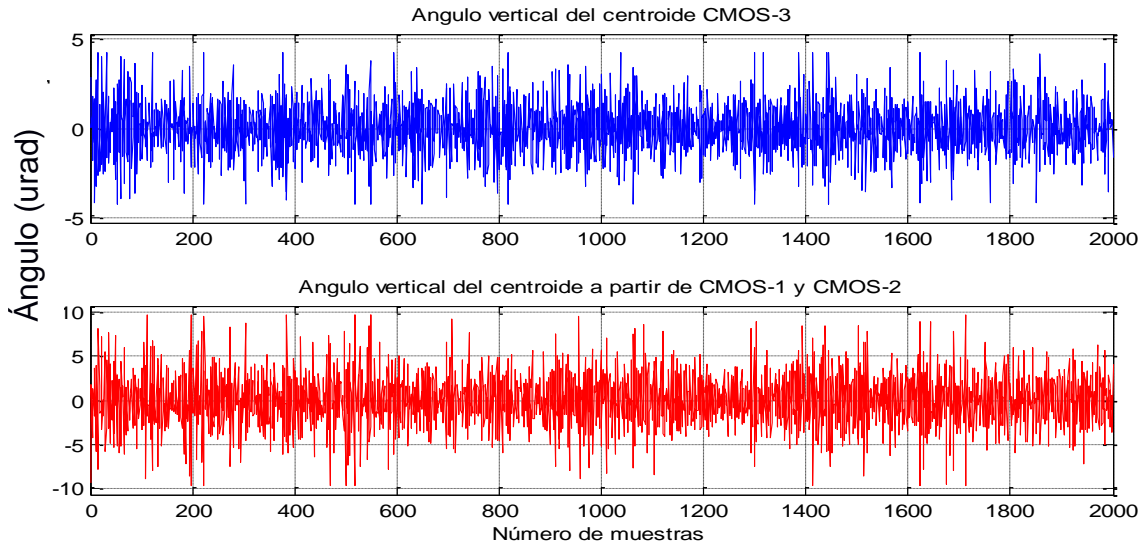


Figura 48. Ángulo del movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba patrón.



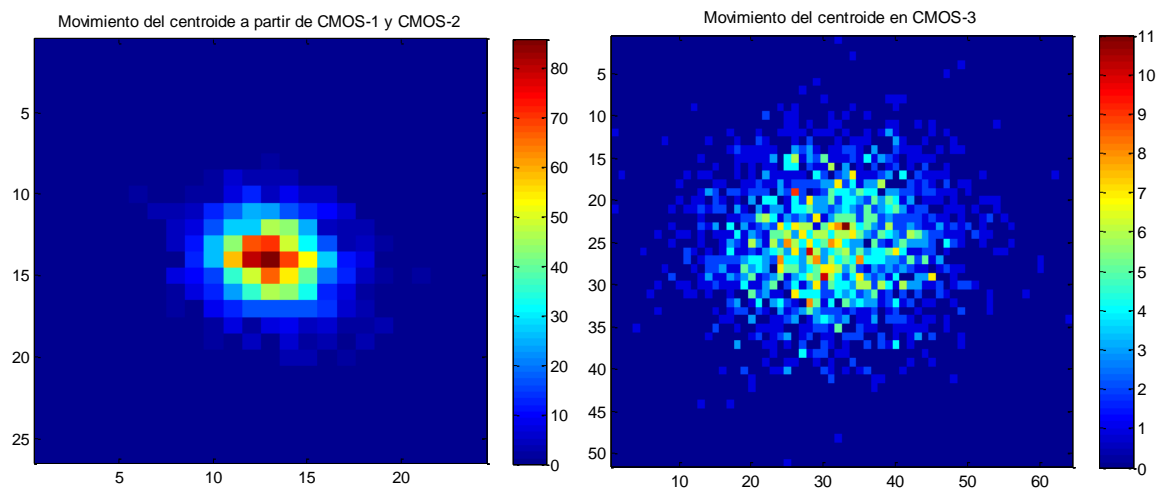
De la Figura 46 a la Figura 48 se pueden observar las diferencias de ángulos formado por el haz láser para la prueba patrón, las gráficas de color azul indican el valor obtenido del ángulo tomadas a partir de la cámara 3, por otro lado, las gráficas de color rojo representan los valores de los ángulos estimados a partir de la cámara 1 y 2 como resultado de aplicar el modelo de efecto de cavidad mencionado en el capítulo anterior y la sección 2.2.

Para este mismo parámetro, se puede evidenciar que las gráficas obtenidas describen un comportamiento similar con pocos cambios significativos para cada uno de los casos presentados. Después de analizar la prueba patrón, se inicia el análisis de los datos adquiridos con el montaje turbulador ubicado de forma longitudinal.

- **Resultados con el turbulador ubicado longitudinalmente**

A continuación se realizan 6 pruebas estipuladas para el montaje con el turbulador ubicado longitudinalmente (Figura 16), donde seguidamente se analiza el movimiento del centroide. En la Figura 49 se muestran los resultados de la cámara 3 y las proyecciones de las cámaras 1 y 2 para la Prueba 5 donde se aplica la máxima potencia al ventilador que registra una velocidad de aire de 14,2 m/s.

Figura 49. Dispersión del centroide a partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda) y visto desde CMOS3 (derecha), obtenido de Prueba 5.



En la imagen de la izquierda de la Figura 49 se puede observar la dispersión en dos dimensiones del centroide generados a partir de las cámaras 1 y 2 proyectados a la distancia de la cámara 3 solo tomando en cuenta los efectos de cavidad del láser, mientras que en la imagen de la derecha se evidencia la dispersión del centroide presente en la cámara 3 causado por el bandeo y el movimiento total efectuado en la Prueba 5.

Como se puede evidenciar en la imagen de la derecha (cámara 3) de la Figura 49 existe un mayor desplazamiento del centroide que en la imagen de la izquierda (cámara 1 y 2) debido a una mayor presencia de flujo turbulento durante la prueba.

Figura 50. Movimiento radial del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5.

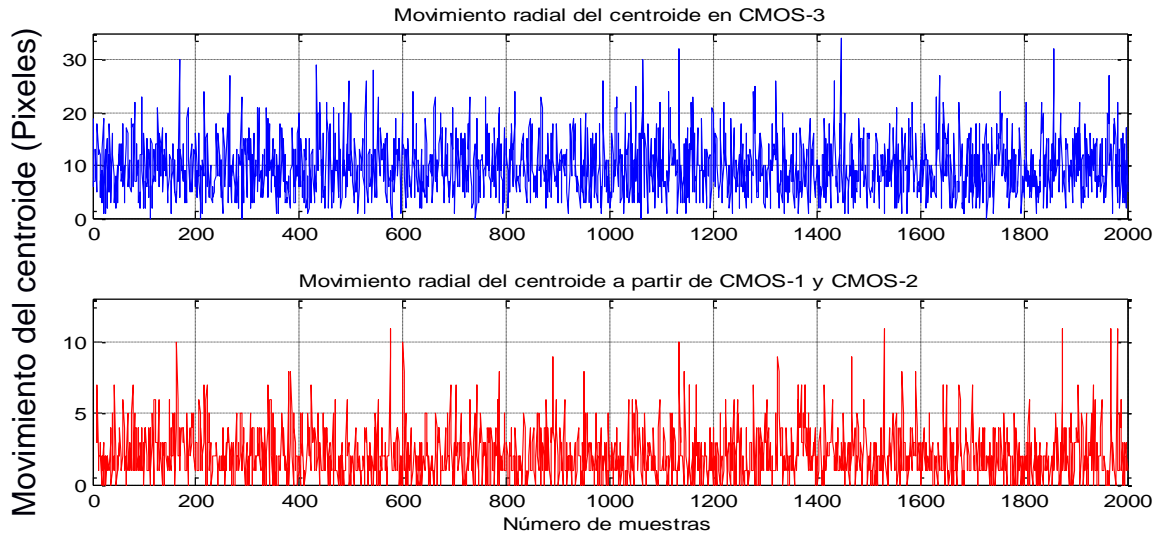


Figura 51. Movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5.

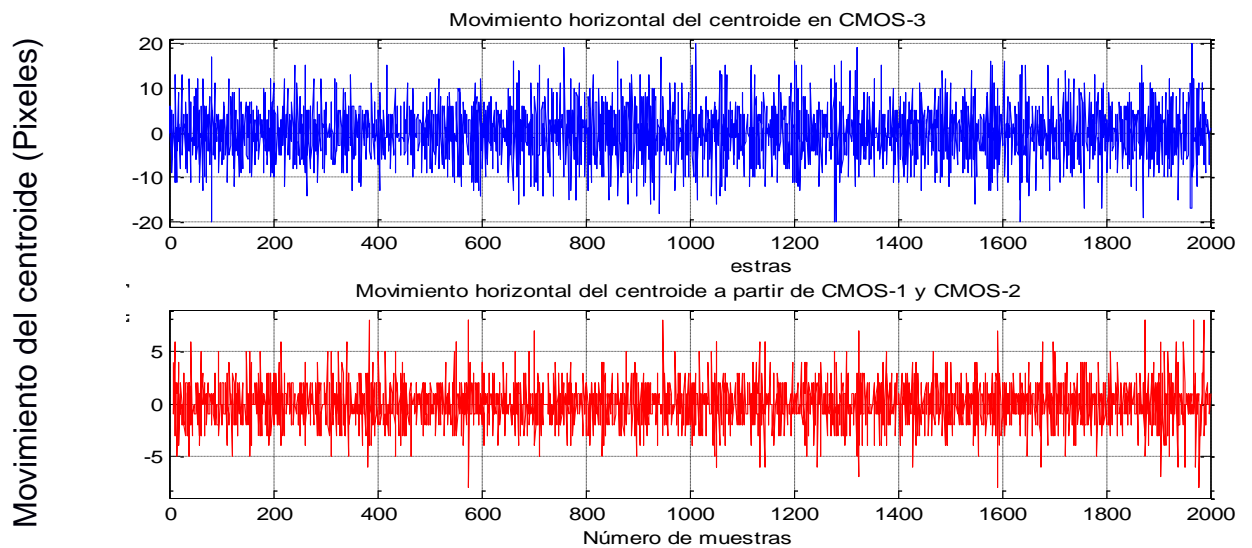
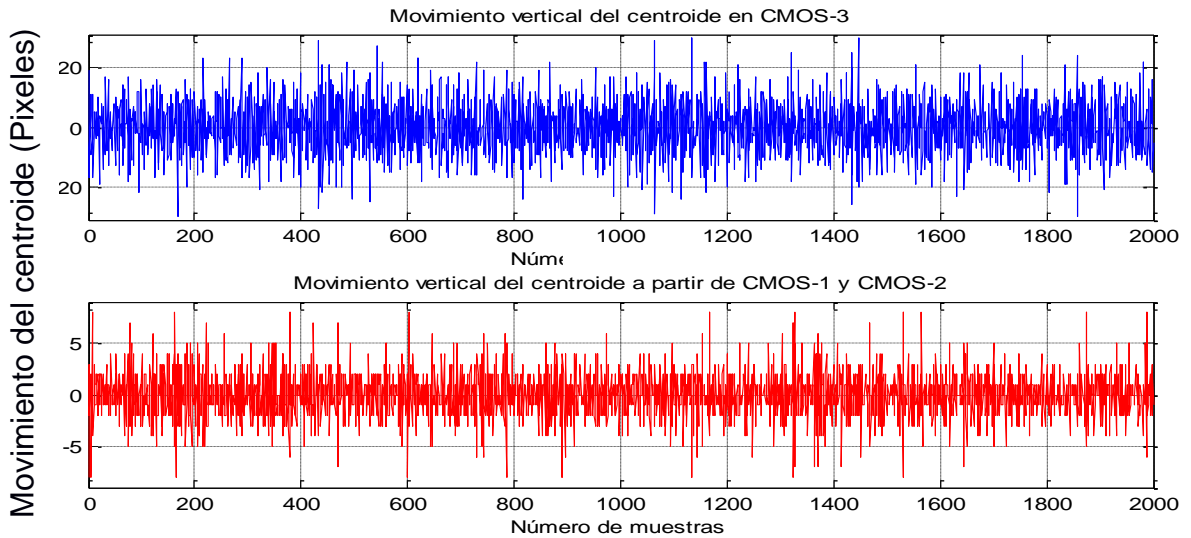


Figura 52. Movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5.



Desde la Figura 50 a la Figura 52 es posible comparar el desplazamiento del centroide de forma radial, horizontal y vertical para cada muestra obtenida por la cámara 3 (azules) y la estimada con las cámaras 1 y 2 (rojas). Para esta prueba se aplica la máxima velocidad al turbulador (14,2 m/s).

Se evidencia que en las gráficas azules se obtiene valores más altos de desplazamiento del centroide que en las gráficas rojas, alcanzando valores hasta de 36 píxeles (Figura 50), mientras que con los resultados obtenidos por la estimación de las cámaras 1 y 2, solamente alcanza a superar los 10 píxeles como máximo, esto para el caso del movimiento radial.

Si se analiza para los otros dos casos, es posible determinar que para esta prueba el centroide tiene mayor movimiento de forma vertical, con un valor máximo de 30 píxeles, mientras que horizontalmente se tiene un desplazamiento máximo de 20 a lo largo del eje.

Figura 53. Ángulo del movimiento del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5.

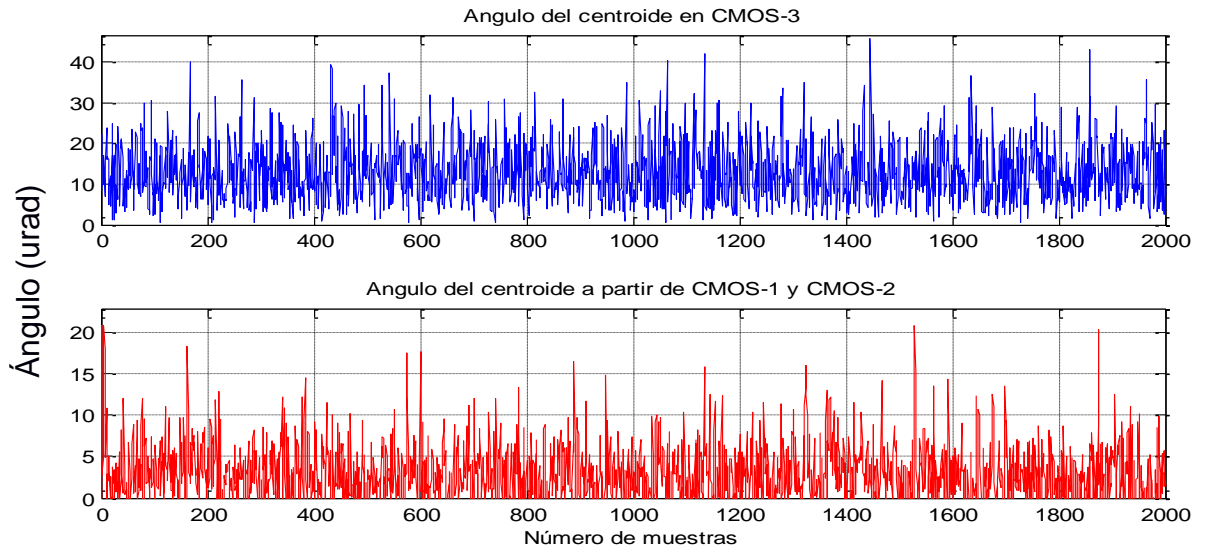


Figura 54. Ángulo del movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5.

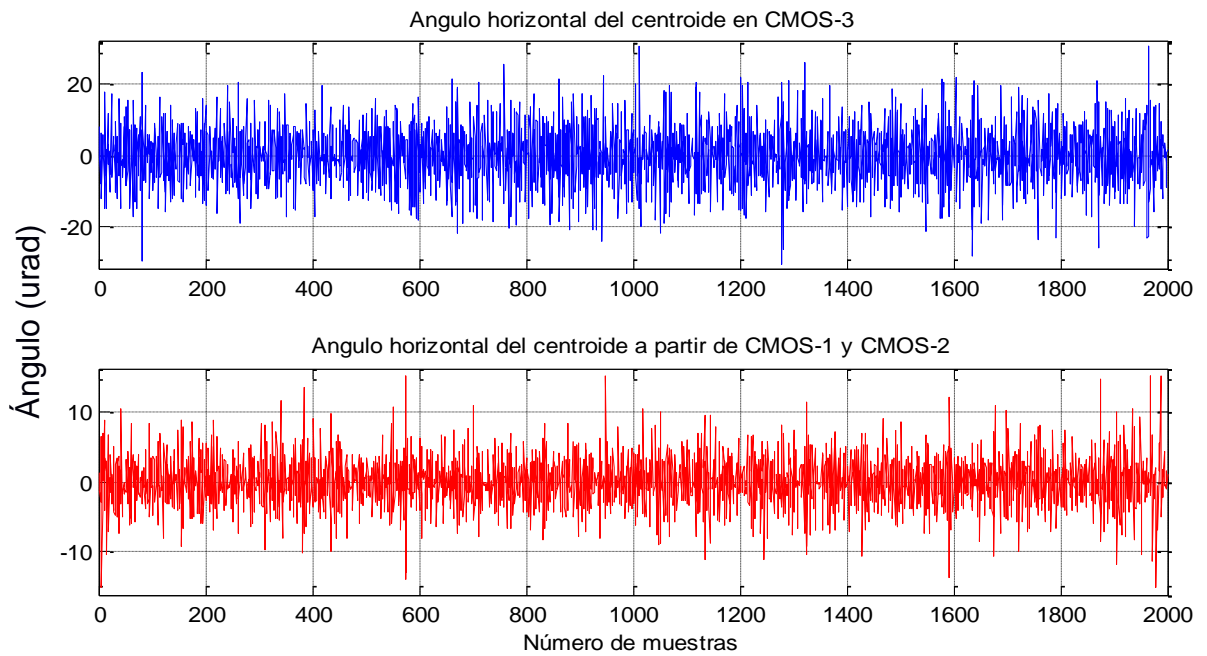
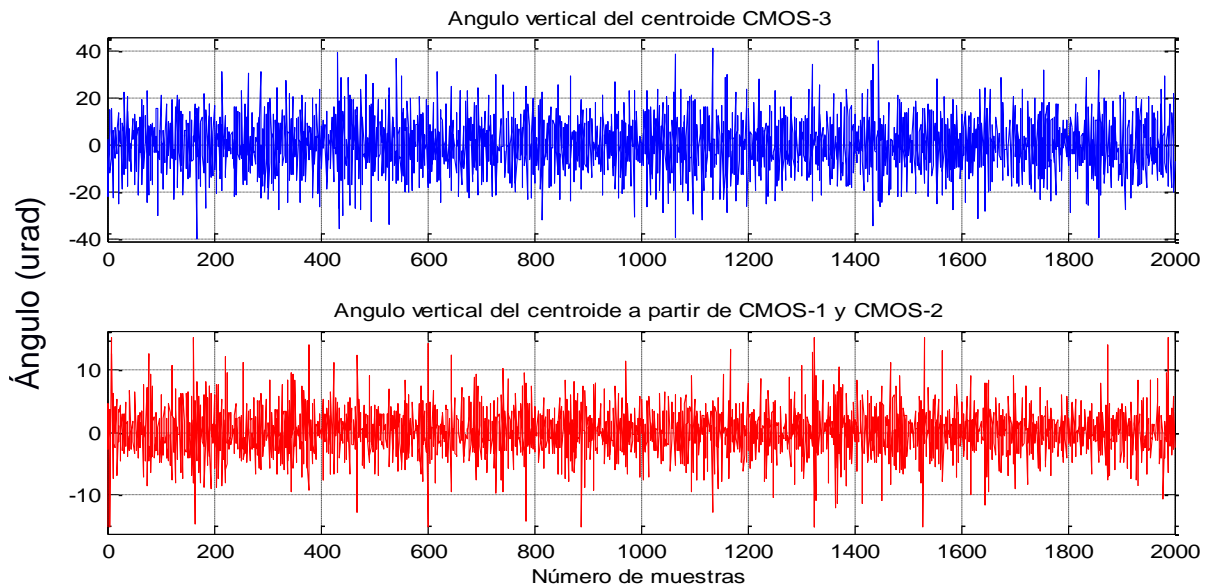


Figura 55. Ángulo del movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5.



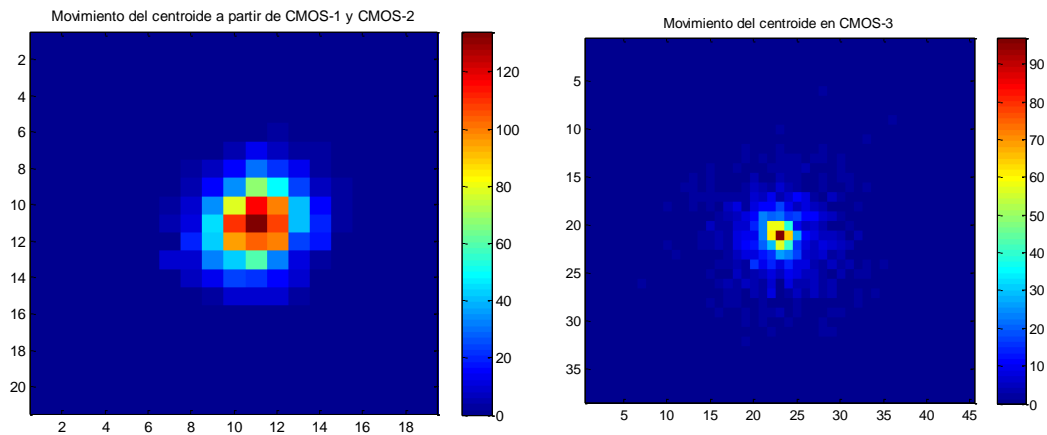
De la Figura 53 a la Figura 55 se pueden observar las diferencias de ángulos formado por el haz láser para la Prueba 5 (máxima velocidad de aire), conservando las mismas indicaciones para la visualización de los colores.

Similar a los resultados obtenidos en el análisis anterior, se puede observar que los ángulos formados por el haz láser obtenidos en la cámara 3 (azul) son mayores que los obtenidos a partir de la proyección de la cámara 1 y 2. En este caso en particular, la mayor desviación del ángulo formado en el eje de propagación del láser fue de 45,6 microradianes (Figura 53) comparado con la máxima obtenida en la proyección de 20,8 microradianes, esto en presencia de la máxima velocidad de aire generada por el ventilador centrífugo el cual provoca cambios significativos a las condiciones atmosféricas en el medio de propagación.

En la Figura 56 se muestra el resultado de las fluctuaciones para la prueba donde se varía la velocidad del aire ascendentemente cada 200 segundos hasta llegar a la máxima velocidad que mide el sensor, similar a la Figura 23 y Figura 25, y

sucesivamente se realiza el proceso inverso hasta la velocidad mínima generada por el ventilador centrífugo.

Figura 56. Fluctuaciones del centroide a partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda) y visto desde CMOS3 (derecha), obtenido de la Prueba 6.



En la Figura 56 se muestra la comparación de las fluctuaciones del centroide para las imágenes estimadas por las cámaras 1 y 2, y las obtenidas por la cámara 3.

Como se alcanza a evidenciar, en la cámara 3 se obtiene una mayor dispersión del centroide pero con un valor de repeticiones significativas en el centro. Esto se debe a que la prueba se inicia con un estado del ventilador apagado, obteniendo pocas variaciones del centroide. Sucesivamente cuando se pone en marcha el ventilador, la velocidad que se inyecta inicialmente no es de gran magnitud, generando pocos efectos al haz láser. A medida que transcurren las muestras se va incrementando la velocidad del aire dentro del turbulador, generando fluctuaciones más considerables, y haciendo que el centroide varíe alrededor del punto central, hasta llegar a la velocidad máxima donde se evidencian puntos más alejados del centro. Después de llegar a la máxima velocidad se empieza a decrecer este patrón haciendo que el centroide se acerque de nuevo al centro.

Figura 57. Movimiento radial del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6.

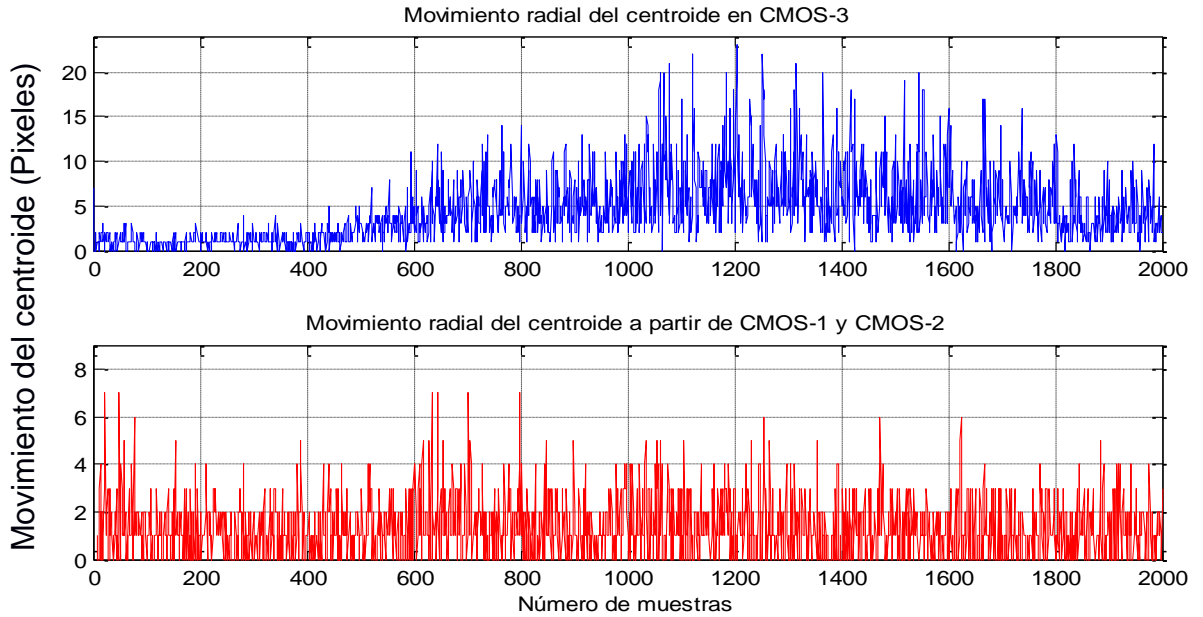


Figura 58. Movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6.

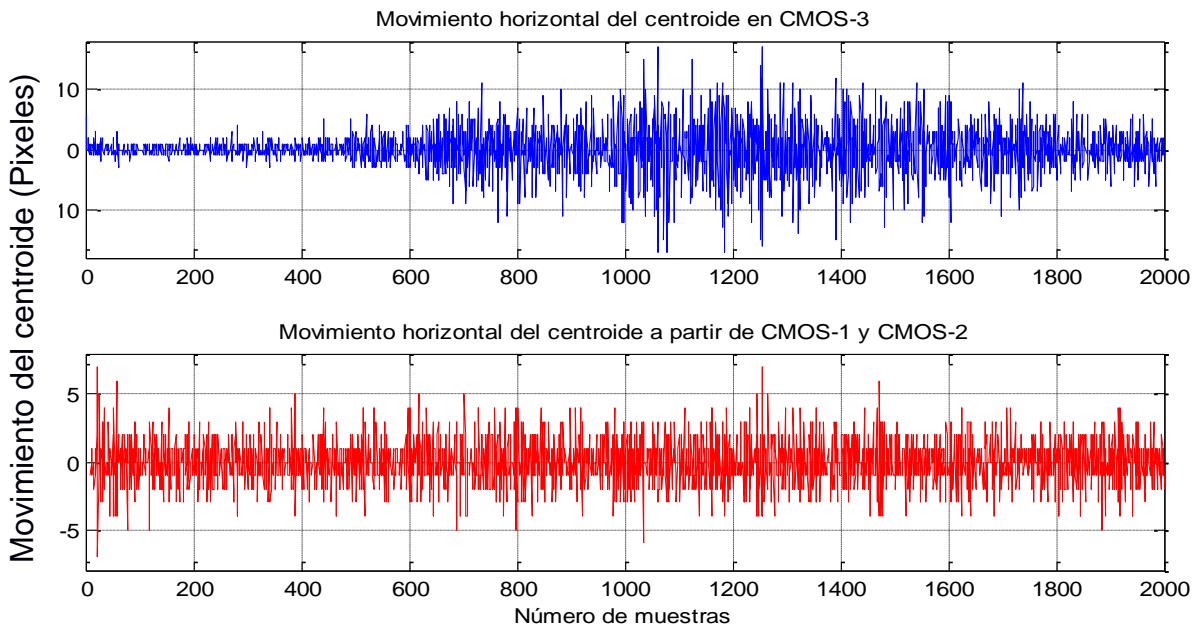
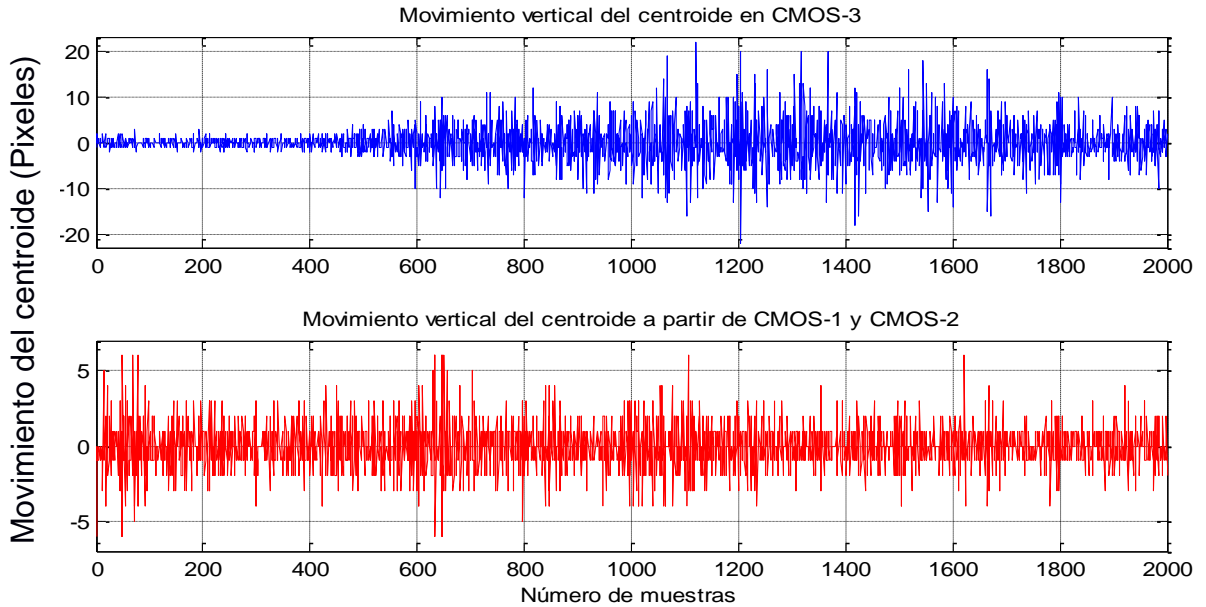


Figura 59. Movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6.



Si se observa detalladamente las gráficas obtenidas en la Figura 57, a la Figura 59 es posible evidenciar que después de la muestra 600, muestra de donde inicia la tercera velocidad generada por el ventilador, se empieza a ver un cambio considerable entre las gráficas azules (cámara 3). De la misma forma, se puede evidenciar que entre la muestra 1000 y la 1400 se obtienen las variaciones más grandes del centroide llegando hasta los 23 píxeles (Figura 57), esto debido a que es en el rango de tiempo donde se aplican las velocidades máximas. Después de la muestra 1400 empieza a disminuir los movimientos del centro de masa hasta llegar a la muestra 2000. En las gráficas rojas se puede observar que los máximos desplazamientos alcanzan los 7 píxeles pico.

Con estos resultados es posible asegurar, que a medida que aumenta la velocidad del aire dentro del turbulador longitudinalmente, se obtienen desplazamientos del centroide más grandes, haciendo que dicho parámetro afecte de forma directa el comportamiento del haz.

Figura 60. Ángulo del movimiento del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6.

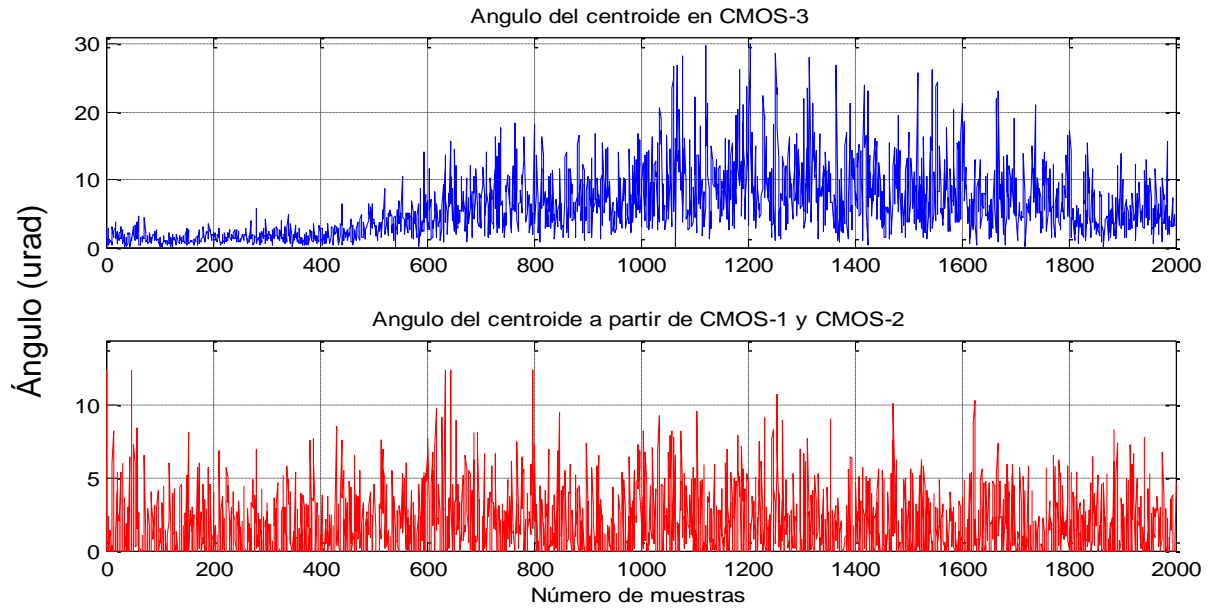


Figura 61. Ángulo del movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6.

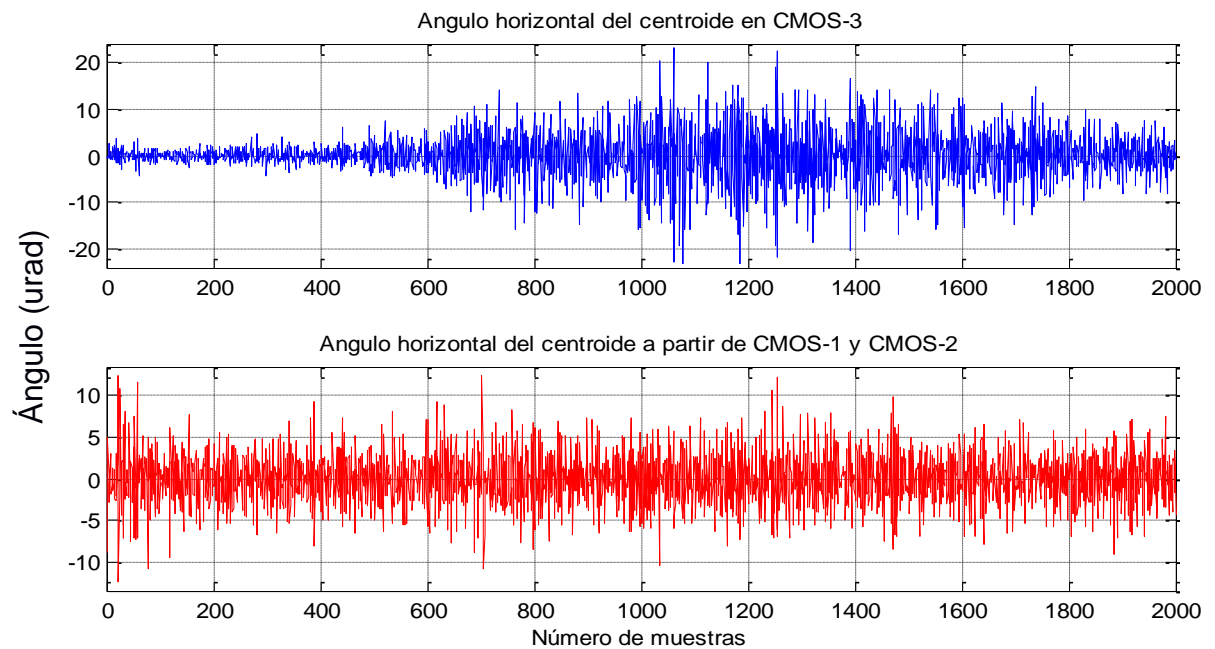
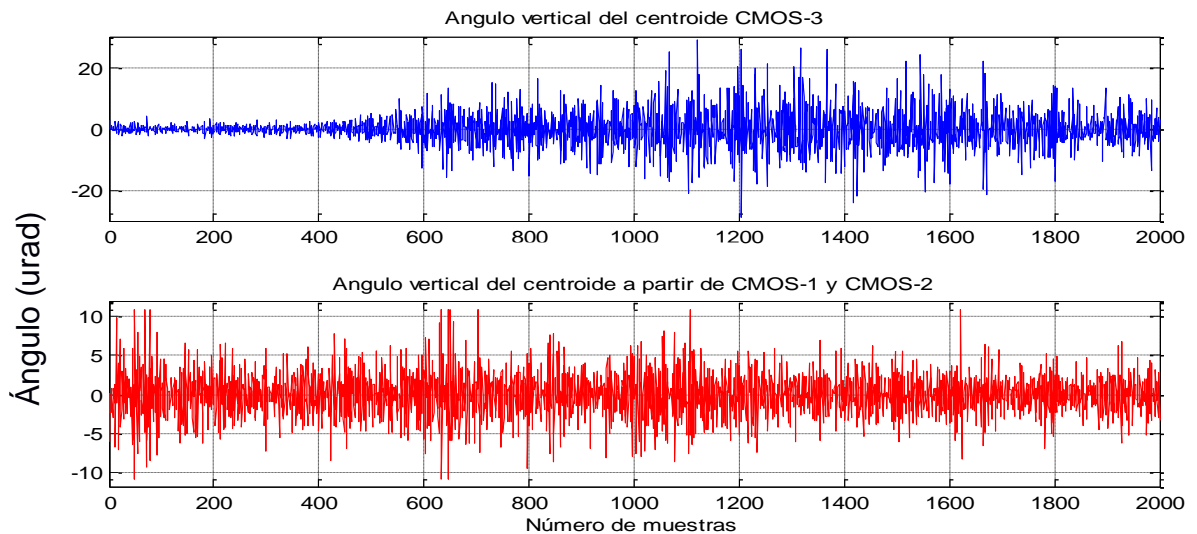


Figura 62. Ángulo del movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6.



Como en el caso del movimiento del centroide, para el ángulo se evidencian resultados similares, obteniendo máximas variaciones en el ángulo entre las muestras 1000 y 1400, región donde se le aplica máxima velocidad al sistema turbulador, y con variaciones obtenidas aproximadas a los 30 microradianes.

Por otro lado, para las gráficas en rojo (cámara 1 y 2) las variaciones se mantuvieron constantes a lo largo de la prueba, esto se debe a que las imágenes captadas por las cámaras 1 y 2 no sufrieron cambios en las condiciones atmosféricas del medio provocados por las ráfagas o variaciones de la velocidad del aire durante la prueba, lo cual también indica que el turbulador estuvo aislado del sistema óptico, afectando únicamente la propagación del haz dentro del mismo.

En la parte final de la Figura 57 a la Figura 62, se observó que los resultados no concuerdan con los del inicio debido a que la prueba no termina como inicia, dejándole un flujo de aire remanente dentro del turbulador. De la misma forma la

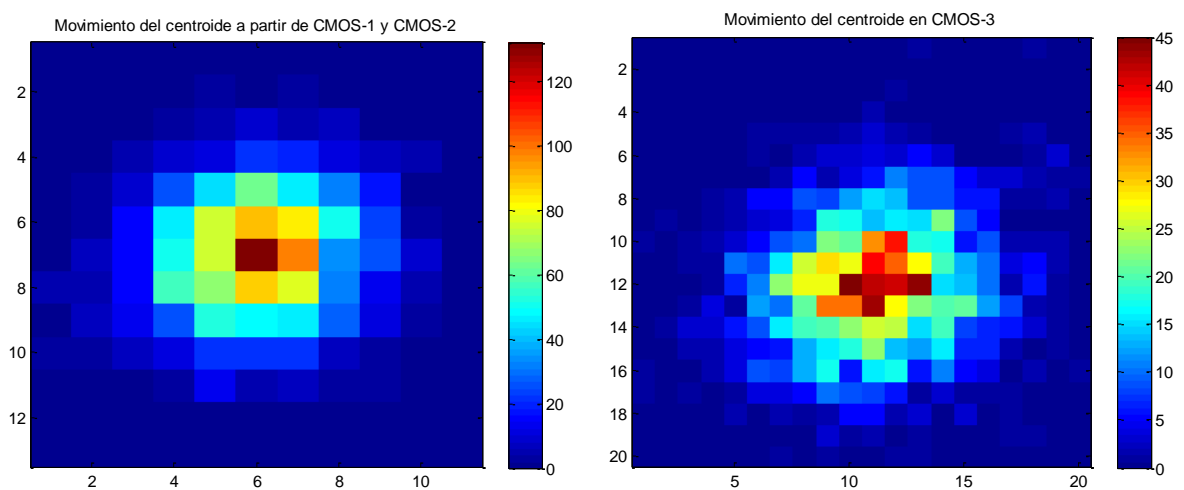
inercia del movimiento hace que quede un poco de aire circulando dentro del sistema turbulador hasta su disipación total.

- **Resultados con el turbulador ubicado transversalmente**

Después de analizar los resultados para las pruebas realizadas con el montaje ubicado de forma longitudinal, se procede a estudiar los efectos de la velocidad del aire en el haz láser a partir del montaje ubicado transversalmente (Figura 17).

En la Figura 63 se muestra lo obtenido para la Prueba 5 donde se inyecta máxima potencia al ventilador.

Figura 63. Fluctuaciones del centroide a partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda) y visto desde CMOS3 (derecha), obtenido de la Prueba 5.



En la Figura 63 (derecha) se observa una mayor distribución del centroide en las imágenes capturadas por la cámara 3 que por las estimadas a partir de las cámaras 1 y 2. Obtenido como repeticiones máximas en el mismo punto de tan solo 45 veces, mientras que para el otro caso (izquierda), el centroide se obtiene más de 120 veces en el centro. Cabe resaltar que el trayecto que atraviesa el láser

en el turbulador es de 3 pulgadas para este caso, sin embargo, existen variaciones del centro de masa a medida que varía la velocidad del aire en forma transversal.

Figura 64. Movimiento radial del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5.

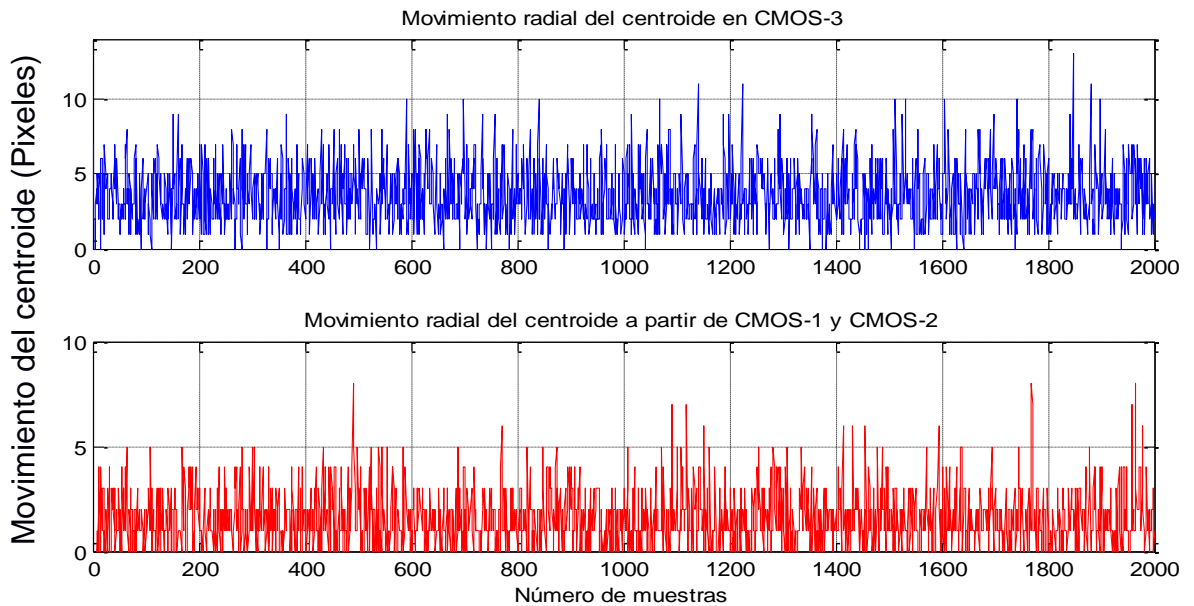


Figura 65. Movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5.

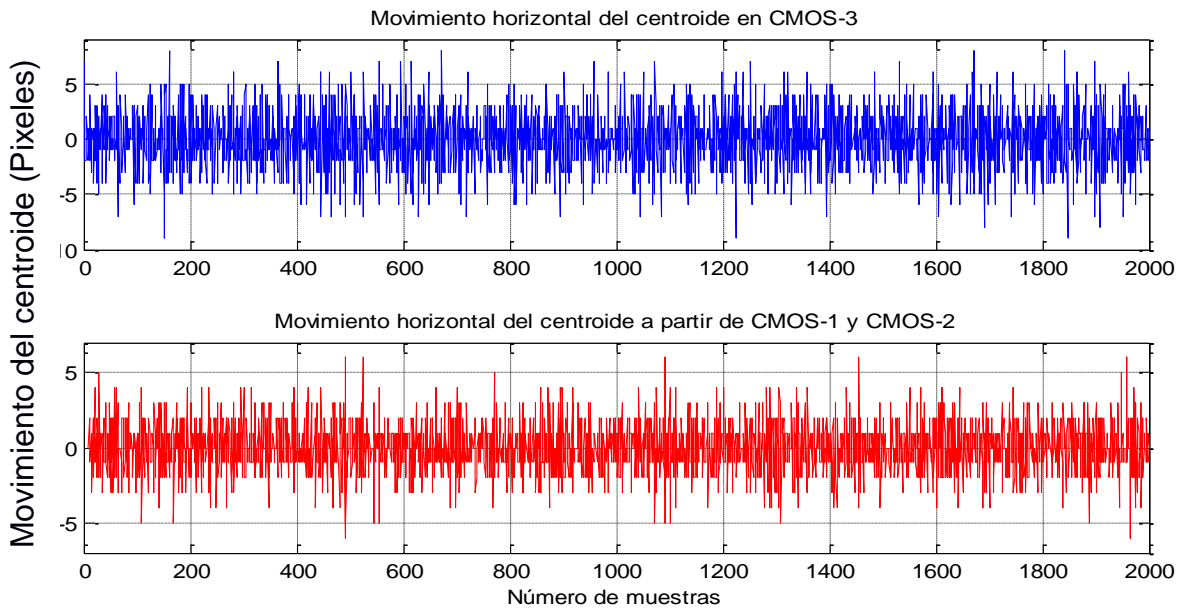
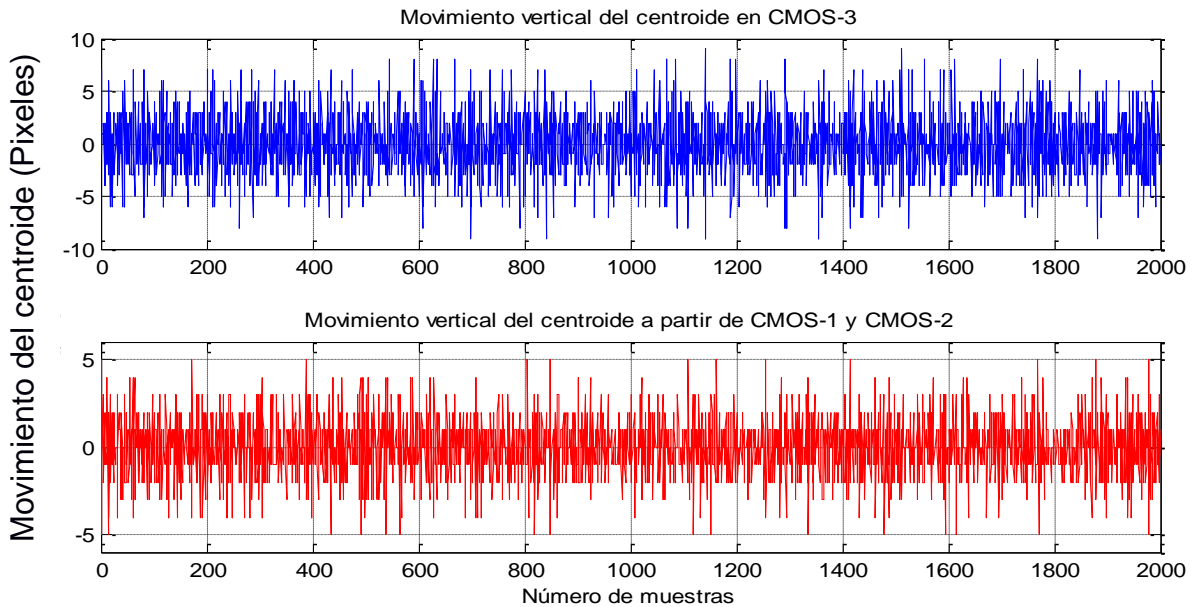


Figura 66. Movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la prueba 5.



De la Figura 64 a la Figura 66, es posible comparar la distancia del movimiento del centroide para cada muestra obtenida por la cámara 3 (azules) y por la estimada con las cámaras 1 y 2 (rojas). Para esta prueba se aplica la máxima velocidad al sistema turbulador en forma transversal a la dirección de propagación del haz láser.

Aunque es poca la diferencia, se evidencia que en las figuras azules hay valores más grandes que en las rojas, alcanzando un valor máximo de 13 píxeles (Figura 64) mientras que con los resultados obtenidos por la estimación de las cámaras 1 y 2, alcanza a obtener un valor máximo de 8 píxeles.

Se obtienen variaciones pequeñas del desplazamiento del centroide, debido a que el trayecto del láser que se ve afectado por la velocidad del aire es solo de 3 pulgadas, diferente al del sistema longitudinal (130 cm). Se podría pensar que infringiendo cambios en la atmósfera de forma transversal y a mayores distancias

en el sentido de propagación del láser, se obtendrían mayores fluctuaciones en el centroide. Esta hipótesis se plantea en el capítulo de trabajos futuros.

Figura 67. Ángulo del movimiento del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5.

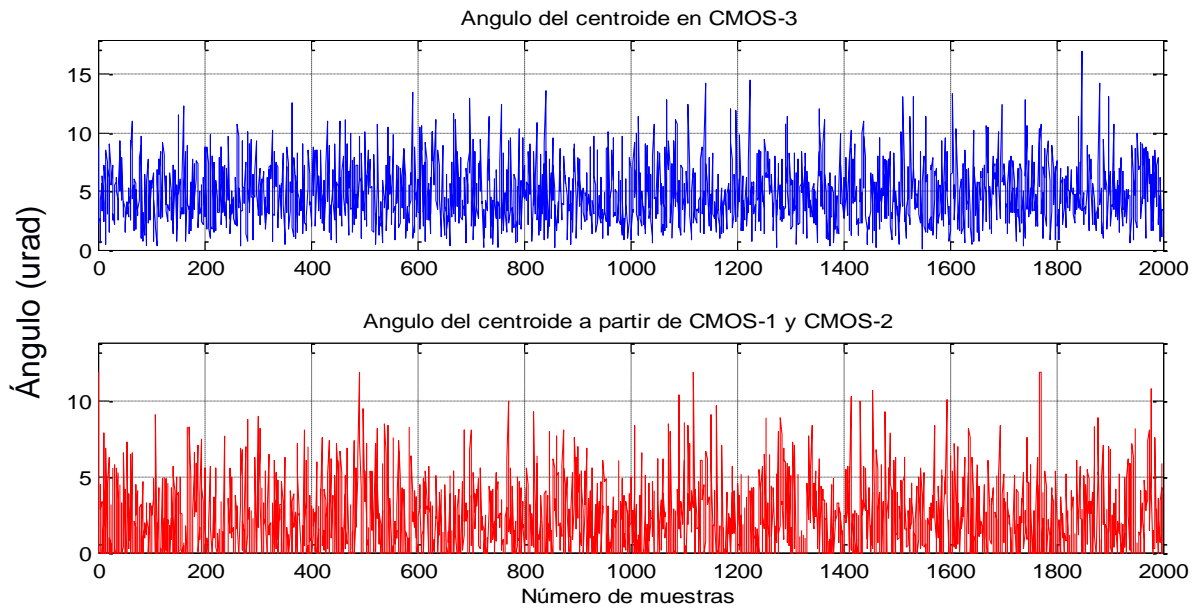


Figura 68. Ángulo del movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5.

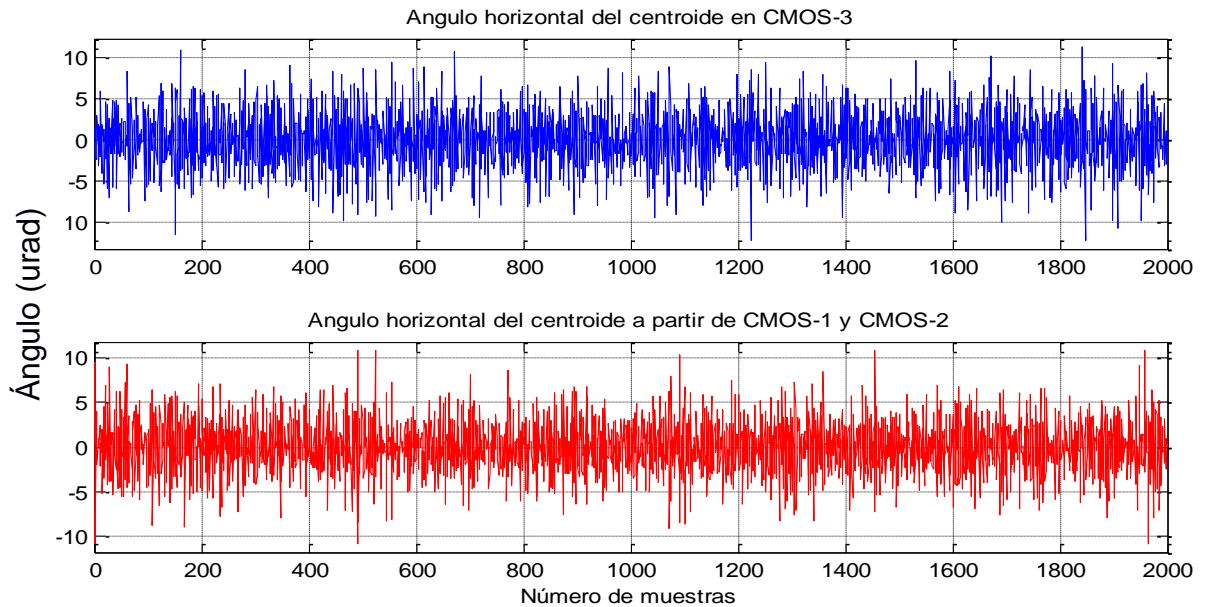
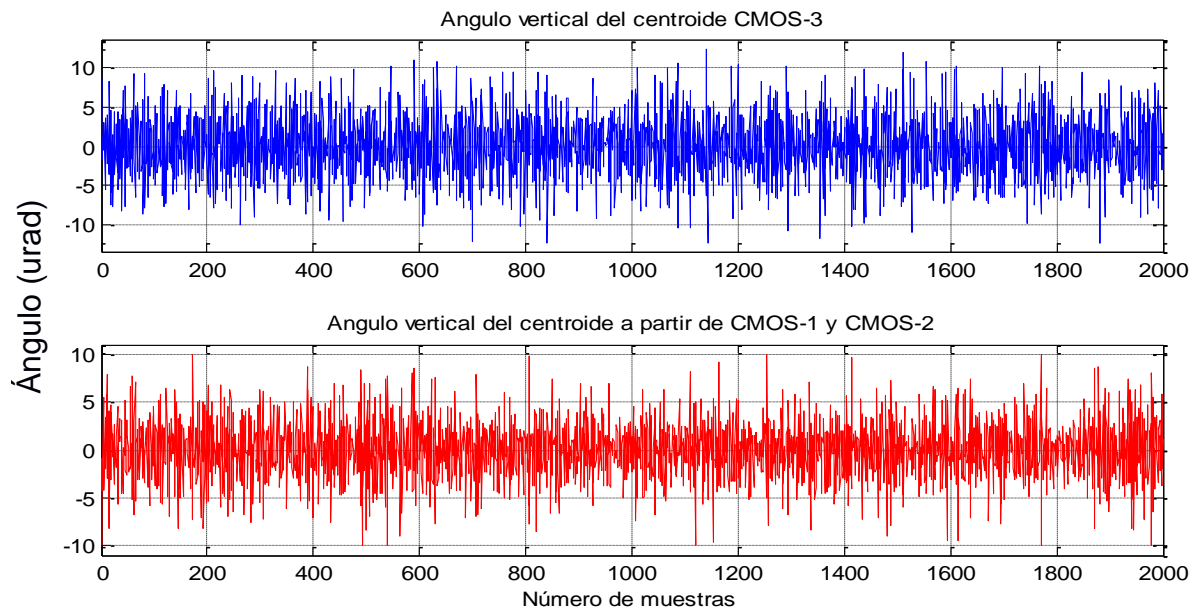


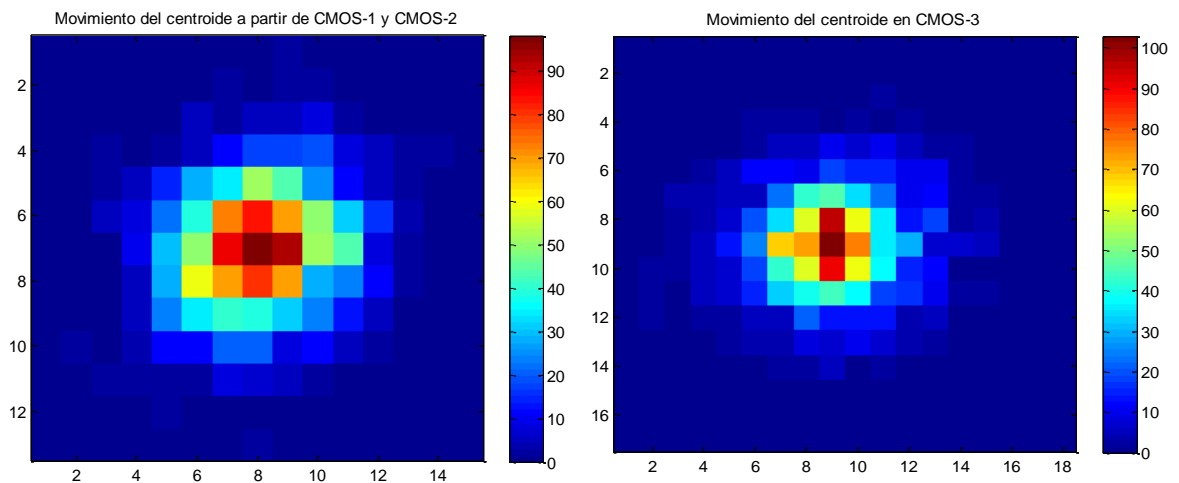
Figura 69. Ángulo del movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 5.



A pesar que es muy poca la variación del centroide en la cámara 3 (gráficas rojas) con la estimada por la cámara 1 y 2, es posible percibir sus diferencias, teniendo variaciones de 2 hasta 5 microradianes. La causa de que los resultados de las gráficas azules y las gráficas rojas sean tan parecidos, es porque el movimiento del centroide en esta prueba es pequeño, acercándose significativamente a lo estimado.

Como se mencionó anteriormente, es muy probable que afectando las condiciones atmosféricas del sistema Turbulador de forma transversal y a una mayor distancia longitudinal del eje de propagación del láser, los desplazamientos del centro de masa del haz fueran aún mayores. Esta hipótesis se plantea en el capítulo de trabajos futuros.

Figura 70. Dispersión del centroide a partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda) y visto desde CMOS3 (derecha), obtenido de la Prueba 6.



Al comparar las dos fluctuaciones presentes en la Figura 70, se puede evidenciar que el movimiento del centroide describe un comportamiento muy similar en ambos casos, aunque se observa una mayor área en la gráfica de la derecha (cámara 3) que en la gráfica izquierda (cámara 1 y 2), resultado de las máximas

variaciones obtenidas debido a las altas velocidades del aire inyectado dentro del sistema Turbulador, de las cuales las cámara 1 y 2 no se vieron afectadas.

Figura 71. Movimiento radial del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6.

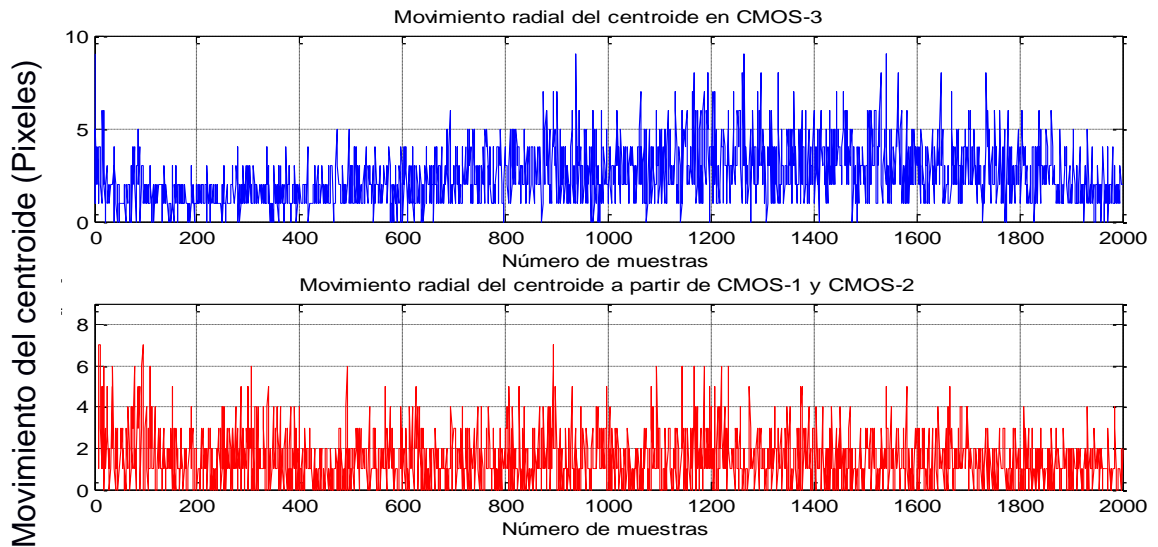


Figura 72. Movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6.

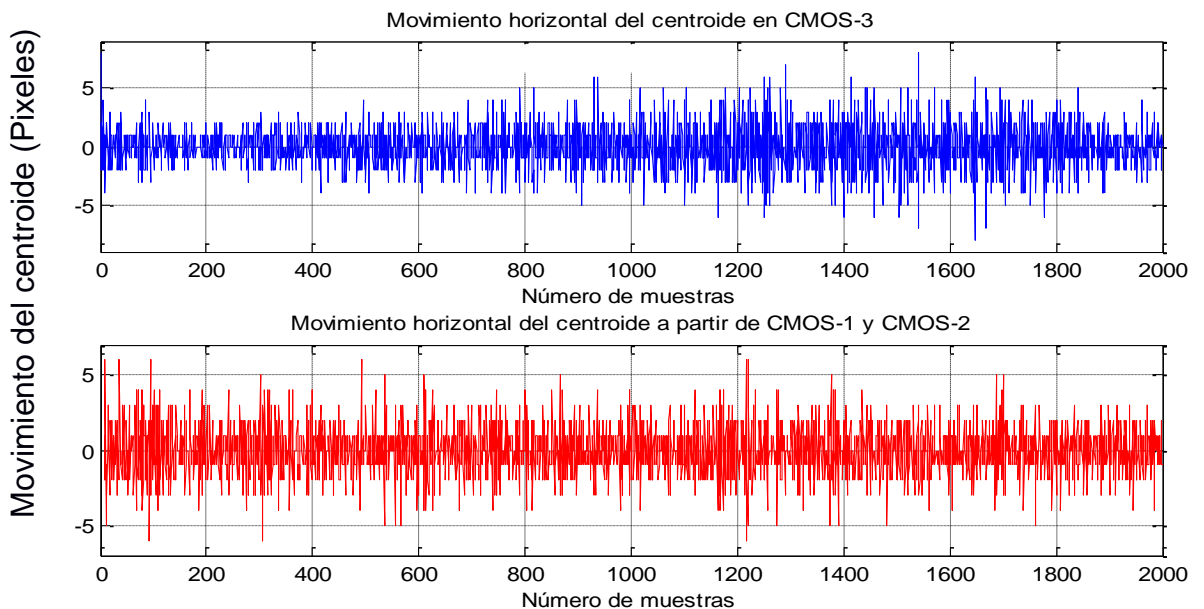
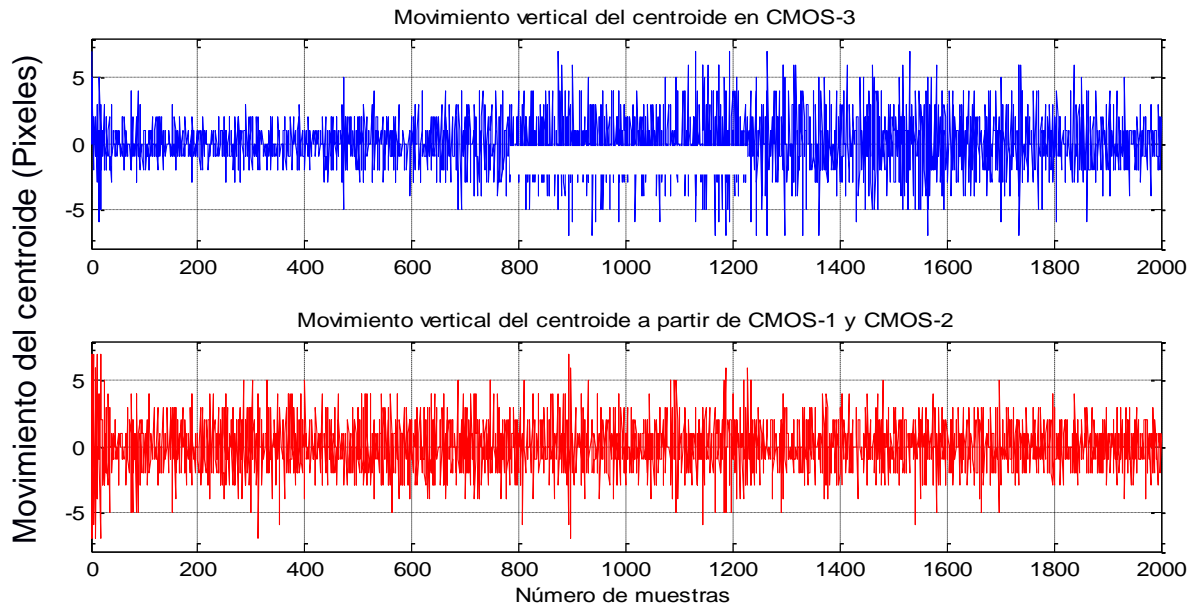


Figura 73. Movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6.



En la Figura 71 a la Figura 73, se describe el desplazamiento radial, horizontal y vertical del centroide respectivamente, para la prueba variada (Prueba 6) del sistema transversal del turbulador, donde como era de esperarse, se obtienen resultados similares en las dos gráficas (rojas y azules) para cada caso.

A pesar que a medida que aumenta la velocidad del aire, cambia la variación del centroide obtenido en la cámara 3, no es muy diferente al valor estimado calculado a partir de las cámaras 1 y 2, dado que en ambos casos la diferencia entre desplazamientos máximos del centroide obtenidos no superan los 2 píxeles. Lo cual no nos da una información precisa para concluir sobre esta prueba.

Figura 74. Ángulo del movimiento del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6.

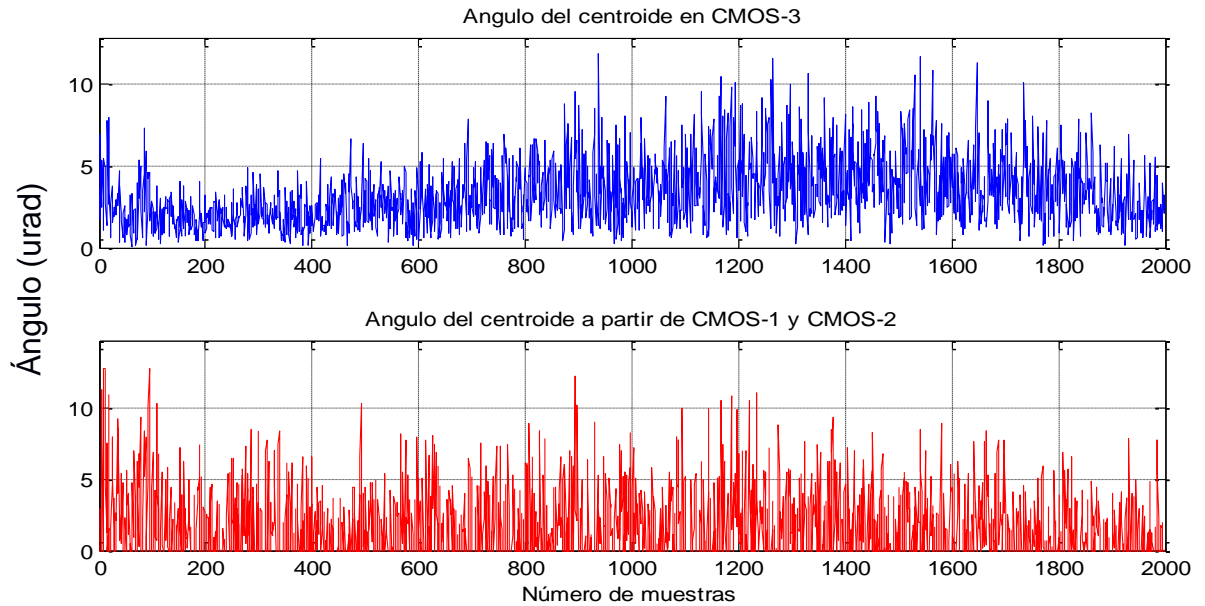


Figura 75. Ángulo del movimiento horizontal del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6.

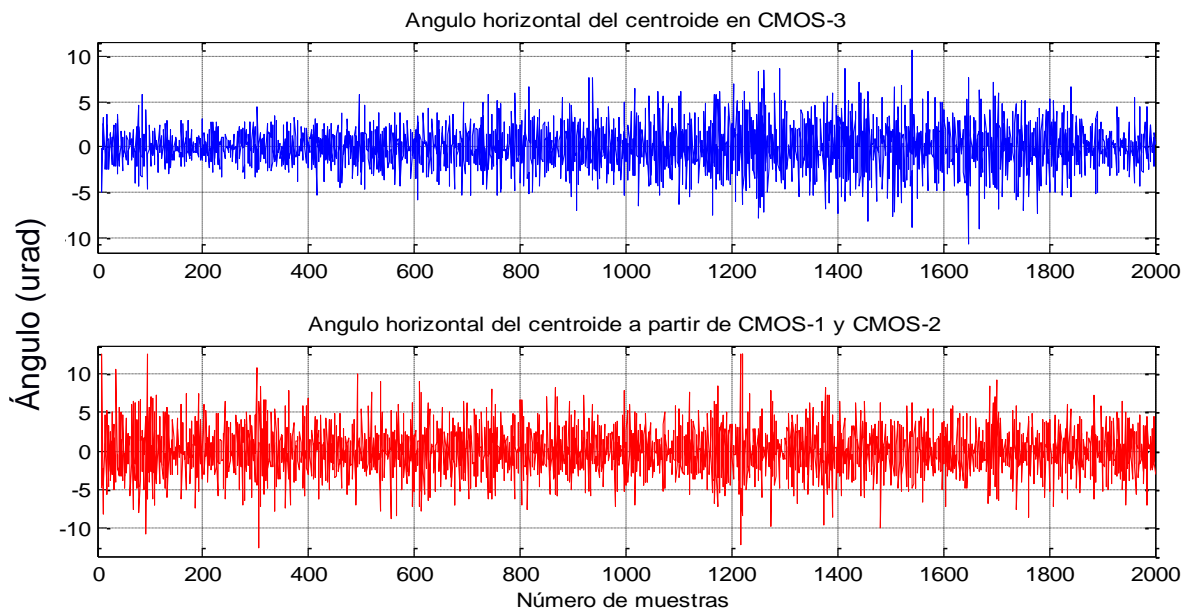
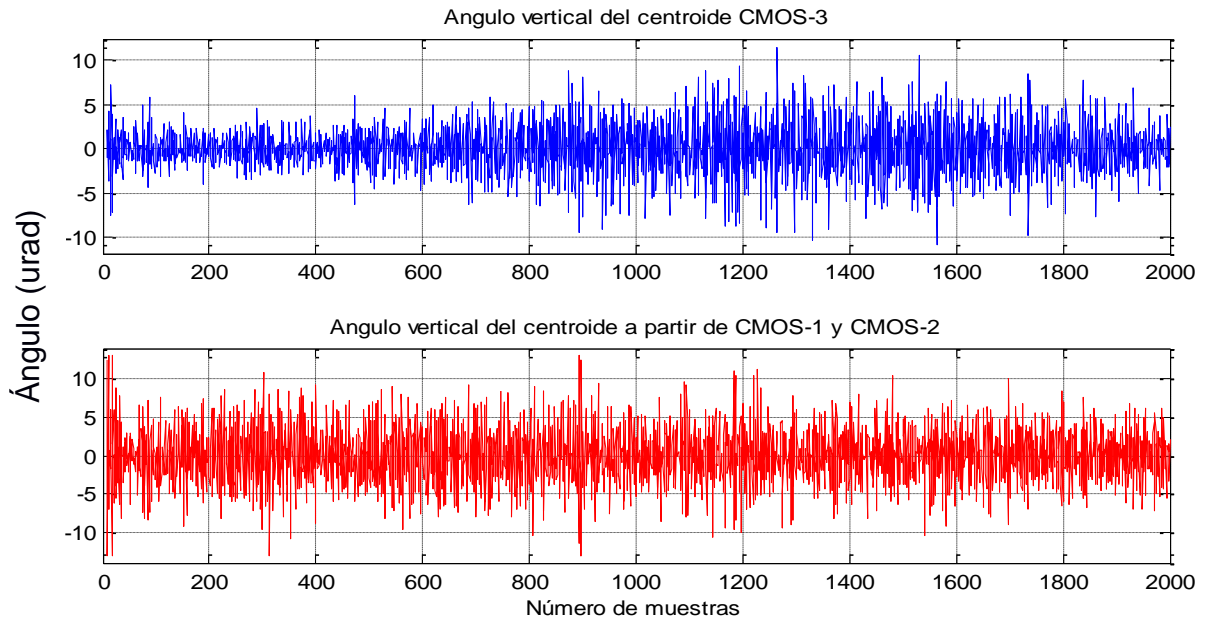


Figura 76. Ángulo del movimiento vertical del centroide en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO), obtenido de la Prueba 6.



Si se analizan los ángulos para esta prueba, es posible evidenciar resultados parecidos a los obtenidos con el desplazamiento del centroide, donde las variaciones comparadas en la cámara 3 con el calor estimado a partir de las cámaras 1 y 2 son parecidas, obteniendo diferencias de ángulos para los dos casos menores a los 2 microradianes. Y a pesar de que a medida que varía la velocidad el ángulo aumenta en la gráfica azul, esto no da una información clara y precisa para sacar conclusiones.

De la misma forma que se hizo con cada uno de los casos presentados anteriormente, se analizaron todas las pruebas realizadas, desde la Prueba patrón, hasta la variada (Prueba 6) tanto para el sistema turbulador longitudinal como el transversal, evidenciando lo que ocurre en cada una de ellas.

En la Tabla 8 se indican los valores máximos del movimiento del centroide para cada una de las pruebas realizadas, obteniendo resultados para desplazamientos radiales, horizontales y verticales.

Tabla 8. Resultados del centroide para las pruebas realizadas en cada situación.

| Pruebas | | Movimiento del centroide (Píxeles) | | | | | |
|---------------------|----------|------------------------------------|----------|-----------------|----------|---------------|----------|
| | | Radialmente | | Horizontalmente | | Verticalmente | |
| | | Medido | Estimado | Medido | Estimado | Medido | Estimado |
| Patrón | | 6 | 8 | 4 | 7 | 4 | 7 |
| Longitudinal | Prueba 1 | 16 | 8 | 10 | 7 | 13 | 6 |
| | Prueba 2 | 19 | 11 | 11 | 7 | 15 | 8 |
| | Prueba 3 | 22 | 9 | 14 | 6 | 17 | 7 |
| | Prueba 4 | 32 | 11 | 19 | 7 | 26 | 8 |
| | Prueba 5 | 36 | 11 | 20 | 8 | 30 | 8 |
| | Prueba 6 | 23 | 9 | 17 | 7 | 22 | 6 |
| Transversal | Prueba 1 | 6 | 8 | 4 | 5 | 5 | 6 |
| | Prueba 2 | 8 | 9 | 6 | 7 | 6 | 7 |
| | Prueba 3 | 9 | 7 | 7 | 7 | 8 | 6 |
| | Prueba 4 | 10 | 8 | 8 | 5 | 9 | 6 |
| | Prueba 5 | 13 | 8 | 9 | 6 | 9 | 5 |
| | Prueba 6 | 9 | 7 | 8 | 6 | 7 | 7 |

Si se analiza detalladamente la tabla anterior, es posible evidenciar una relación cercana entre el movimiento del centroide y la velocidad del aire con la que se afecta el sistema turbulador cuando se ubica de forma longitudinal. El valor máximo de desplazamiento del centroide se obtiene en la Prueba 5, donde se aplica la máxima velocidad del aire (14,2 m/s), alcanzando un valor de 36 píxeles de movimiento radial, sobrepasando los 11 píxeles máximo obtenidos por el calculado a través de las cámaras 1 y 2.

Para el caso del turbulador ubicado transversalmente se observan variaciones muy pequeñas en cada una de las pruebas realizadas. Esto se presenta sin duda alguna por el corto trayecto de propagación que tiene el haz láser dentro del

turbulador para este caso. Aunque es evidente que a medida que aumenta la velocidad del aire incrementa en 1 o 2 pixeles el máximo de desplazamiento del centroide. En la Tabla 9 se muestran los ángulos máximos obtenidos para cada una de las pruebas realizadas.

Tabla 9. Resultados del ángulo del centroide para las pruebas realizadas en cada situación.

| Pruebas | | Angulo del movimiento del centroide (urad) | | | | | |
|---------------------|----------|--|----------|-----------------|----------|---------------|----------|
| | | Radialmente | | Horizontalmente | | Verticalmente | |
| | | Medido | Estimado | Medido | Estimado | Medido | Estimado |
| Patrón | | 6,420 | 10,690 | 5,045 | 9,480 | 4,242 | 9,713 |
| Longitudinal | Prueba 1 | 20,150 | 14,827 | 13,624 | 11,252 | 16,916 | 10,302 |
| | Prueba 2 | 25,991 | 14,596 | 16,477 | 15,322 | 20,854 | 13,845 |
| | Prueba 3 | 28,818 | 10,856 | 18,782 | 9,241 | 23,194 | 11,312 |
| | Prueba 4 | 37,146 | 16,205 | 22,714 | 13,145 | 34,881 | 16,152 |
| | Prueba 5 | 45,590 | 20,881 | 30,560 | 15,260 | 44,031 | 15,092 |
| | Prueba 6 | 30,052 | 12,394 | 23,065 | 12,364 | 29,194 | 10,730 |
| Transversal | Prueba 1 | 8,085 | 13,172 | 5,298 | 10,837 | 6,116 | 10,432 |
| | Prueba 2 | 10,190 | 16,368 | 6,141 | 12,447 | 9,641 | 15,282 |
| | Prueba 3 | 12,254 | 11,654 | 8,924 | 12,239 | 10,285 | 10,821 |
| | Prueba 4 | 13,956 | 12,760 | 11,083 | 11,120 | 11,891 | 11,072 |
| | Prueba 5 | 16,960 | 11,813 | 12,309 | 10,756 | 12,503 | 9,963 |
| | Prueba 6 | 11,854 | 12,792 | 10,626 | 12,690 | 11,468 | 13,040 |

Haciendo concordancia con los resultados obtenidos en el desplazamiento del centroide proporcionados por la Tabla 9, con el ángulo se obtienen resultados similares, donde a medida que la velocidad de aire es mayor para el montaje longitudinal, incrementa el ángulo de desviación del centroide del láser.

Este resultado se obtiene para la Prueba 5 donde se inyecta la máxima velocidad de aire (14,26 m/s) dentro del sistema turbulador obteniendo un valor máximo de 16,96 microradianes (urad).

Para el caso del sistema turbulador ubicado transversalmente, ocurre el mismo fenómeno que para el desplazamiento del centroide, donde los ángulos formados por la desviación del haz láser obtenidos en la cámara 3, comparados con los estimados por las cámaras 1 y 2, son muy parecidos en cada una de las pruebas, aumentando en cada incremento de velocidad, pero en poca proporción.

3.5.3 Función estructura La turbulencia atmosférica es un proceso no estacionario debido a que su valor medio varía en el tiempo. Por tanto, se hace necesario usar una expresión que permita interpretar las fluctuaciones y los incrementos estacionarios. Para ello se utiliza la función estructura [28].

$$D_x(k_i) = \langle [x(k_i) - \langle x(k_i) \rangle]^2 \rangle \quad (9)$$

Para analizar las fluctuaciones de los centroides y ángulos, se realizó la función estructura para las pruebas hechas en el sistema turbulador ubicado de forma longitudinal y transversal, únicamente sobre la tercera cámara (turbulencia). Cada una de estas gráficas poseen ventanas de 10 segundos, es decir, cada prueba tiene 2000 muestras, por lo tanto, se obtuvieron 200 fluctuaciones locales.

Se comienza analizando la función estructura en la Prueba Patrón con la cual se realizó su respectiva comparación con las demás pruebas tanto de sistema ubicado longitudinalmente como transversalmente.

Figura 77. Función estructura del movimiento del centroide en prueba Patrón
a) Radial. b) Horizontal. c) Vertical.

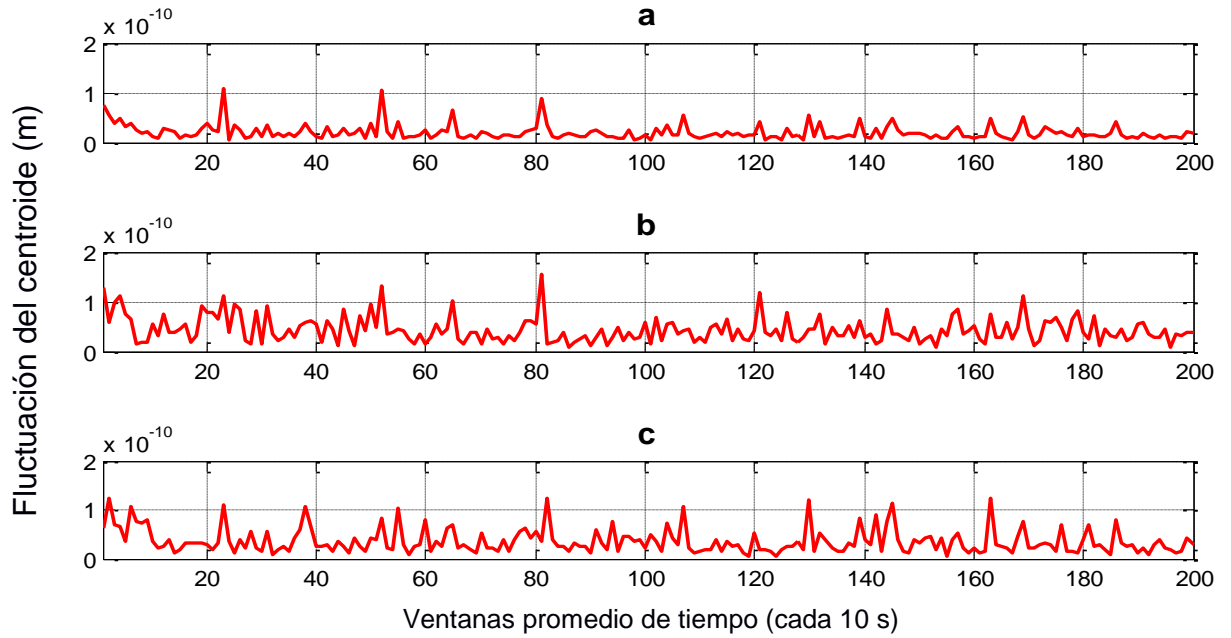
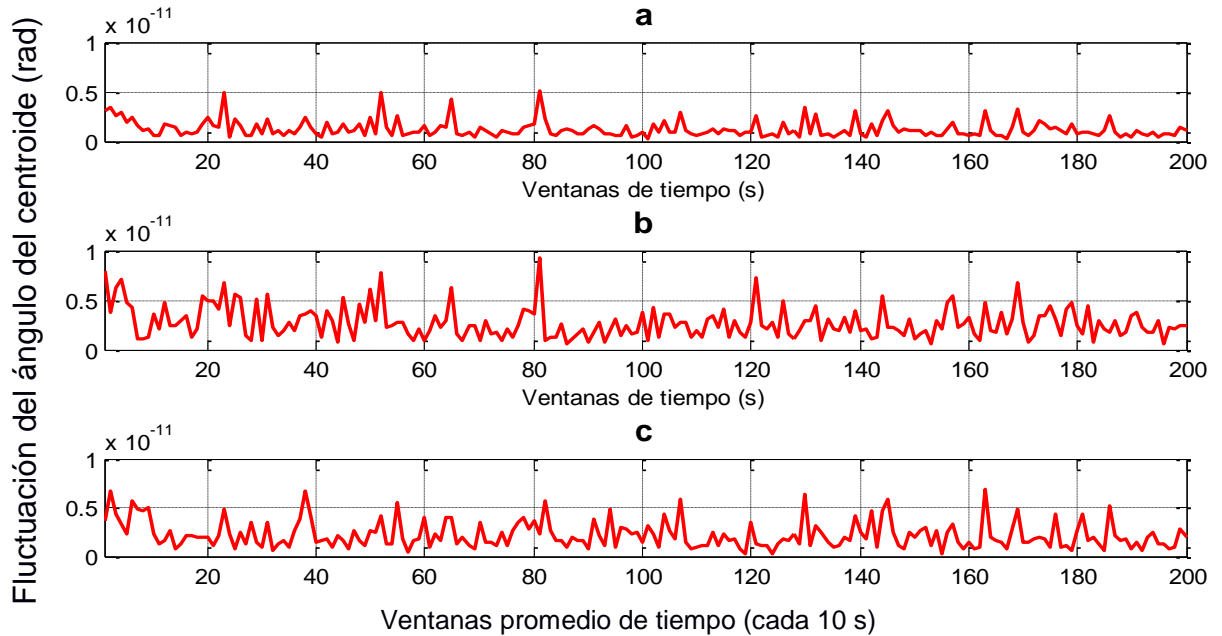


Figura 78. Función estructura del ángulo del centroide en Prueba Patrón
a) Radial. b) Horizontal. c) Vertical.



A partir de la información obtenida del análisis de la función estructura de la Prueba Patrón en las Figura 77 y figura 78, se observó que las fluctuaciones tanto del centroide como del ángulo son muy pequeñas debido a que en esta prueba no se modifican las condiciones atmosféricas del ambiente donde se realiza el experimento.

Resultados con el turbulador ubicado longitudinalmente

A continuación se realiza la función estructura para las 5 pruebas estipuladas para el montaje con el turbulador ubicado longitudinalmente (Figura 16), donde se analizará el comportamiento de las fluctuaciones del centroide y ángulo cuando se somete a un flujo turbulento.

Figura 79. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba 5 a) Radial. b) Horizontal. c) Vertical.

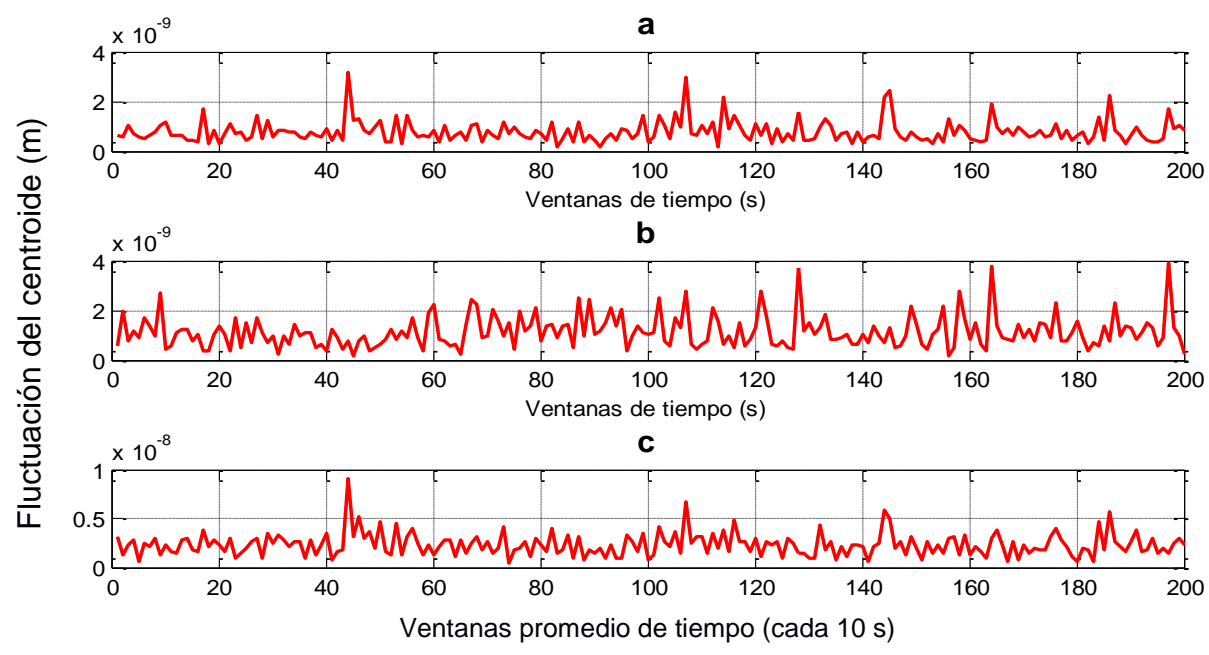


Figura 80. Función estructura del ángulo del centroide en la Prueba 5 a) Radial. b) Horizontal. c) Vertical.

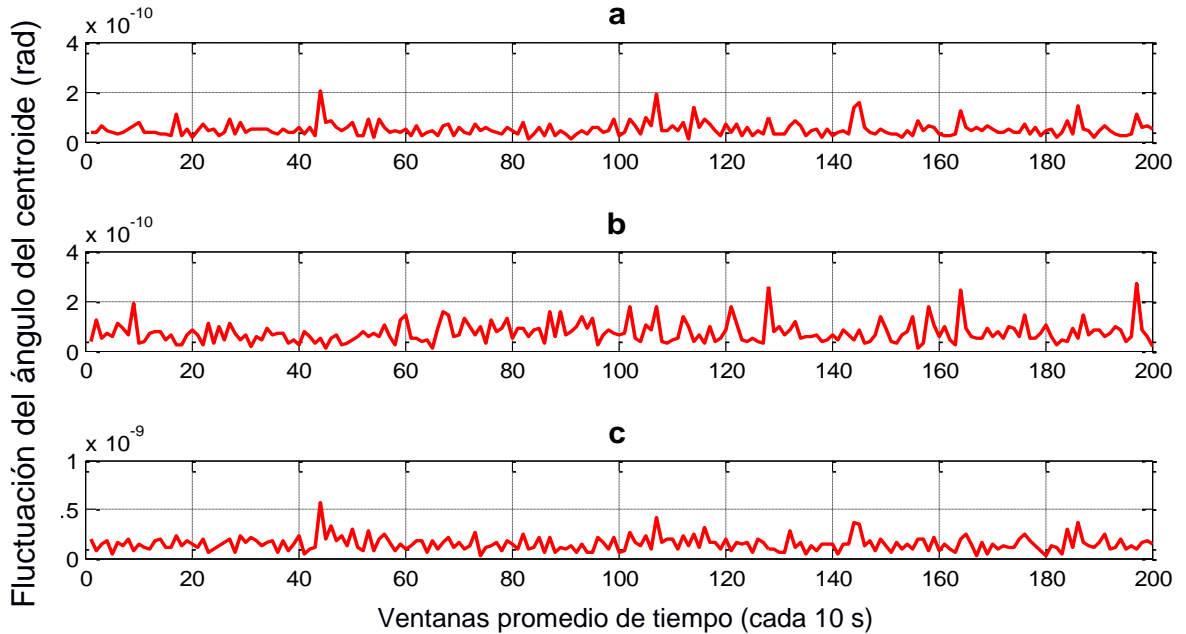


Tabla 10. Máximas fluctuaciones del centroide y ángulo - Longitudinal

| Pruebas | Fluctuación máxima centroide ($m^{-2/3}$) | | | Fluctuación máxima ángulo ($rad^{-2/3}$) | | |
|----------|---|------------|-----------|--|------------|------------|
| | Radial | Horizontal | Vertical | Radial | Horizontal | Vertical |
| Prueba 1 | 7.0365e-10 | 6.1278e-10 | 1.0892e-9 | 4.5038e-11 | 3.8880e-11 | 6.9106e-11 |
| Prueba 2 | 1.2113e-9 | 1.6184e-9 | 2.6090e-9 | 7.6203e-11 | 1.1773e-10 | 1.6892e-10 |
| Prueba 3 | 1.0676e-9 | 1.4165e-9 | 2.2076e-9 | 6.5398e-11 | 9.7104e-11 | 1.4007e-11 |
| Prueba 4 | 2.0083e-9 | 3.3856e-9 | 6.0024e-9 | 1.2746e-10 | 2.0205e-10 | 3.8084e-10 |
| Prueba 5 | 3.1565e-9 | 3.8996e-9 | 9.0198e-9 | 2.0028e-10 | 2.6952e-10 | 5.7227e-10 |

A partir de la información obtenida en el análisis de la función estructura de las pruebas realizadas en la ubicación del sistema turbulador en forma longitudinal brindadas por la Tabla 10, se observó que las fluctuaciones globales incrementan a mayores niveles de velocidad del aire. Las fluctuaciones del centroide y del ángulo en el eje Y son mayores que las del eje X, debido a la diferencia en la concentración de la velocidad del aire en estas dos dimensiones.

Resultados con el turbulador ubicado transversalmente.

Después de analizar los resultados para las pruebas realizadas con el montaje ubicado de forma longitudinal, se procede a estudiar las fluctuaciones del centroide y ángulo por medio de la función estructura en las cinco pruebas establecidas anteriormente a partir del montaje ubicado transversalmente (Figura 17).

Figura 81. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba 5 a) Radial. b) Horizontal. c) Vertical.

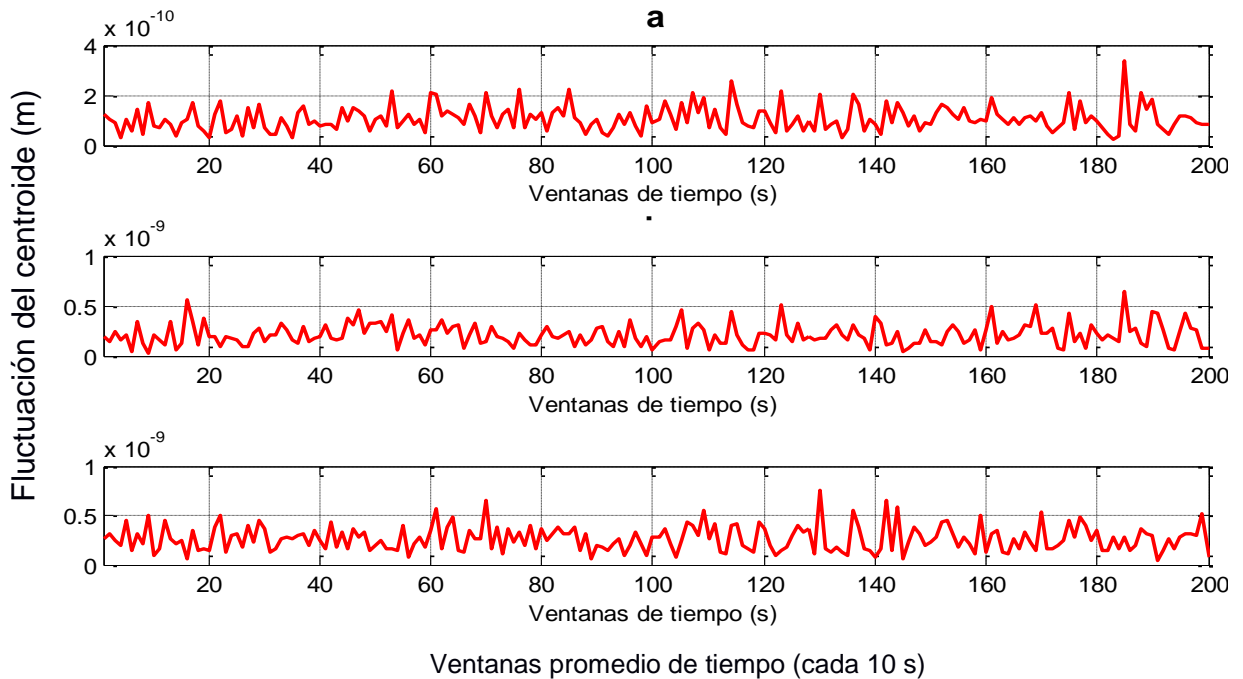


Figura 82. Función estructura del ángulo del centroide en la Prueba 5 a) Radial. b) Horizontal. c) Vertical.

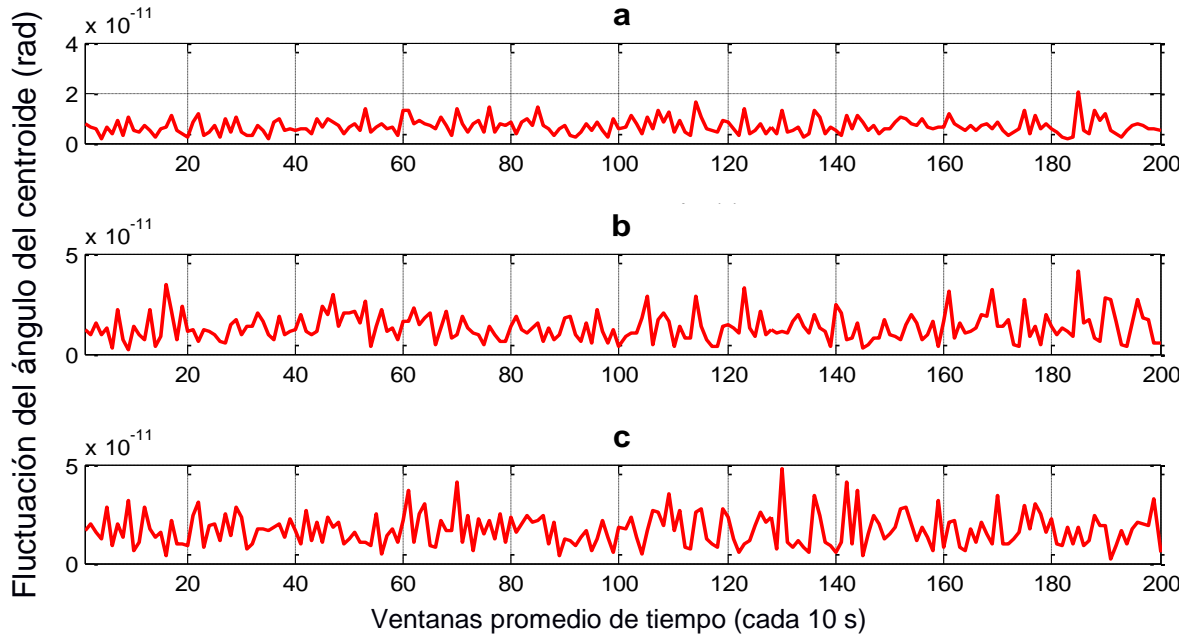


Tabla 11. Máximas fluctuaciones del centroide y ángulo – Transversal

| Pruebas | Fluctuación máxima centroide (m ^{-2/3}) | | | Fluctuación máxima ángulo (rad ^{-2/3}) | | |
|----------|---|------------|------------|--|------------|------------|
| | Radial | Horizontal | Vertical | Radial | Horizontal | Vertical |
| Prueba 1 | 2.8667e-10 | 2.0358e-10 | 1.7884e-10 | 1.4836e-11 | 1.2782e-11 | 1.1348e-11 |
| Prueba 2 | 5.2269e-10 | 5.7875e-10 | 5.7202e-10 | 2.9483e-11 | 2.6116e-11 | 4.6580e-11 |
| Prueba 3 | 2.3469e-10 | 4.4857e-10 | 4.6098e-10 | 1.5309e-11 | 2.7691e-11 | 2.9248e-11 |
| Prueba 4 | 2.9742e-10 | 5.2362e-10 | 6.9847e-10 | 1.9970e-11 | 3.3223e-11 | 4.3173e-11 |
| Prueba 5 | 3.3881e-10 | 6.4321e-10 | 7.5315e-10 | 2.0525e-11 | 4.1526e-11 | 4.7786e-11 |

A partir de la información obtenida en la Tabla 11, se puede observar que las fluctuaciones del centroide y ángulos poseen valores muy similares para todas las pruebas realizadas, sin verse afectadas por la velocidad del aire presente en cada prueba, cabe resaltar que el trayecto que atraviesa el láser en el turbulador ubicado de forma trasversal es de 3 pulgadas y por tanto este solo se ve afectado por el flujo turbulento en una sección más pequeña comparado con el mismo ubicado de forma longitudinal.

4. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- En el presente trabajo de grado, se analizó el comportamiento de la desviación de un haz láser a través de un prototipo de laboratorio, conformado por un turbulador cilíndrico ubicado de forma longitudinal o transversal al eje de propagación del láser, realizando seis pruebas para cada caso, y así poder observar los efectos de la turbulencia atmosférica (cuando se varía la velocidad del aire) en las dos situaciones.
- Se diseñó una metodología para la creación de escenarios que consideren condiciones de velocidad de aire variable. De esta manera, fue posible afectar el ambiente en el que opera un turbulador, mediante el uso de un ventilador centrífugo, resistencias, capacitores y diseños de ingeniería electrónica que ayudaron a controlar ésta variable física.
- Durante las pruebas realizadas se adquirieron datos de las cámaras cada segundo, garantizando que cada muestra tenga incluida la velocidad del aire en ese instante de tiempo, debido a que el sensor Honeywell Zephyr de la serie HAF tiene la capacidad de captar variaciones cada milisegundo y enviarla a través de su salida digital.
- Dadas las características de los algoritmos construidos y el hardware utilizado en las computadoras, se garantiza que los datos capturados por cada uno de los sensores utilizados están sincronizados adecuadamente para los experimentos realizados. La mayor diferencia de tiempos entre los sensores de adquisición es de 33,64 ms, lo cual no supera los 100 ms establecidos por la hipótesis de atmósfera congelada.

- En cada una de las pruebas realizadas se estima el desplazamiento del centroide, provocado por los efectos de intracavidad del láser, proyectados a la distancia de la tercera cámara a partir de las dos primeras y se compara el resultado obtenido con el valor real adquirido en la tercera cámara, donde aparte del efecto del bandeo del láser, se suman los efectos debidos a los cambios atmosféricos provocados por el flujo turbulento. Para el caso de la Prueba Patrón, el comportamiento del centroide es muy similar al estimado, obteniendo desplazamientos de máximo 8 píxeles radialmente para el caso del estimado y 6 píxeles para el medido, valores prácticamente iguales dentro del límite de resolución del dispositivo, que es de un píxel. Esto se da debido a que no hay variación de los patrones atmosféricos durante la prueba. De la misma forma a medida que aumenta la velocidad del aire en cada prueba para el montaje ubicado de forma longitudinal, se evidencian mayores dispersiones del centro masa y desplazamientos con mayor magnitud de cada muestra, alcanzando valores de hasta 36 píxeles de desplazamiento radial. Esto garantiza que a medida que aumenta la velocidad del aire en el sistema turbulador, mayor será la variación del centroide del haz láser.
- Si se comparan los resultados obtenidos por el montaje ubicado transversalmente con respecto al montaje ubicado longitudinalmente, se observan más variaciones para el segundo caso, obteniendo desplazamientos hasta de 36 píxeles del centroide de forma radial, mientras que para el primer caso se obtienen movimientos de máximo 13 píxeles. Vale la pena aclarar que para el caso transversal, el aire interactúa con el haz láser en un corto trayecto (3 pulgadas), mientras que para el montaje longitudinal, la velocidad del aire afecta el haz por un tramo de 130 cm. Los resultados obtenidos por el montaje transversal en la cámara 3, a pesar de que aumenta en 1 o 2 píxeles para cada velocidad establecida, son casi iguales a los valores estimados por las cámaras 1 y 2 dentro del límite de resolución de las cámaras.

- Para el estudio del ángulo formado por la desviación del haz láser, se comparan los resultados obtenidos por el sistema ubicado de forma longitudinal y transversal y se observa que existen más variaciones para el montaje longitudinal del turbulador, obteniendo inclinaciones máximas de 45,6 microradianes de forma radial, mientras que para el segundo caso (transversal) se obtienen inclinaciones máximas de 16 microradianes. Cabe aclarar, como en el apartado anterior, que para el caso transversal el aire interactúa con el haz láser en un corto trayecto (3 pulgadas), mientras que para el montaje longitudinal, la velocidad del aire afecta el haz por un tramo de 130 cm.
- Al analizar los resultados de las Tablas 4 y 5, donde se evidencia la máxima variación del centroide y su ángulo en forma radial, horizontal y vertical para cada una de las pruebas realizadas, es posible concluir que existe mayor variación del centroide y su ángulo en el eje de coordenada Y (vertical) que en su contraparte X (horizontal), debido a que existe una mayor variación de velocidad del aire a lo alto del turbulador con respecto a su ancho. En la caracterización del mismo, se observó una mayor concentración de velocidad del aire distribuido en Y (Figura 25) diferente a la concentración de velocidad de aire caracterizado en X (Figura 23), teniendo en cuenta que cada 20 muestras se suministró el mismo flujo de aire proporcionado por el ventilador centrífugo.
- Utilizando la función estructura se observó que las fluctuaciones del centroide y ángulo incrementan a mayores niveles de velocidad del aire en el sistema turbulador ubicado longitudinalmente, mientras que en el turbulador ubicado de forma transversal se observó que estas fluctuaciones se presentaban con menor intensidad en todas las pruebas.

5. TRABAJOS FUTUROS

- Utilizar un montaje de laboratorio donde sea posible afectar el haz láser de forma transversal por una longitud de propagación considerable (100cm), para comparar los resultados con los obtenidos en este trabajo.
- Basados en la naturaleza de este proyecto se recomienda para trabajos futuros, analizar otros parámetros que afectan directamente la turbulencia atmosférica, como por ejemplo la presión atmosférica y con ello establecer el grado de la influencia de la velocidad del aire respecto a los demás parámetros.

REFERENCIAS

- [1] W. T. Rhodes, «Time-average Fourier telescoping: a scheme for high-resolution imaging through horizontal-path turbulence,» *Applied Optics*, vol. 51, nº 4, 2012.
- [2] B. Fernández, I. Tobalina, R. Borrego y A. Chacon, «Conceptos básicos de Óptica, ¿Qué es un láser?,» de *El láser, La luz de nuestro tiempo*, B. Fernández, R. Borrego, C. García, J. Pérez y C. Vázquez, Edits., Salamanca, Isabel Arias Tobalina, 2010, pp. 9-36.
- [3] L. R. Franco, «Centro de lasers pulsados,» CLPU, 2013. [En línea]. Available: <http://www.clpu.es/divulgacion/bits/como-funciona-un-laser>. [Último acceso: 13 Mayo 2016].
- [4] Spectra-Physics, «Model 107B/Model127 25 or 35 mW,» Spectra-Physics, Mountain View, Estados Unidos.
- [5] O. J. Tijero Rojas, Y. Torres Moreno y Y. Galeano, «Simple method to measure effects of horizontal atmospheric turbulence at ground level,» *Proceedings of SPIE*, pp. 1-11, 2016.
- [6] D. Optical, «Delta Optical Thin Film,» Delta Optical Thin Film A/S, [En línea]. Available: <http://www.deltaopticalthinfilm.com/products/beamsplitters-cubes/>. [Último acceso: 1 Junio 2016].
- [7] I. López Díaz, «Simulación numérica directa de turbulencia homogénea.,» de *Paralelización de un método pseudoespectral*, Sevilla, España, Biblioteca de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, 2006, pp. 4-5.
- [8] J. Angarita, Trabajo de grado: Diseño y construcción de una instalación para la calibración de medidores de velocidad de aire utilizando como patrón el banco de alto caudal del CDT de gas, Bucaramanga: Universidad Industrial

de Santander, 2010.

- [9] R. L. Mott, «Número de Reynolds, flujo laminar, flujo turbulento y pérdidas de energía debido a la fricción,» de *Mecánica de fluidos*, vol. 6, Mexico, Pearson Prentice Hall, 2006, pp. 226-254.
- [10] J. G. Navarro, «Mecanica de fluidos,» blogspot, 23 11 2015. [En línea]. Available:
<http://mecanicadefluidoscod5131587.blogspot.com.co/2015/11/perdidas-por-friccion-en-tuberias-con.html>. [Último acceso: 11 07 2016].
- [11] L. C. Andrews y R. L. Phillips, «Kolmogorov Theory of Turbulence,» de *Laser Beam Propagation through Random Media*, vol. 2, 2005, p. 58.
- [12] «Meteorología para todos,» 28 Febrero 2012. [En línea]. Available:
<http://www.meteoros.net/2012/02/turbulencia-atmosferica.html>. [Último acceso: 16 Junio 2016].
- [13] R. R. Carreras, «Efecto de la turbulencia atmosférica,» Escuela Politecnica Superior de la Universidad de Cordoba, [En línea]. Available:
<http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/41/tema11/tema11-10.htm>. [Último acceso: 16 08 2016].
- [14] E. M. R. A. M. L.-S. y E. B. C. S. «. d. a. d. h. c. a. t. P. Martín Rodríguez, «Utilización de anemómetro de hilo caliente a temperatura,» *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones RIELAC*, vol. 35, nº 1, pp. 78-92, 2014.
- [15] Honeywell, «Sensores de flujo Mass Airflow Manifold AWM43600V, Manual,» [En línea]. Available: <http://sensing.honeywell.com/AWM43600V-Airflow-Sensors>. [Último acceso: 05 5 2016].
- [16] Honeywell, «Installation Instructions for the 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,» Honeywell International Inc, Golden Valley, 2014.

- [17] Sensor Technics, «Calculating nonstandard from standard volumetric flow,» First Sensor, EEUU, 2009.
- [18] Y. Cengel y J. Cimbala, «Magnitud Sistema Métrico Sistema Inglés,» de *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*, Primera ed., McGraw-Hill, 2006.
- [19] J. C. Lopez, Trabajo de grado: 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., Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, E3T, 2016.
- [20] J. Villamizar y M. Herreño, Trabajo de grado: 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., Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [21] D. Liarte, «XATAKAFOTO,» 19 Diciembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.xatakafoto.com/camaras/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos>. [Último acceso: 5 Agosto 2016].
- [22] D. Malacara, «Procesamiento de Imágenes,» de *Óptica tradicional y moderna*, Méjico, Fonde de Cultura Ecómica USA, 1991, pp. 67-69.
- [23] R. Rodríguez, «Ruido Y Filtrado,» Universidad de Buenos Aires, 14 Junio 2015. [En línea]. Available: <http://www.dc.uba.ar/materias/t1/2015/c2/archivos/ClaseRuidoFiltrado2C2015.pdf>. [Último acceso: 10 Julio 2016].
- [24] Honeywell, «I2C Communication with Honeywell Digital Airflow Sensors,» Honeywell International Inc, Golden Valley, 2015.
- [25] EXTECH INSTRUMENTS, «Manual Termo-Anemómetro PCM/MCM Modelo AN100,» EXTECH INSTRUMENTS, 2006.
- [26] N. A. Bharmal, «Frozen flow or not? Investigating the predictability,» de *Adapting to the Atmosphere Conference*, 2014.

- [27] E. d. I. F. López y F. M. Trespaderne, «Morfología,» Universidad de Valladolid, Valladolid, 2012.
- [28] G. G. M. Funes, «Determinación de la constante de estructura del aire turbulento mediante interferometría Young,» Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, 2011.
- [29] Arduino, «Arduino Uno,» Arduino, [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. [Último acceso: 12 07 2016].

BIBLIOGRAFÍA

Arduino, «Arduino Uno,» Arduino, [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. [Último acceso: 12 07 2016].

B. Fernández, I. Tobalina, R. Borrego y A. Chacon, «Conceptos básicos de Óptica, ¿Qué es un láser?,» de El láser, La luz de nuestro tiempo, B. Fernández, R. Borrego, C. García, J. Pérez y C. Vázquez, Edits., Salamanca, Isabel Arias Tobalina, 2010, pp. 9-36.

D. Liarte, «XATAKAFOTO,» 19 Diciembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.xatakafoto.com/camaras/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos>. [Último acceso: 5 Agosto 2016].

D. Malacara, «Procesamiento de Imágenes,» de Óptica tradicional y moderna, Méjico, Fonde de Cultura Ecómica USA, 1991, pp. 67-69.

D. Optical, «Delta Optical Thin Film,» Delta Optical Thin Film A/S, [En línea]. Available: <http://www.deltaopticalthinfilm.com/products/beamsplitters-cubes/>. [Último acceso: 1 Junio 2016].

E. d. I. F. López y F. M. Trespaderne, «Morfología,» Universidad de Valladolid, Valladolid, 2012.

E. M. R. A. M. L.-S. y E. B. C. S. «. d. a. d. h. c. a. t. P. Martín Rodriguez, «Utilización de anemómetro de hilo caliente a temperatura,» Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones RIELAC, vol. 35, nº 1, pp. 78-92, 2014.

EXTECH INSTRUMENTS, «Manual Termo-Anemómetro PCM/MCM Modelo AN100,» EXTECH INSTRUMENTS, 2006.

G. G. M. Funes, «Determinación de la constante de estructura del aire turbulento mediante interferometría Young,» Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, 2011.

Honeywell, «I2C Communication with Honeywell Digital Airflow Sensors,» Honeywell International Inc, Golden Valley, 2015.

Honeywell, «Installation Instructions for the Honeywell Zephyr™ Digital Aiflow Sensors HAF Series–High Accuracy, 10 SLPM, 15 SLPM, 20 SLPM, 50 SLPM, 100 SLPM, 200 SLPM or 300 SLPM, Datasheet,» Honeywell International Inc, Golden Valley, 2014.

Honeywell, «Sensores de flujo Mass Airflow Manifold AWM43600V, Manual,» [En línea]. Available: <http://sensing.honeywell.com/AWM43600V-Airflow-Sensors>. [Último acceso: 05 5 2016].

I. López Díaz, «Simulación numérica directa de turbulencia homogénea.,» de Paralelización de un método pseudoespectral, Sevilla, España, Biblioteca de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, 2006, pp. 4-5.

J. Angarita, Trabajo de grado: Diseño y construcción de una instalación para la calibración de medidores de velocidad de aire utilizando como patrón el banco de alto caudal del CDT de gas, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010.

J. C. Lopez, Trabajo de grado: 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., Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, E3T, 2016.

J. G. Navarro, «Mecanica de fluidos,» blogspot, 23 11 2015. [En línea]. Available: <http://mecanicadefluidoscod5131587.blogspot.com.co/2015/11/perdidas-por-friccion-en-tuberias-con.html>. [Último acceso: 11 07 2016].

J. Villamizar y M. Herreño, Trabajo de grado: 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., Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.

L. C. Andrews y R. L. Phillips, « Kolmogorov Theory of Turbulence,» de Laser Beam Propagation through Random Media, vol. 2, 2005, p. 58.

L. R. Franco, «Centro de laseres pulsados,» CLPU, 2013. [En línea]. Available: <http://www.clpu.es/divulgacion/bits/como-funciona-un-laser>. [Último acceso: 13 Mayo 2016].

Meteorología para todos,» 28 Febrero 2012. [En línea]. Available: <http://www.meteoros.net/2012/02/turbulencia-atmosferica.html>. [Último acceso: 16 Junio 2016].

N. A. Bharmal, «Frozen flow or not? Investigating the predictability,» de Adapting to the Atmosphere Conference, 2014.

O. J. Tijero Rojas, Y. Torres Moreno y Y. Galeano, «Simple method to measure effects of horizontal atmospheric turbulence at ground level,» Proceedings of SPIE, pp. 1-11, 2016.

R. L. Mott, «Número de Reynolds, flujo laminar, flujo turbulento y pérdidas de energía debido a la fricción,» de Mecánica de fluidos, vol. 6, Mexico, Pearson Prentice Hall, 2006, pp. 226-254.

R. R. Carreras, «Efecto de la turbulencia atmosférica,» Escuela Politecnica Superior de la Universidad de Cordoba, [En línea]. Available: <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/41/tema11/tema11-10.htm>. [Último acceso: 16 08 2016].

R. Rodríguez, «Ruido Y Filtrado,» Universidad de Buenos Aires, 14 Junio 2015. [En línea]. Available: <http://www.dc.uba.ar/materias/t1/2015/c2/archivos/ClaseRuidoFiltrado2C2015.pdf>. [Último acceso: 10 Julio 2016].

Sensor Technics, «Calculating nonstandard from standard volumetric flow,» First Sensor, EEUU, 2009.

Spectra-Physics, «Model 107B/Model127 25 or 35 mW,» Spectra-Physics, Mountain View, Estados Unidos.

W. T. Rhodes, «Time-average Fourier telescopy: a scheme for high-resolution imaging through horizontal-path turbulence,» Applied Optics, vol. 51, nº 4, 2012.

Y. Cengel y J. Cimbala, «Magnitud Sistema Métrico Sistema Inglés,» de Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones, Primera ed., McGraw-Hill, 2006.

ANEXOS

ANEXO A. HERRAMIENTAS DE ADQUISICION DE DATOS

Arduino

Arduino es una placa con un microcontrolador de la marca Atmel y con toda la circuitería de soporte, que incluye, reguladores de tensión, un puerto USB conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC de manera cómoda y también hacer pruebas de comunicación con el propio chip [29].

Figura 83. Placa de Arduino



(Tomado de la referencia [29])

Tabla 12. Algunas especificaciones técnicas del Arduino UNO.

| | |
|----------------------------|--------------------|
| Microcontrolador | ATmega328P |
| Voltaje de operación | 5V |
| Pines digitales I/O | 14 |
| Pines de entrada analógica | 6 (2 Modulo I2C) |
| Corriente DC por Pin I/O | 20 mA |
| Corriente DC por Pin 3.3V | 50 mA |
| Memoria FLASH | 32 KB (ATmega328P) |
| SRAM | 2 KB (ATmega328P) |
| EEPROM | 1 KB (ATmega328P) |
| Velocidad de reloj | 16 MHz |

Sensor de Flujo Honeywell

Los sensores Honeywell Zephyr de la serie HAF (High Accuracy) o alta precisión proporcionan una interfaz digital para la lectura de flujo de aire sobre el flujo a gran escala especificada y rangos de temperatura compensada. El calentador aislado térmicamente y los elementos de sensado de temperatura ayudan a los sensores a proporcionar una respuesta rápida al flujo de aire o gas [16].

Tabla 13. Algunas especificaciones técnicas del Sensor Honeywell.

| | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| Acondicionador de señal | Amplificado, Compensado |
| Rango de presión/flujo | 50 SLPM |
| Voltaje de alimentación | 3 Vdc a 10 Vdc |
| Corriente de alimentación | 20 mA max |
| Nombre de la serie | HAF Series – High Accuracy |
| Potencia | 60 mW a 200 mW |
| Rango de temperatura | -20 °C a 70 °C [-4 °F a 158 °F] |
| Gas de calibración | Aire seco |
| Tiempo de respuesta de fluido | 1 ms |
| Bus estándar | I2C modo rápido (hasta 400 kHz) |
| Resolución | 0.008 SLPM |
| Salida | Digital (PC) |

Hyperterminal

HyperTerminal es un programa que se puede utilizar para conectar con otros equipos, sitios Telnet, sistemas de boletines electrónicos (BBS, Bulletin Board Systems), servicios en línea y equipos host, mediante un módem, un cable de módem nulo o una conexión (Winsock) TCP/IP.

ANEXO B. ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE SENSORES

```
#include <Wire.h>
#include <TimerOne.h>
#define direccion_sensor 0x49

int sensor_luz, salida_digital;
byte flujo1,flujo2;
float flujo;
signed long blinkCount = 0, S=-1;
unsigned long Starttime, t1,t2,t3,tiempo1;
boolean x = 1;
float vel1;
void setup()
{
  Wire.begin();
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Inicio");
}
void loop()
{
  sensor_luz = analogRead(A0);
  float area=(3.14*(0.0047625*0.0047625));
  float presion= (14.696/13.149);
  float temp = (298.15/273.15);

  if (sensor_luz < 240)
  {
    if (x)
    {
      Starttime=millis();
      Timer1.initialize(1000000);
      Timer1.attachInterrupt(ISR_Blink);
      x=0;
    }
    else
    {
      blinkCount++;
      if (S < 2002)
      {
        t1=millis();
        Wire.requestFrom(direccion_sensor,2);
        flujo1=Wire.read();
        flujo2=Wire.read();
        int temp3 = analogRead(A3);
        int volt = analogRead(A2);
        float temperatura3 = (temp3/1023.0)*500;
```

```

float hum = (5.0/1023.0)*volt;
float fre = (-4.4944*(hum*hum))+(280.53*hum)+5978.6;
float humedad =(0.000000012158222*(fre*fre*fre))-
(0.000219300921059*(fre*fre))+(1.20941831786789*fre)-1869.82713712457;

salida_digital=flujo1<<8;
salida_digital=salida_digital+flujo2;
salida_digital=salida_digital;
flujo = 49.9*((salida_digital/16383.0)-0.099)/0.79; //Ecuación de digital a análoga
float lpm = flujo*presion*temp; //Pasar SLPM a LPM
float m3s = lpm/60000; //Pasar de LPM a m3/s
float ms = m3s/area; //Pasar de flujo a velocidad en m/s
float vel_fuera = (0,9961*ms)+ 0.4458 //Ecuación de calibración.
float reynold = ((0.0762*ms)/0.00001565); //Calcular número de Reynolds

Serial.print(S);
Serial.print("\t");
Serial.print(vel1,4);
Serial.print("\t");
Serial.print(tiempo1);
Serial.print("\t");
Serial.print(temperatura3);
Serial.print("\t");
Serial.println(humedad);
}
else
{
Timer1.stop();
}
}
}
}
void ISR_Blink()
{
tiempo1=millis()- Starttime;
S++;
}

```

ANEXO C. ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE IMAGENES

```
clc
close all;
clear all;
muestras=2000;
periodo=1;
expl=0.290;
retardo=0.1;

h=actxcontrol('UEYECAM.uEyeCamCtrl.1','position',[0 0 1024 1280]);
h.InitCamera(1); %Camera cerca: #1. Camera lejos: #2
h.SetPixelClock(34);
h.SetFrameRate(19.78);
pause(1);
h.SetExposureTime(expl); %Asigna Tiempo de Exposición
image=h.StopLiveVideo(1); %Detenemos la cámara
Width=h.GetImageWidth; %Ancho de la Imagen
Height=h.GetImageHeight; %Altura de la Imagen
image=uint8(zeros(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);
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='error';

disp('listo para capturar');
while 1
    h.FreezeImage(1);
    hMem=h.GetImageMem;
    u=CopyImage_Matlab(hMem,ImSize);
    I=u>30;
    if(sum(I)>2000)
        tic;
```

```
        start(t);
        break
    end
end
function iol_52(obj,event,h,ImSize)

    r1=toc;
    hMem1=h.GetImageMem;
    h.FreezeImage(1);
    u1=CopyImage_Matlab(hMem1,ImSize
    u11=u1(3:4:end);
    r2=toc;
    save(['C:\Users\Omar\Documents\MATLAB\3pc\cam\'
num2str(obj.TasksExecuted) '.mat'], 'u11', 'r1', 'r2');
    disp(obj.TasksExecuted);

end
```

ANEXO D. TEMPERATURA Y HUMEDAD MEDIDA EN LAS PRUEBAS REALIZADAS

Figura 84. Temperatura del aire obtenido en las pruebas.

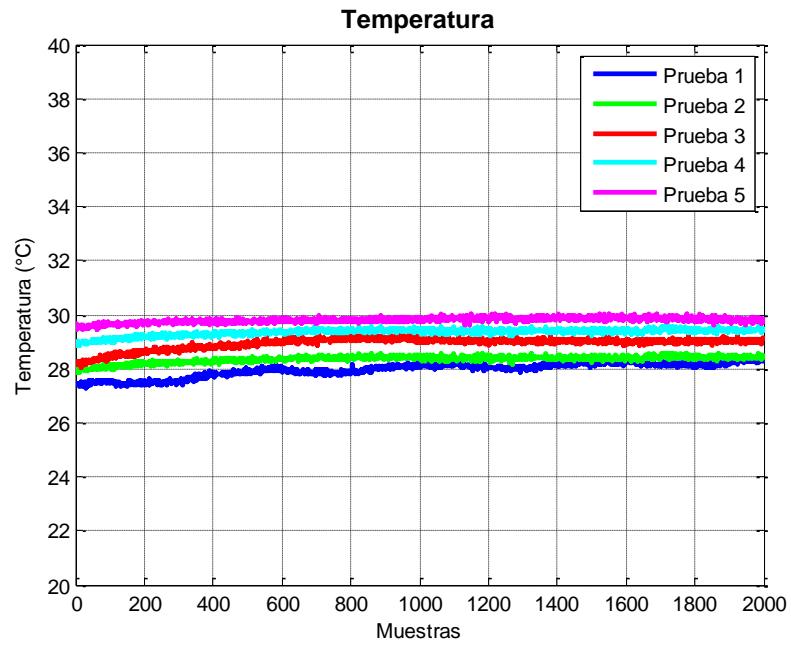


Figura 85. Humedad relativa del aire obtenido en las pruebas.

