

**CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE LA PRESIÓN EN LA PROPAGACIÓN
DE UN HAZ LÁSER A TRAVÉS DE LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA EN
TRAYECTORIAS HORIZONTALES A BAJAS ALTURAS.**

WILSON YULIAN PINZÓN SIERRA

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

2017

**CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE LA PRESIÓN EN LA PROPAGACIÓN
DE UN HAZ LÁSER A TRAVÉS DE LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA EN
TRAYECTORIAS HORIZONTALES A BAJAS ALTURAS.**

WILSON YULIAN PINZÓN SIERRA

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

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

2017

DEDICATORIA

A mi madre Lucila Sierra, la motivación más importante para lograr mis metas.

A mis hermanas Susan y Darcy por su apoyo y comprensión.

. 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.

Wilson Yulian Pinzón Sierra.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresan su agradecimiento a:

Agradecer al profesor Omar Javier Tíjaro, director de proyecto, por su apoyo y confianza, por su colaboración para vincularme al grupo de investigación (GOTS) y por la paciencia y esmero a la hora de compartir conocimientos.

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 me brindaron para la correcta ejecución del trabajo de grado.

A la Universidad Industrial de Santander por ser el pilar de mi desarrollo como ingeniero, 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	18
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	19
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.2 JUSTIFICACIÓN	19
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.	20
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	20
1.4 ALCANCES	21
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	22
2.1 EL LÁSER	22
2.1.1 CONCEPTOS BÁSICOS	23
2.1.3 LÁSER HELIO-NEÓN	27
2.2 EFECTOS GENERADOS EN LA CAVIDAD LÁSER	30
2.3 TURBULENCIA ATMOSFÉRICA	31
2.3.1 FUNCIÓN ESTRUCTURA:	32
2.4 PRESIÓN	32
2.4.1 PRESIÓN ATMOSFÉRICA	33
2.4.2 PRESIÓN MANOMÉTRICA	33
2.5 SENSORES Y ADQUISICIÓN DE DATOS	33
2.5.1 SENSORES CMOS	34
2.5.2 SENSOR INTEGRADO DE PRESIÓN	36
2.5.3 EQUIPOS DE ADQUISICIÓN	38
3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO	39
3.1 ACONDICIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.	39
3.1.1 ATENUADORES O FILTROS DE DENSIDAD NEUTRA	40
3.1.2 DIVISOR DE HAZ O BEAM SPLITTER	40
3.1.3 SENSOR DE PRESIÓN	41
3.1.4 COMPRESOR	41
3.1.5 TURBULADOR	42

3.1.6 TERMINALES DE CÓMPUTO	42
3.2 CALIBRACIÓN SENSOR DE PRESIÓN MPXHZ6250A	43
3.3 SINCRONIZACIÓN DE SENSORES	45
3.4 ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE LAS CÁMARAS.	48
3.5 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS REALIZADAS.	50
3.6 TRATAMIENTO DE IMÁGENES	52
3.6.1 INICIO	53
3.6.2 FILTRADO	53
3.6.3 NORMALIZACIÓN	54
3.6.4 BINARIZACIÓN	54
3.6.5 ARREGLOS MORFOLÓGICOS	55
3.6.6 CÁLCULO DEL CENTROIDE	55
3.6.7 EJES PRINCIPALES, ORIENTACIÓN Y CORTE DE LOS EJES	55
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
4.1 ESTUDIO DEL CENTROIDE	58
4.1.1 PRUEBA PATRÓN:	58
4.1.2 PRUEBA 15 [PSI]	62
4.1.3 PRUEBA A 20 [PSI]	64
4.1.4 PRUEBA A 25 [PSI]	67
4.1.5 PRUEBA A 30 [PSI]	70
4.1.6 PRUEBA A 35 [PSI]	72
4.1.7 PRUEBA DE 35 [PSI] A PRESIÓN ATMOSFÉRICA	75
4.2 COMPARACIÓN CORTE DE LOS EJES PRINCIPALES CON EL CENTROIDE.	79
4.2.1 PRUEBA PATRÓN.	79
4.2.2 PRUEBA 15 [PSI]	81
4.2.3 PRUEBA 20 [PSI].	81
4.2.4 PRUEBA 25 [PSI].	82
4.2.5 PRUEBA 30 [PSI].	83
4.2.6 PRUEBA 35 [PSI].	84
4.3 ESTUDIO DE LA FUNCIÓN ESTRUCTURA	86
5. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	91
REFERENCIAS	94
BIBLIOGRAFÍA	96
ANEXOS	99

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Emisión de luz de una lámpara común vs. Emisión de un haz láser.	22
Figura 2. Absorción.	23
Figura 3. Emisión espontánea	24
Figura 4. Emisión estimulada.	25
Figura 5. Oscilador óptico.	26
Figura 6. Resonador óptico.	26
Figura 7. Diagrama de niveles de energía para el sistema He-Ne	28
Figura 8. Estructura básica de un láser de He-Ne	29
Figura 9. Montaje experimental.	30
Figura 10. Haz inicial (t_1) – Desplazamiento dado por inclinación y traslación (t_2).	31
Figura 11. Funcionamiento de un sensor CMOS	34
Figura 12. Cámara con Sensor tipo CMOS	36
Figura 13. Sensor MPXHZ6250A	36
Figura 14. Esquema del sensor de presión.	37
Figura 15. Montaje para operación.	37
Figura 16. Montaje experimental	39
Figura 17. Filtro de densidad neutra.	40
Figura 18. Divisor de haz.	40
Figura 19. Sensor MPXHZ6250A, montaje final.	41
Figura 20. Turbulador, manómetro analógico de respaldo y compresor	41
Figura 21. a) Turbulador. b) Brida con vidrio y empaque neumático.	42
Figura 22. Curvas de calibración del sensor MPXHZ6250A.	44
Figura 23. Curvas del Sensor Ajustado e Instrumento Patrón	45

Figura 24. Esquemático del circuito de inicialización para los sensores.	46
Figura 25. Prueba de Sincronización	47
Figura 26. Montaje experimental, Z1=118 [cm], Z2=145 [cm], Z3=397 [cm]	49
Figura 27. Diagrama de flujo del código de adquisición de las cámaras e inicialización del registro de variables físicas.	50
Figura 28. Algoritmo de tratamiento de imágenes.	52
Figura 29. a) Imagen Original b) Imagen filtrada empleando FFT2 (Matlab)	53
Figura 30. a) Imagen sin Normalizar. b) Imagen Normalizada.	54
Figura 31. a) Imagen sin binarizar. b) Imagen binarizada.	54
Figura 32. Orientación, Eje Mayor y Eje Menor de una elipse.	56
Figura 33. Dispersión del centroide de la Prueba patrón. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda) y b) Visto desde CMOS3 (derecha).	59
Figura 34. Movimiento radial del centroide obtenido de la Prueba patrón, en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	60
Figura 35. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba patrón, en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	60
Figura 36. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba patrón, en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	61
Figura 37. Dispersión del centroide obtenido de la Prueba 15 [psi]. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS3 (derecha).	62
Figura 38. Movimiento radial del centroide obtenido de la Prueba 15 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	63
Figura 39. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba 15 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	63
Figura 40. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba 15 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	64
Figura 41. Dispersión del centroide obtenido de la Prueba 20 [psi]. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS3 (derecha).	64
Figura 42. Movimiento radial del centroide en obtenido de la Prueba 20 [psi], CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	65

Figura 43. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba 20 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	66
Figura 44. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba 20 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	66
Figura 45. Dispersión del centroide obtenido de la Prueba 25 [psi]. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS3 (derecha).	67
Figura 46. Movimiento radial del centroide obtenido de la Prueba 25 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	68
Figura 47. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba 25 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	69
Figura 48. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba 25 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	69
Figura 49. Dispersión del centroide obtenido de la Prueba 30 [psi]. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS3 (derecha).	70
Figura 50. Movimiento radial del centroide obtenido de la Prueba 30 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	71
Figura 51. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba 30 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	71
Figura 52. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba 30 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	72
Figura 53. Dispersión del centroide obtenido de la Prueba 35 [psi]. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS3 (derecha).	72
Figura 54. Movimiento radial del centroide obtenido de la Prueba 35 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	73
Figura 55. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba 35 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	74
Figura 56. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba 35 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	74

Figura 57. Dispersión del centroide obtenido de la Prueba de 35 [psi] a presión atmosférica. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS3 (derecha).	76
Figura 58. Movimiento radial del centroide obtenido de la Prueba de 35 [psi] a presión atmosférica, en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	76
Figura 59. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba de 35 [psi] a presión atmosférica, en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	77
Figura 60. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba de 35 [psi] a presión atmosférica, en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).	77
Figura 61 Movimiento radial del centroide obtenido en la Prueba Patrón, en CMOS3 (AZUL) y movimiento radial del corte de los ejes principales (ROJO).	80
Figura 62 Correlación entre el Movimiento Radial del centroide en CMOS3 y el movimiento radial del corte de los ejes principales para la Prueba Patrón.	80
Figura 63 Movimiento radial del centroide obtenido en la Prueba de 15 [psi], en CMOS3 (AZUL) y movimiento radial del corte de los ejes principales (ROJO).	81
Figura 64 Movimiento radial del centroide obtenido en la Prueba de 20 [psi], en CMOS3 (AZUL) y movimiento radial del corte de los ejes principales (ROJO).	82
Figura 65 Movimiento radial del centroide obtenido en la Prueba de 25 [psi], en CMOS3 (AZUL) y movimiento radial del corte de los ejes principales (ROJO).	83
Figura 66 Movimiento radial del centroide obtenido en la Prueba de 30 [psi], en CMOS3 (AZUL) y movimiento radial del corte de los ejes principales (ROJO).	84

Figura 67 Movimiento radial del centroide obtenido en la Prueba de 35 [psi], en CMOS3 (AZUL) y movimiento radial del corte de los ejes principales (ROJO).	85
Figura 68. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba Patrón. a) Radial b) Horizontal c) Vertical.	86
Figura 69. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba 15 [psi]. a) Radial b) Horizontal c) Vertical.	87
Figura 70. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba 20 [psi]. a) Radial b) Horizontal c) Vertical.	87
Figura 71. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba 25 [psi]. a) Radial b) Horizontal c) Vertical.	88
Figura 72. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba 30 [psi]. a) Radial b) Horizontal c) Vertical.	88
Figura 73. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba 35 [psi]. a) Radial b) Horizontal c) Vertical.	89
Figura 74 Placa de Arduino	99
Figura 75. Híper Terminal.	100
Figura 76. Manómetro calibrado utilizado para la calibración del sensor de presión	101
Figura 77. Humedad Relativa dentro del turbulador medida en cada prueba.	104
Figura 78. Temperatura medida dentro del turbulador en cada prueba.	104

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones técnicas del Láser Utilizado	29
Tabla 2. Propiedades del sensor CMOS EO-1312.....	35
Tabla 3. Características principales Sensor MPXHZ6250A.	38
Tabla 4. Retardos con respecto a la cámara 1	48
Tabla 5. Tiempo de exposición y distancia de cada cámara.	49
Tabla 6. Pruebas realizadas.....	51
Tabla 7 Datos relevantes Movimiento radial del centroide.	78
Tabla 8. Coeficientes de la correlación entre movimiento radial del centroide en CMOS3 y el movimiento radial del corte de los ejes principales obtenidos para cada prueba.....	85
Tabla 9. Fluctuaciones promedio del centroide.	89
Tabla 10 Algunas especificaciones técnicas del Arduino UNO.	99

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. ARDUINO UNO	99
ANEXO B. HÍPER TERMINAL	100
ANEXO C. INSTRUMENTO PATRÓN	101
ANEXO D. ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE IMAGENES	102
ANEXO E. VARIABLES ADICIONALES SENSADAS.....	104

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE LA PRESIÓN EN LA PROPAGACIÓN DE UN HAZ LÁSER A TRAVÉS DE LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA EN TRAYECTORIAS HORIZONTALES A BAJAS ALTURAS^{*}.

AUTORES: WILSON YULIAN PINZÓN SIERRA^{**}

PALABRAS CLAVE: Presión Atmosférica, Turbulencia Atmosférica, Haz Láser, Centroides.

DESCRIPCIÓN:

Se presentan los efectos que ejerce la presión sobre un haz láser que se propaga a través de la turbulencia atmosférica en trayectorias horizontales a bajas alturas y en un ambiente de laboratorio. Por lo tanto, se utilizó un generador turbulencia óptica, en el que se hicieron variaciones de presión controladas con el objetivo de poder adquirir datos que se analizaron posteriormente

El medio turbulento usado consta de un montaje de laboratorio compuesto por un tubo cilíndrico confinado por el cual se propagó el haz láser (y dónde se varió la presión), tres cámaras CMOS y un sensor de presión de silicio de la serie MPXHZ6250A. Este arreglo de cámaras y sensor fueron sincronizados ópticamente para garantizar que los tiempos de adquisición iniciaran al mismo instante y las herramientas de software (Matlab® y Arduino) utilizaron temporizadores para garantizar el mismo periodo de muestreo.

Cada adquisición se realizó variando las condiciones de presión a diferentes horas del día. Después de la toma de datos, se calculó el centroide y los ejes principales a cada imagen para el análisis de su distribución temporal.

^{*} 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 EFFECTS IN THE PROPAGATION OF A LASER BEAM THROUGH ATMOSPHERIC TURBULENCE IN HORIZONTAL PATH AT GROUND LEVEL *

AUTHORS: WILSON YULIAN PINZÓN SIERRA **

KEY WORDS: Atmospheric Pressure, Atmospheric Turbulence, Laser Beam, Centroids

DESCRIPTION:

This project presents the effects due to pressure on a laser beam propagating through atmospheric turbulence in horizontal paths at ground level. Thus, we used an optical turbulence generator in which controlled pressure variations were made to acquire data that were analyzed off line.

The turbulent medium was composed by a cylindrical tube confined by which the laser beam was propagated (where the pressure was controlled); three CMOS cameras and silicon pressure sensor of MPXHZ6250A series have been used. This arrangement of cameras and sensor were optical synchronized to guarantee the same initial acquisition time, and software platforms (Matlab® and Arduino) used timers with the same sample frequency.

Each acquisition was executed with a specific and controlled pressure in a different day hour. So, the next step was to calculate centroids and main axis over each image to make a detailed analysis of temporal distribution of the frontwave of the laser beam.

* End of degree work

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

INTRODUCCIÓN

Desde que existen registros de la historia para la humanidad, el entendimiento de los fenómenos físicos que ocurren a su alrededor ha sido una preocupación. La luz es uno de esos fenómenos que se ha presentado como un reto que hasta mediados del siglo pasado ha sido posible comenzar a superar. Con la aparición de la tecnología láser, en los años 60 del pasado siglo, se han venido desarrollando una infinidad de aplicaciones que cuentan con el láser, como una base de su evolución [1].

Para generar nuevas aplicaciones en las que se utiliza la luz y mejorar las existentes, surgen nuevos cuestionamientos que encaminan a la academia a generar experimentos para definir comportamientos de la luz en situaciones específicas. Como lo es el estudio de la propagación de un haz láser a través de la turbulencia atmosférica en trayectorias horizontales a bajas alturas [1].

La turbulencia atmosférica es un fenómeno que afecta la propagación de un haz láser, fenómeno que depende de diferentes condiciones presentes en el ambiente y que en éste caso, se centrará en el efecto que la presión ejerce sobre el haz en trayectorias horizontales a bajas alturas. Para poder generar una situación que simule la turbulencia, se hizo un montaje que contó con las características necesarias para la experimentación en el laboratorio, para la toma de las medidas y a su vez los efectos de presión sobre la propagación del haz.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El importante aporte que ha hecho la tecnología láser al desarrollo de teorías científicas hace que ésta siga concentrando muchos esfuerzos financieros y humanos. Por esto quedan aún gran cantidad de aplicaciones del láser como lo son las telecomunicaciones, la óptica o la instrumentación en las que es importante profundizar [1].

En la propagación de un haz láser a través de la turbulencia atmosférica se ha hecho un modelo bastante completo en trayectorias verticales [2] pero en trayectorias horizontales a bajas alturas aún no se ha determinado un modelo definido. Por lo cual se hace necesario hacer un estudio para determinar un modelo que se asemeje al comportamiento del haz en estas condiciones, para generar dicho modelo se deben tener en cuenta todos los factores que puedan incidir en el haz directa o indirectamente. Uno de esos factores es la turbulencia, la cual es generada por diferentes condiciones presentes en el ambiente tales como la temperatura, humedad, velocidad del aire, presión entre otras.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Al no existir un modelo que describa los comportamientos de un haz láser que se propaga en forma horizontal a través de la turbulencia atmosférica, se hace necesario hacer una investigación que tenga como objetivo determinar los comportamientos señalados.

Ahora bien, la turbulencia atmosférica es provocada por una gran cantidad de magnitudes y condiciones presentes en un medio de propagación, por esto para determinar cuál es el aporte de cada una de esas magnitudes es importante observar y caracterizar por separado las más relevantes. El presente trabajo de investigación se centró en la caracterización del efecto de la presión en la propagación de un haz láser a través de la turbulencia atmosférica en trayectorias horizontales a bajas alturas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General. Caracterizar el efecto de la presión en la propagación de un haz láser a través de la turbulencia atmosférica en trayectorias horizontales a bajas alturas.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Analizar y comprender la propagación de un haz láser.
- Identificar los efectos teóricos y el rol que juega la presión en la turbulencia atmosférica.
- Separar por medio de técnicas de bandeado los efectos naturales producidos por la cavidad del láser para medir los ejes principales de propagación y comparar su punto de corte con el centroide del spot.
- Realizar mediciones a diferentes presiones para verificar el cambio de la presión y su efecto sobre la turbulencia atmosférica.
- Correlacionar los efectos sufridos por el haz láser al propagarse, con los parámetros de presión de la turbulencia atmosférica que atraviesa.

1.4 ALCANCES

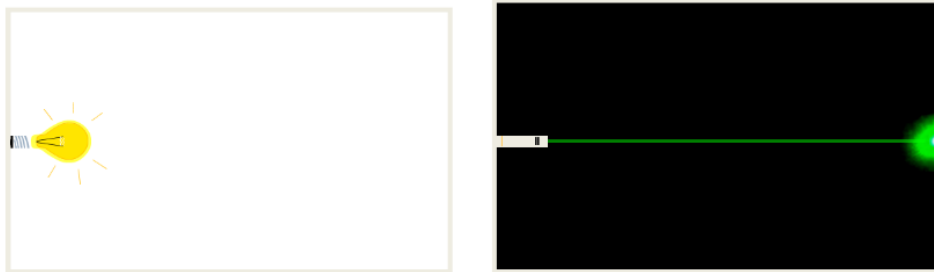
Se realizó un montaje experimental que permitió hacer variaciones de presión para estudiar el efecto de la misma sobre un haz láser que se propaga a bajas alturas. Este estudio consta de la evaluación y análisis del comportamiento del centroide y de la comparación del corte de los ejes principales con el centro de masa del spot.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 EL LÁSER

Un láser ubicado en la longitud de onda visible, se puede reconocer a simple vista pues emite un haz estrecho que da un punto de luz localizada, que puede visualizarse cuando un obstáculo como una pared (pantalla) se interpone en su camino. Los físicos dicen que se trata de un haz de luz coherente. Sus propiedades son diferentes a las de la luz emitida por las lámparas comunes, como (véase Figura 1): las bombillas incandescentes, luces de tubo, y diodos emisores de luz. Todos ellos emiten luz en todas las direcciones, lo cual es conveniente para iluminar una habitación o un espacio determinado [1]. Por otro lado, en la Figura 1 también se muestra una descripción gráfica del recorrido del haz y la interacción con una pantalla.

Figura 1. Emisión de luz de una lámpara común vs. Emisión de un haz láser.



(Tomado de la referencia [1])

2.1.1 Conceptos básicos

En las siguientes secciones, se muestra un pequeño resumen de cómo se genera la luz hasta llegar a los dispositivos utilizados.

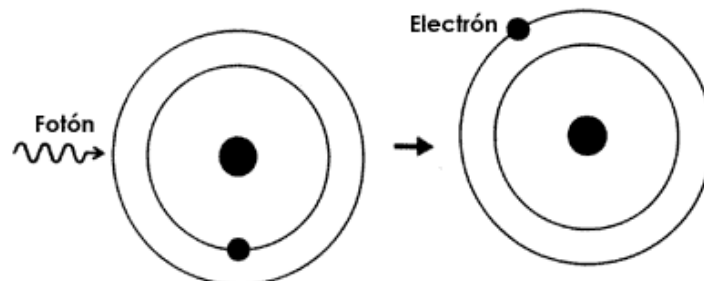
- **Interacción átomo-cuanto.**

Existen procesos básicos de interacción entre la materia y la radiación electromagnética que en su más pequeña escala se reducen a los procesos de interacción entre átomos y cuantos de energía de radiación electromagnética. Se conoce como *fotón* a un "cuanto de radiación electromagnética", término que introdujo Einstein al estudiar el efecto fotoeléctrico [3].

- **Absorción**

El primer proceso de interacción átomo-fotón es el proceso de absorción, que se muestra esquemáticamente en la figura 2. Consiste en la interacción entre un fotón y un átomo que inicialmente se encuentra en su estado base. El resultado de esta interacción, si ella es posible, es que el átomo "absorbe" al fotón y usa su energía para pasar a un estado excitado [3].

Figura 2. Absorción.

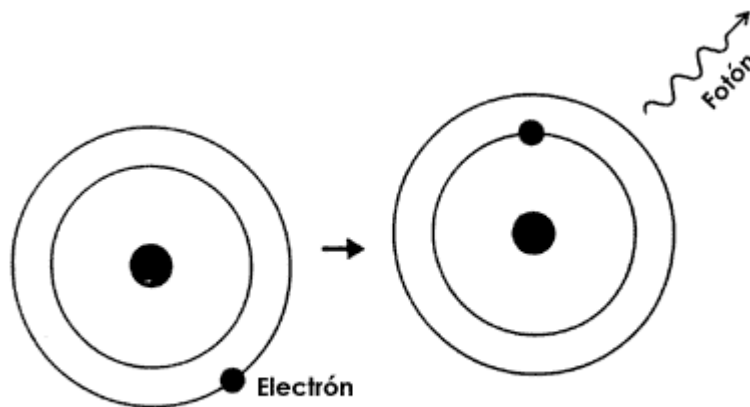


(Tomado de la referencia [3]).

- **Emisión espontánea**

El siguiente proceso importante de interacción átomo-fotón es el proceso de emisión espontánea, el cual se muestra esquemáticamente en la figura 3. Ahora se tiene un átomo ya excitado inicialmente, que en forma espontánea (y generalmente en un tiempo breve, del orden de 10^{-8} segundos) pasa a su estado base emitiendo en el proceso un fotón con energía igual a la diferencia de energía entre los dos estados. El fotón se emite en una dirección totalmente aleatoria, con una probabilidad previamente establecida[3].

Figura 3. Emisión espontánea



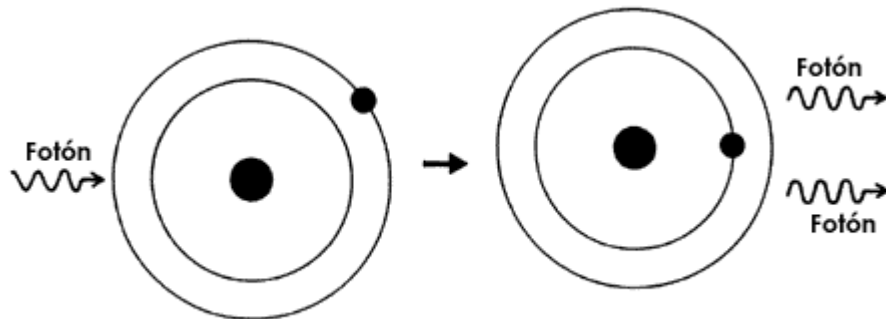
(Tomado de la referencia [3])

- **Emisión estimulada**

Finalmente, el otro proceso importante de interacción átomo-fotón es el proceso de emisión estimulada. Su existencia fue propuesta por Albert Einstein en 1917 y es el proceso fundamental gracias al cual existe el láser. La figura 4 muestra esquemáticamente tal proceso. En él se presenta la interacción entre un fotón y un átomo que inicialmente se encuentra en su estado excitado. Como resultado de

esta interacción el átomo pasa a su estado base emitiendo en el proceso un fotón que tiene las mismas características de dirección y de fase que el fotón inicial. Por lo tanto, se dice que la radiación electromagnética que resulta es coherente [3].

Figura 4. Emisión estimulada.



(Tomado de la referencia [3])

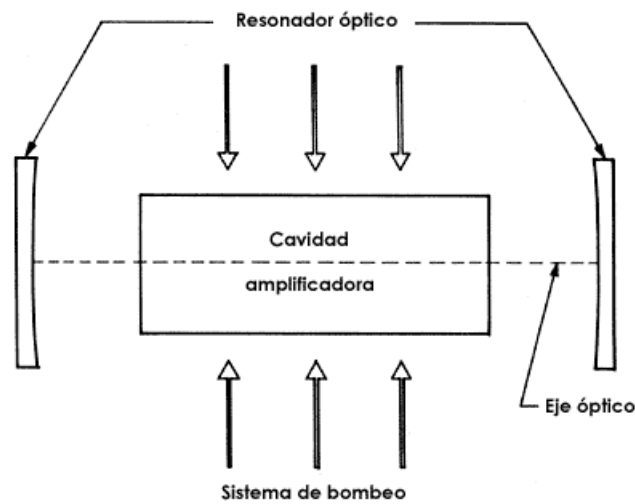
La semilla que dio origen al desarrollo del láser fue dada a la vida cuando este fenómeno de "emisión estimulada" fue propuesto. De hecho, la palabra láser es el acrónimo de la expresión en inglés "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*", que en español es traducido como "amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación" [3].

2.1.2 Componentes de un Oscilador óptico (Láser)

Consta de una cavidad amplificadora con un sistema de bombeo, a la cual se le coloca en sus extremos un par de espejos planos (o ligeramente cóncavos) tal como se muestra en la figura 5, donde la línea punteada indica el eje óptico del sistema.

Este par de espejos paralelos recibe el nombre de resonador óptico. Uno de los espejos del resonador es casi 100% reflector y el otro tiene una reflectancia típica de alrededor del 90% [3].

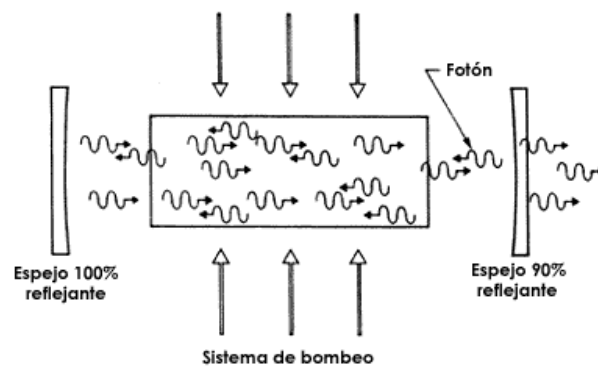
Figura 5. Oscilador óptico.



(Tomado de la referencia [3])

Para comprender qué función tiene el resonador óptico nos referiremos a la figura 6, la cual muestra al oscilador óptico inmediatamente después de que el sistema de bombeo fue disparado [3].

Figura 6. Resonador óptico.



(Tomado de la referencia [3])

Se puede ver que cualquier fotón que sea emitido en una dirección diferente de la definida por el eje óptico del resonador óptico saldrá del resonador mismo, mientras que cualquier fotón emitido a lo largo del eje óptico del oscilador será amplificado por el proceso de emisión estimulada e inmediatamente se genera un enorme flujo de fotones confinados por el resonador óptico, que se propaga a lo largo del eje óptico. Si el resonador óptico no estuviera allí, después de disparar el sistema de bombeo los átomos que fueron excitados pasarían a su estado base debido al proceso de emisión espontánea, emitiendo fotones en todas direcciones y perdiendo la energía recibida por el sistema de bombeo ya que el número de fotones por emisión espontánea superaría a los fotones por emisión estimulada [3].

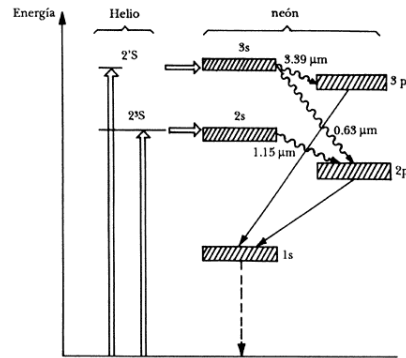
2.1.3 Láser Helio-Neón

El láser de helio-neón fue uno de los primeros láseres de gas que se construyó. Actualmente sigue siendo muy útil y se emplea con mucha frecuencia. En este tipo de láser, los centros activos son los átomos de neón, pero la excitación de éstos se realiza a través de los átomos de helio. Una mezcla típica de He-Ne para estos láseres contiene siete partes de helio por una parte de neón [3].

- **Funcionamiento del láser de helio-neón**

El bombeo del láser de He-Ne se realiza por medio de las colisiones que realizan los electrones de una descarga eléctrica, principalmente con los átomos de helio. Como resultado de estas colisiones, los átomos de helio son excitados a los niveles 2^1S y 2^3S como se puede apreciar en la figura 7 [3].

Figura 7. Diagrama de niveles de energía para el sistema He-Ne

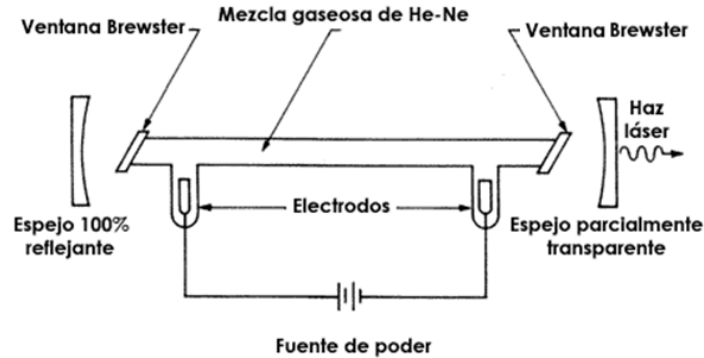


(Tomado de la referencia [2])

La excitación de los átomos de neón se logra debido a colisiones de éstos con átomos excitados de helio. Como resultado de dichas colisiones, los átomos de helio pasan a su estado base y los átomos de neón pasan del estado base a los estados 3s y 2s, creando una inversión de población entre estos niveles y los niveles 3p y 2p. Entre estos niveles energéticos puede ocurrir la oscilación láser. A partir de los niveles 3p y 2p, los átomos de neón decaen espontáneamente al nivel inferior 1s, de donde pasan al estado base debido a colisiones con otros átomos o con las paredes del tubo láser [3].

La figura 8 muestra la estructura básica de un láser de He-Ne. Las ventanas de Brewster instaladas en los extremos del tubo consisten en láminas de vidrio colocadas en un ángulo específico (llamado ángulo de Brewster) para disminuir al máximo las reflexiones de luz no deseada [3].

Figura 8. Estructura básica de un láser de He-Ne



(Tomado de la referencia [2])

Para el desarrollo del proyecto fue utilizado un láser de Helio-Neón con el que cuenta el laboratorio de óptica de la Escuela de Física. En la tabla 1 se muestran las especificaciones más relevantes del láser utilizado.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del Láser Utilizado

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]

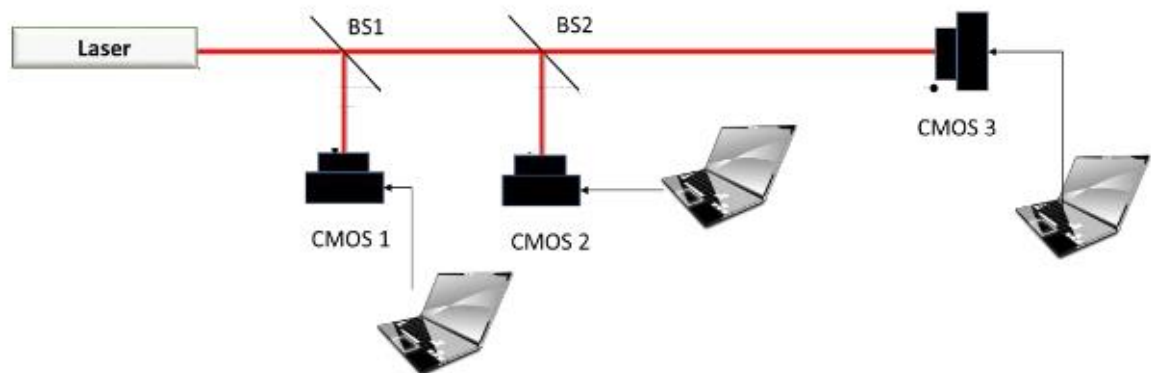
Tomado de la referencia [4].

A partir de las características encontradas del láser y en especial el de tipo Helio – Neón, en la siguiente sección, se presentan los fenómenos dados por la propia cavidad laser.

2.2 EFECTOS GENERADOS EN LA CAVIDAD LÁSER

En la cavidad láser se produce un efecto que se conoce como bandeo, éste se define como la desviación ligera del haz a medida que se propaga al interior de la cavidad. Para el desarrollo y análisis de éste proyecto es importante conocer y caracterizar el aporte que dicho efecto produce en la propagación del haz, con el fin de conocer las consecuencias que genera específicamente cambios de presión en la turbulencia. En la Figura 9, se puede apreciar el montaje experimental que se realizó para el estudio de los efectos de bandeo en el artículo “*Simple method to measure effects of horizontal atmospheric turbulence at ground level*” [5].

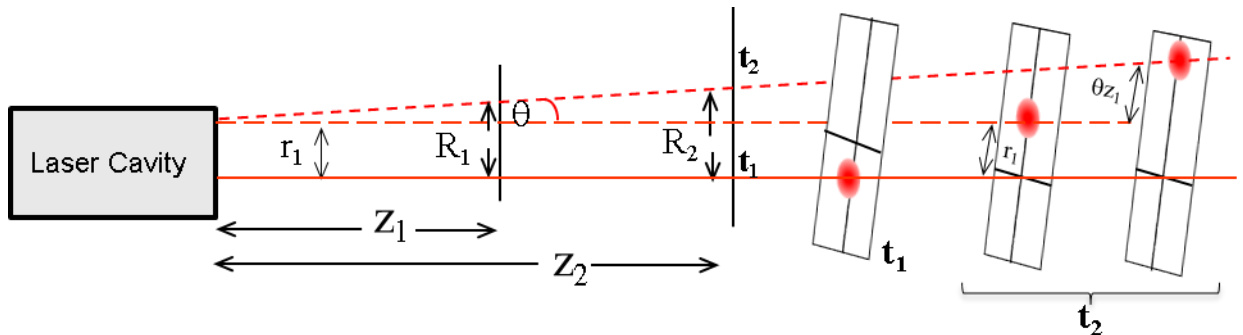
Figura 9. Montaje experimental.



(Tomado de la referencia [5])

Existen dos movimientos principales causados por la cavidad, inclinación y traslación. En la figura 10 se puede apreciar cómo se presentan estos movimientos en uno de los fotosensores [5].

Figura 10. Haz inicial (t_1) – Desplazamiento dado por inclinación y traslación (t_2).



(Tomado de la referencia [5])

2.3 TURBULENCIA ATMOSFÉRICA

La turbulencia es un fenómeno que ocurre en todos los fluidos. Principalmente en aquellos con poca viscosidad tales como el aire. Este fenómeno tiene características caóticas y estocásticas, siendo así uno de los problemas más complejos de la física. Uno de los modelos más usados para describir la turbulencia fue propuesto en los 40's por el matemático ruso A. N. Kolmogorov [2].

Según el modelo descrito por el matemático, el límite de tamaño de escala exterior de la estructura de turbulencia es fijado por el tamaño de las escalas físicas de los mecanismos de accionamiento. Los cuales, en el caso de la atmósfera, incluyen el aire y las corrientes de convección térmica. Las escalas de estructura intermedia son consideradas auto correlacionadas a través de una amplia gama de escalas en lo que se conoce como subrango inercial [2].

Las teorías de Kolmogorov han sido adoptadas por varios astrónomos que las han relacionado con telescopía, generando modelos y ecuaciones que han permitido determinar el comportamiento de la luz cuando atraviesa la turbulencia

atmosférica, logrando así importantes avances en la observación astronómica [2]. Estos estudios plantan unas bases sólidas para desarrollar nuevas investigaciones encaminadas a determinar el comportamiento de la luz ya no en trayectorias verticales (astronomía) sino ahora en trayectorias horizontales.

2.3.1 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.

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

Una vez hecho un breve resumen sobre la turbulencia atmosférica se continúa con una descripción más detallada de la variable de interés de este proyecto, la presión.

2.4 PRESIÓN

Las variables presión y fuerza están estrechamente relacionadas; sin embargo, mientras la Presión P se define como fuerza por área unitaria, la fuerza F se entiende como la magnitud de la fuerza que actúa perpendicularmente a la superficie de área A, lo cual se puede mostrar en la ecuación:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2)$$

El concepto de presión es particularmente útil al tratar con fluidos. Es un hecho experimental que un fluido ejerce una presión en todas direcciones. En cualquier profundidad de un fluido en reposo, la presión es la misma en todas direcciones a una profundidad dada [6].

2.4.1 Presión atmosférica

La presión del aire en un punto determinado de la Tierra varía ligeramente de acuerdo con el clima atmosférico. La presión que se debe al peso de la atmósfera se ejerce sobre todos los objetos inmersos en esta gran columna de aire, incluidos nuestros cuerpos. A nivel del mar, la presión atmosférica tiene un valor de $P_0 = 1.103 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (o 14,7 psi) lo que equivale a 1 atm, una atmósfera [6].

2.4.2 Presión manométrica

Es importante notar que los manómetros para instrumentos neumáticos, y de otros tipos, registran la presión por encima de la presión atmosférica, llamada presión manométrica. Así, para obtener la presión absoluta P , se debe sumar la presión atmosférica (P_0) a la presión manométrica [6]:

$$P = P_0 + P_G \quad (3)$$

En la siguiente sección, se detallarán los tipos de sensores que se utilizaron en la elaboración de este proyecto y por ende el dispositivo para medir presión.

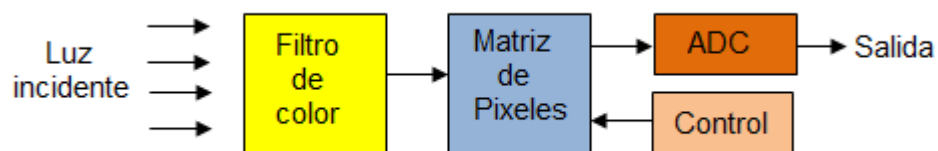
2.5 SENSORES Y ADQUISICIÓN DE DATOS

Para poder adquirir las imágenes del spot en este proyecto, es necesario conocer los elementos utilizados (que se describen en la sección 2.5.1) y, para poder visualizar su dependencia o no de la variable presión se utilizó un sensor (descrito en la sección 2.5.2) adaptado a los dispositivos utilizados en la sección 2.5.3 que se sincronizan para poder estimar tal dependencia.

2.5.1 Sensores CMOS

Un sensor bidimensional CMOS es un circuito integrado con una matriz de sensores de pels. En cada sensor de píxeles o pels contiene su propio sensor de luz, un amplificador y un conmutador de selección de pels. Además, se encuentran un convertidor analógico a digital y otros componentes críticos para su funcionamiento. El sensor CMOS contiene cuatro partes principales: los filtros de color, la matriz de pels, el controlador digital y el convertidor analógico a digital [7] (véase Figura 11).

Figura 11. Funcionamiento de un sensor CMOS



(Tomado de la referencia [7])

- **Filtro de color:** Los microlentes iluminan la parte fotosensible de cada pel. En su camino, los fotones pasan a través de una matriz de filtros de color. El mosaico de estos diminutos filtros captura la información de color. Los filtros de color permiten la medición independiente de los fotones rojo (R), verde (G) y azul (B). Éste, filtra las longitudes de onda de los colores no deseados y permite que sólo los colores específicos de la luz pasen a través de un sensor. Para este propósito, cada píxel está cubierto con un filtro rojo, verde y azul según un patrón específico [7].
- **Matriz de pels:** La función de la matriz de pels es capturar la intensidad de la luz que pasa. Cada sensor de pels convierte la sensibilidad de la luz entrante en una señal de voltaje que alimenta al ADC para procesamiento posterior [7].

- **ADC:** El ADC toma las señales de voltaje analógico de los sensores de pels de la matriz y las convierte en una señal digital [7].
- **Control digital:** El controlador digital gobierna el funcionamiento del sensor CMOS; controla la matriz de pels, asegura el sincronismo entre todos los pels etc [7].

En la ejecución del proyecto se hizo uso de tres cámaras con tecnología CMOS con las que cuenta el Laboratorio de Óptica de la Escuela de Física. En la Tabla 2 se visualizan las especificaciones de las cámaras usadas y en la Figura 12 una imagen real de las mismas.

Tabla 2. Propiedades del sensor CMOS EO-1312

Característica	Especificaciones
Número de Modelo	EO1312C
Área de Sensor, H x V (mm)	6.79 x 5.43
Pixeles (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 (Megapixeles)	1.3

(Tomado de la referencia [8])

Figura 12. Cámara con Sensor tipo CMOS



(Tomado de la referencia [9])

2.5.2 Sensor Integrado de Presión

Como se ha venido mencionando, el efecto de la presión es el parámetro que se estudia en este proyecto. Para esto se hace necesario medirlo y para tal labor se hizo un estudio sobre los diferentes sensores disponibles que cumplieran las condiciones para realizar ésta tarea. En dicha investigación se encontró que el sensor MPXHZ6250A de la compañía Freescale [10] cumplía con tales requisitos.

El sensor MPXHZ6250A integra on-chip, la circuitería de un amplificador operacional bipolar y redes de resistencia de película delgada para proporcionar una señal de salida analógica precisa y de alto nivel [10] (véase Figura 13).

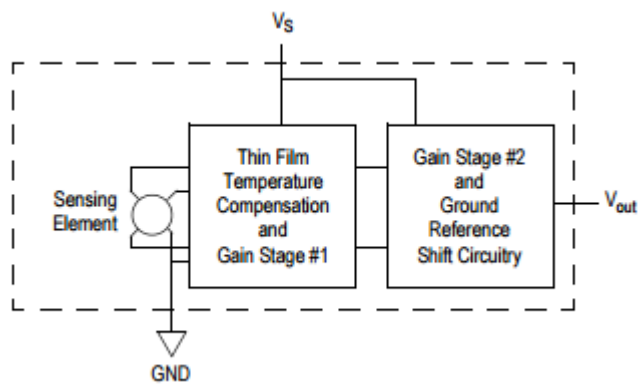
Figura 13. Sensor MPXHZ6250A



(Tomado de la referencia [10]).

El transductor piezoresistivo de la serie MPXHZ6250A cuenta con varias características como compensación a la temperatura, es ideal para conexión con microprocesadores o sistemas basados en microcontroladores y un empaquetado de montaje en superficie termoplástico. En la Figura 14 se puede observar un diagrama de bloques del circuito interno integrado en el sensor de presión [10].

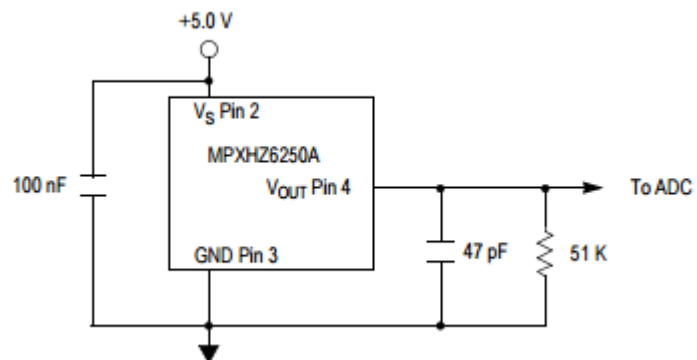
Figura 14. Esquema del sensor de presión.



(Tomado de la referencia [10]).

Para tener un uso correcto del sensor el fabricante recomienda la implementación de un circuito que se utilizó y se muestra en la Figura 15.

Figura 15. Montaje para operación.



(Tomado de la referencia [10])

En la tabla 3 se muestran las características principales de operación del sensor MPXHZ6250A.

Tabla 3. Características principales Sensor MPXHZ6250A.

Característica	Mín.	Típico	Máx.	Unidades
Rango de Presión	3	-	36	psi
Voltaje de alimentación	4.75	5.0	5.25	Vdc
Corriente de alimentación	-	6.0	10	mAdc
Escala de salida	4.731	4.8	4.869	Vdc
Exactitud	-	-	±1.25	% V _{FSS}
Escala del Span (V_{FSS})	4.462	4.6	4.738	Vdc
Tiempo de respuesta	-	1.0	-	ms
Tiempo de estabilidad	-	20	-	ms
Estabilidad del Offset	-	±0.25	-	% V _{FSS}

(Tomado de la referencia [10])

2.5.3 Equipos de adquisición

Como lo demanda el montaje experimental se hizo necesario el uso de cuatro terminales de cómputo, de los cuales tres fueron asociados (cada uno) a una cámara, para así poder adquirir tres imágenes simultáneamente en la trayectoria del haz.

Así mismo, se asoció una de las terminales a una plataforma de hardware Arduino, en la cual se programaron los algoritmos respectivos para obtener los datos de medición de las variables físicas en el proceso del experimento. Estos datos fueron recopilados en un archivo de texto y enviados a las terminales de cómputo por comunicación serial. Los algoritmos programados en la placa Arduino y el software Híper Terminal (para comunicación microcontrolador – PC), sus características y especificaciones de operación son presentados en el ANEXO A. y ANEXO A. .

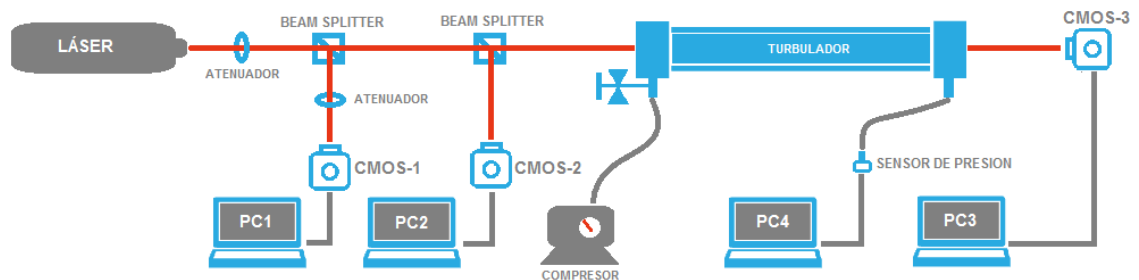
3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

En este capítulo se muestra en detalle cada una de las etapas que fueron necesarias para el desarrollo del proyecto.

3.1 ACONDICIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.

Con el propósito de cumplir con las actividades propuestas en el plan, se construyó un montaje experimental que cuenta principalmente con un láser He-Ne, tres cámaras CMOS, una tarjeta de adquisición de datos, un tubo galvanizado completamente confinado (que de aquí en adelante se denominará Turbulador), cuatro terminales de cómputo y un compresor; que se pueden apreciar en la Figura 16.

Figura 16. Montaje experimental



A continuación, se hace una breve descripción de los elementos mencionados, que no han sido descritos previamente y una aclaración de la metodología de uso del sensor de presión.

3.1.1 Atenuadores o Filtros de densidad neutra

Son filtros grises que cumplen con la función de controlar la cantidad de luz que llega al sensor, su característica de neutralidad permite filtrar todos los colores por igual [11]. En la Figura 17, se observa un ejemplo de este tipo de filtros.

Figura 17. Filtro de densidad neutra.

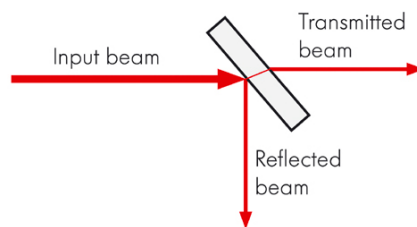


(Tomado de la referencia [11])

3.1.2 Divisor de haz o Beam Splitter

Es un elemento óptico que divide un haz de luz incidente en diferentes direcciones. Se compone 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 (véase Figura 18). Se hizo uso de dos *beam splitters* con el fin de direccionar el haz y poder tomar las imágenes en las cámaras.

Figura 18. Divisor de haz.

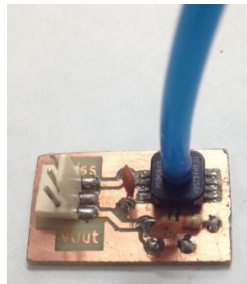


(Tomado de la referencia [11])

3.1.3 Sensor de presión

En la Sección 2.5.2 se hizo una descripción detallada del sensor utilizado para medir la presión en las pruebas realizadas. En esta sección, se muestra la conexión neumática que se realizó teniendo en cuenta que el ajuste entre la manguera y el sensor fuese óptimo con el fin de evitar fugas (véase Figura 19).

Figura 19. Sensor MPXHZ6250A, montaje final.



3.1.4 Compresor

Para poder inyectar las diferentes presiones con las que se hicieron las pruebas, se utilizó un compresor comercial que cumplía con el rango necesario para desarrollar el proyecto (ver Tabla 3). Éste se conectó neumáticamente al Turbulador por medio de mangueras y a su vez se agregó un manómetro analógico para verificar el valor de la presión inyectada (véase Figura 20).

Figura 20. Turbulador, manómetro analógico de respaldo y compresor



3.1.5 Turbulador

Es un tubo galvanizado de 132 [cm] de longitud y un diámetro interno de 7 [cm], que cuenta con dos bridas en cada extremo y en las cuales se acondicionó un empaque para que no existieran fugas. Para poder confinar el Turbulador se acoplaron dos vidrios de 4[mm] de espesor los cuales soportan una presión de 60 psi (véase Figura 21).

Figura 21. a) Turbulador. b) Brida con vidrio y empaque neumático.



(a)

(b)

3.1.6 Terminales de cómputo

Como se observa en la Figura 16, cada una de las cámaras usadas en el montaje se asoció a un equipo de cómputo. Estos equipos se enlazan con las cámaras a través de un algoritmo de Matlab® y el software controlador de los dispositivos (ActiveX), capturando así, las imágenes deseadas. El cuarto equipo fue el encargado de adquirir los datos de las variables físicas: presión, temperatura y humedad, por medio de la plataforma Arduino. Adicionalmente, se usa la plataforma para generar la inicialización de la toma de datos por medio de un fotodetector, lo cual se detalla en la sección 3.3.

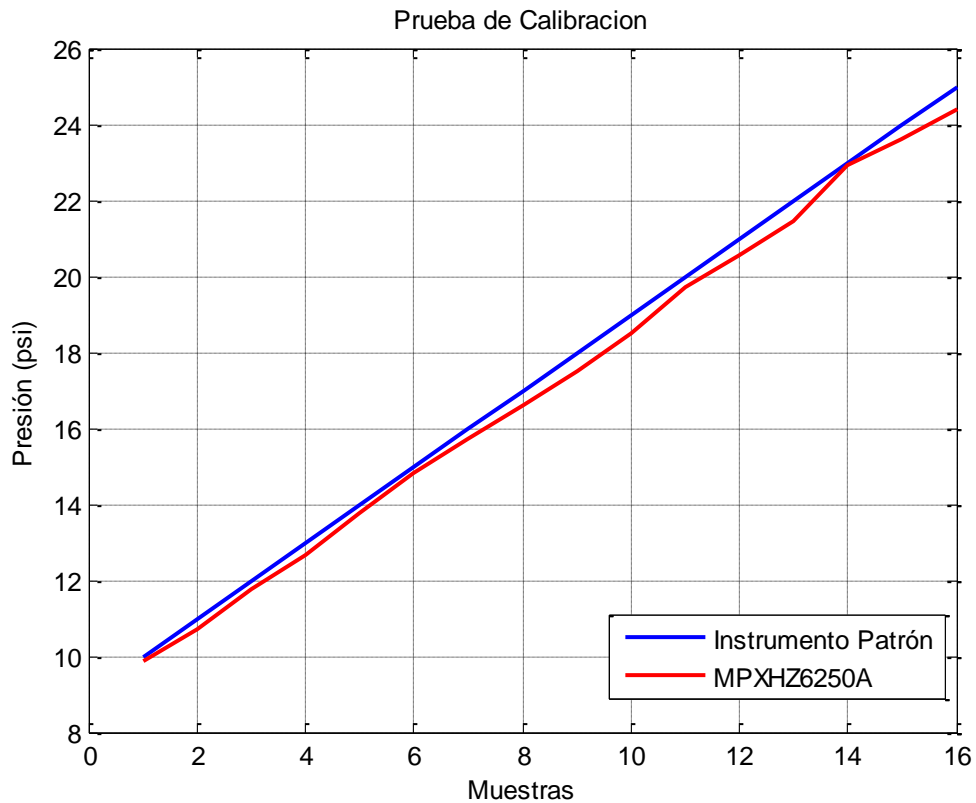
Cabe resaltar que los tres equipos asociados a las cámaras tienen las mismas características de fabricación, algo importante para la sincronización de la toma de los datos.

3.2 CALIBRACIÓN SENSOR DE PRESIÓN MPXHZ6250A

Por ser la presión la variable de estudio de este proyecto fue necesario calibrar los sensores que se usaron con la finalidad de asegurar confiabilidad en las medidas. La calibración se hizo por medio de una bomba de aire que aumentaba la presión, a la salida de ésta se conectó neumáticamente el sensor MPXHZ6250A y en paralelo de la misma manera se conectó un manómetro como instrumento patrón. Este manómetro fue calibrado el 29 de junio del 2016 por el Laboratorio de Metrología PROGEN S.A. que cuenta con la acreditación del ONAC (Organismo Nacional de Acreditación de Colombia). En la Figura 76 del **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar una foto real de dicho manómetro.

Para la ejecución de la calibración se tomaron una serie de muestras que van desde 10 (psi) hasta 25 (psi), aumentando 1 (psi) en cada muestra. En la figura 22 se observa en color azul el comportamiento del instrumento patrón y en color rojo el comportamiento del sensor MPXHZ6250.

Figura 22. Curvas de calibración del sensor MPXHZ6250A.

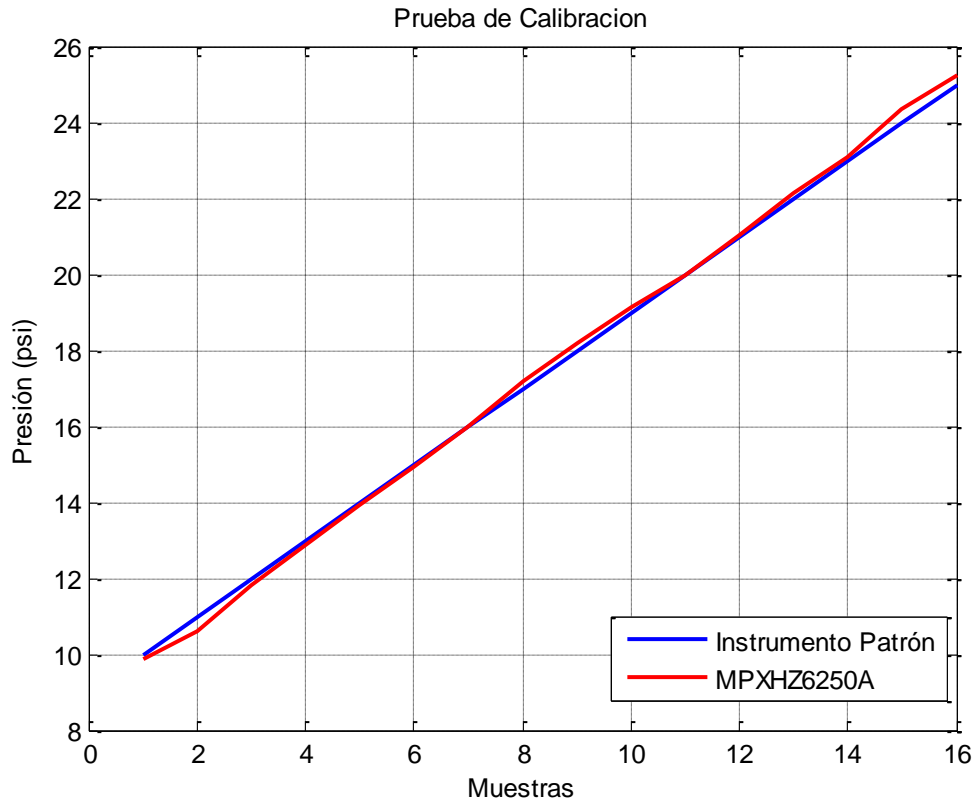


Luego de la toma de datos se pudo determinar que entre el instrumento patrón y el sensor existe una diferencia de hasta el 3,59%. Por esta diferencia se procede a realizar un ajuste de la curva del sensor, la cual, aplicando una linealización se obtiene la ecuación:

$$y = 7,8329x - 11,401 \quad (4)$$

Donde y son los valores ajustados y x los valores obtenidos en la prueba de calibración. En la figura 23 se presenta la nueva curva ajustada del sensor en color rojo y la curva obtenida con el instrumento patrón.

Figura 23. Curvas del Sensor Ajustado e Instrumento Patrón



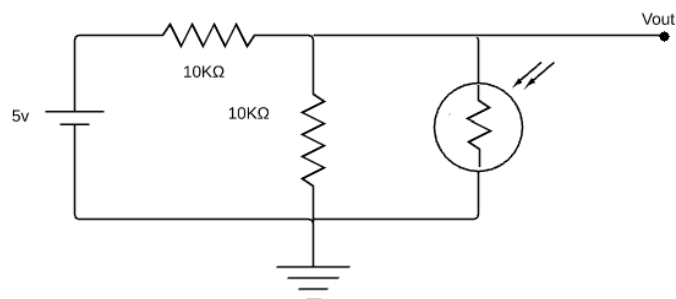
3.3 SINCRONIZACIÓN DE SENSORES

Como se enunció en la Sección 3.1, en el montaje experimental se usaron tres cámaras y un sensor de presión, el éxito de las pruebas está en hacer que los cuatro componentes estén sincronizados. Para que se pueda considerar la teoría de la atmósfera congelada descrita por Taylor [12], los cuatro equipos deben tener una sincronización menor a los 100 milisegundos. De esta manera se puede garantizar que cada una de las imágenes y los datos de sensor fueron tomados en las mismas condiciones de la atmósfera.

Para confirmar dicha sincronización, se hicieron varias pruebas con el fin de determinar si era necesario incluir un retardo en alguno de los equipos. Cabe recordar que las tres cámaras estuvieron asociadas cada una a un equipo con las mismas características de fábrica, y estos cuentan con un procesador Intel® Celeron® una memoria RAM de 4 GB y un sistema operativo de 64 bits. El cuarto equipo (datos de sensor) cuenta con un procesador Intel® Corei5 ® una memoria RAM de 4 GB y un sistema operativo de 64 bits.

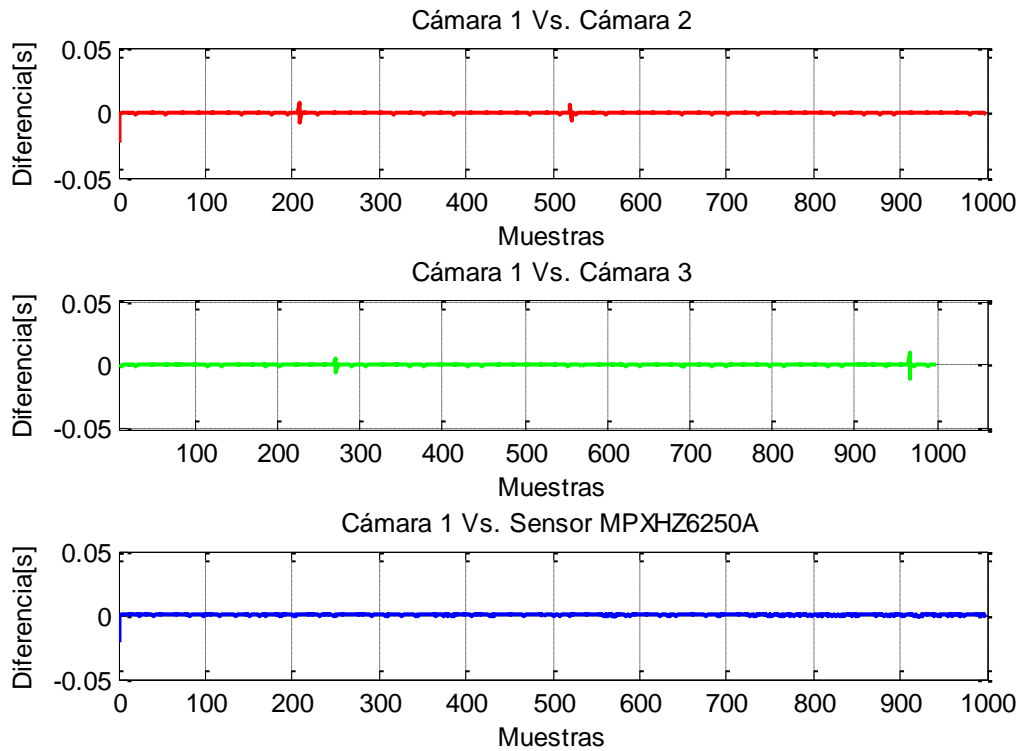
A partir de la descripción del hardware, es indispensable tener en cuenta que la inicialización de la toma de datos es el momento crítico para garantizar la sincronización, puesto que los sensores CMOS deben identificar la presencia de luz. Para tal efecto, se creó un algoritmo en Matlab que diera inicio a la toma de imágenes en el momento que los sensores CMOS detectaran la aparición del haz. Por otro lado, la orden de iniciar la toma de datos de las variables físicas se da por medio de un circuito electrónico, que se presenta en la Figura 24, el cual cuenta con una fotorresistencia que envía una señal análoga al microcontrolador cuando detecta la presencia del haz. El microcontrolador está previamente programado para iniciar la toma de datos de los demás sensores.

Figura 24. Esquemático del circuito de inicialización para los sensores.



En la figura 25, se observa una prueba donde se toman los tiempos de adquisición de cada sensor y a su vez los de las 1000 muestras de la prueba, se comparan entre sí, garantizando que la diferencia entre los dispositivos no supere los 100ms.

Figura 25. Prueba de Sincronización



En la Figura 25, la gráfica superior se tiene una comparación de los tiempos obtenidos por la cámara 1 y la cámara 2 durante las 1000 muestras tomadas. Como se puede observar, no hay perturbación en la diferencia, lo mismo sucede en la gráfica central e inferior de la misma figura, donde se comparan las cámaras 1 y 3, y la cámara 1 con el tiempo de captura de los sensores respectivamente. En la Tabla 4 se evidencian los retardos encontrados.

Tabla 4. Retardos con respecto a la cámara 1

Dispositivo	Retardo promedio [ms]
Cámara 2	8,6
Cámara 3	4,1
Sensor MPXHZ6250A.	2,3

Es posible observar que su diferencia es casi despreciable, siendo muy cercanos a cero y garantizando así, un nivel de sincronismo alto.

3.4 ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE LAS CÁMARAS.

Como se ha mencionado en las secciones 3.1.6 y 3.3 las cámaras fueron asociadas cada una a un equipo de cómputo. Esta conexión se establece por medio del comando *actxcontrol* que permite controlar la cámara desde Matlab. Este algoritmo permite introducir variables tales como el tiempo de exposición de las cámaras, cantidad de muestras y el periodo de muestreo que son propias de su controlador ActiveX.

El tiempo de exposición se establece de acuerdo a la distancia a la que se encuentra cada cámara con respecto al láser. En la Figura 26 se observan las distancias en las que se posicionó cada cámara y en la Tabla 5 se hace una relación de dichas distancias con su tiempo de exposición respectivo.

Figura 26. Montaje experimental, Z1=118 [cm], Z2=145 [cm], Z3=397 [cm]

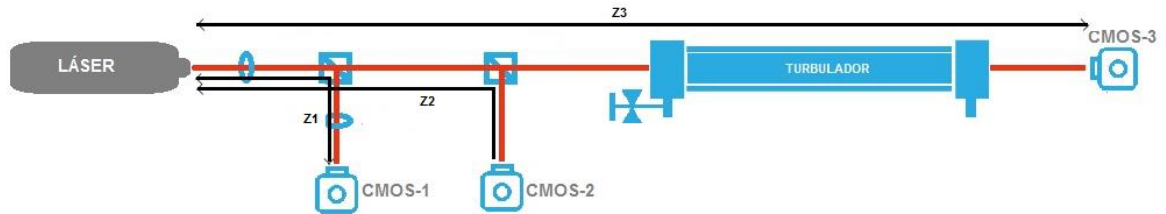
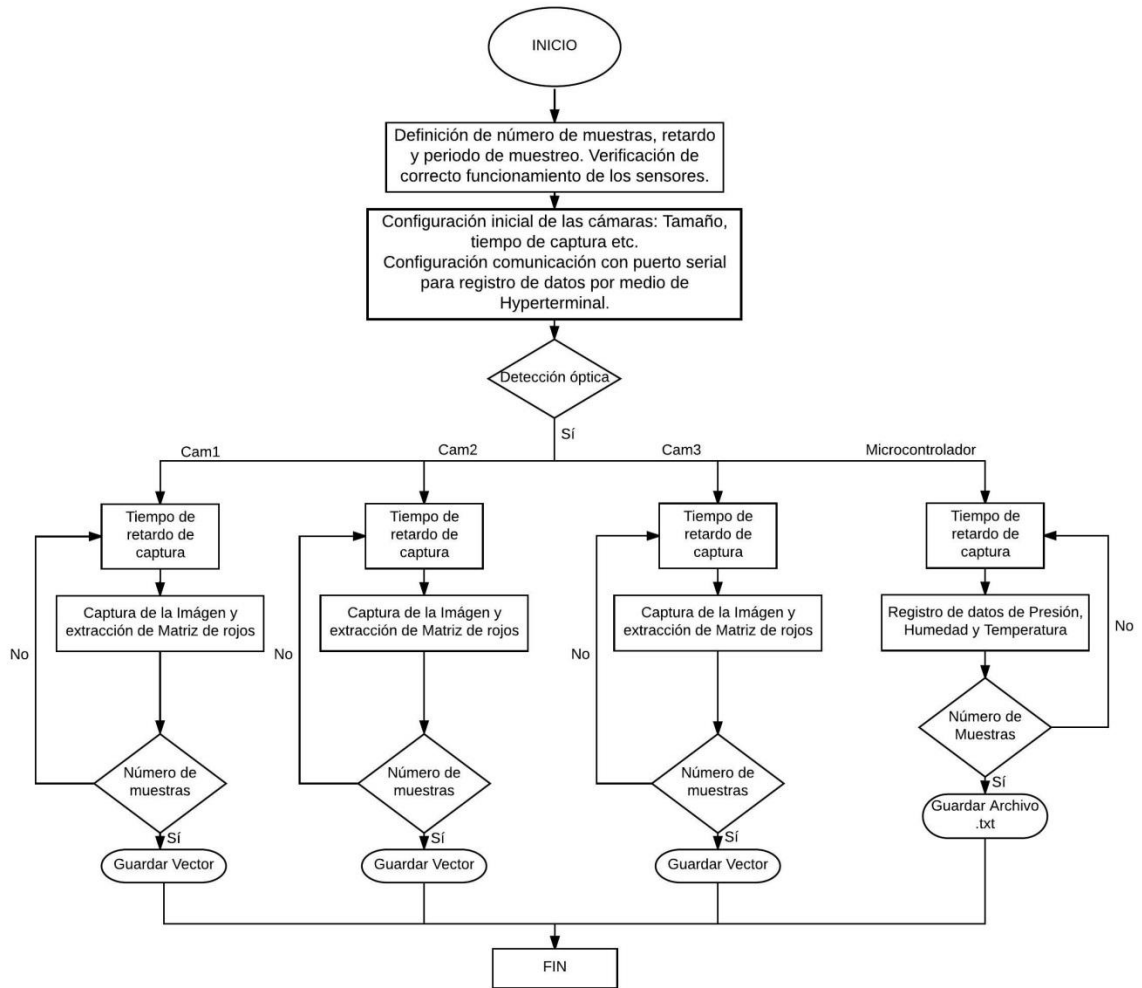


Tabla 5. Tiempo de exposición y distancia de cada cámara.

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

En la Figura 27 se presenta un diagrama de flujo con el proceso de captura de las imágenes y la activación óptica de los sensores, a su vez el algoritmo finaliza cuando se han capturado el número de muestras que se indica al inicio. A su vez el algoritmo de adquisición de imágenes puede ser consultado en el ANEXO D.

Figura 27. Diagrama de flujo del código de adquisición de las cámaras e inicialización del registro de variables físicas.



3.5 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS REALIZADAS.

Luego de montar el experimento, se procedió a hacer pruebas del comportamiento del haz láser. Primero, se analizó la estabilidad del haz. Para esto se realizaron cuatro pruebas consecutivas manteniendo las condiciones de presión lo más estables posibles. En estas pruebas, se registraron 1000 muestras con un periodo

de 1 segundo, con las cuales se pudo determinar que el haz presentó un comportamiento similar a través del tiempo transcurrido en la toma de datos.

Así se observó que, con 1000 muestras era posible analizar el comportamiento del haz propagándose a través del turbulador. De esta manera, se diseñaron siete pruebas, una en condiciones ambientales que se denominó prueba patrón, cinco adicionales manteniendo diferentes presiones dentro del Turbulador y una última prueba descendiendo la presión desde la presión máxima (dentro del rango del instrumento de medida) hasta llegar a la presión atmosférica. En la Tabla 6 se hace una relación de las pruebas realizadas.

Tabla 6. Pruebas realizadas.

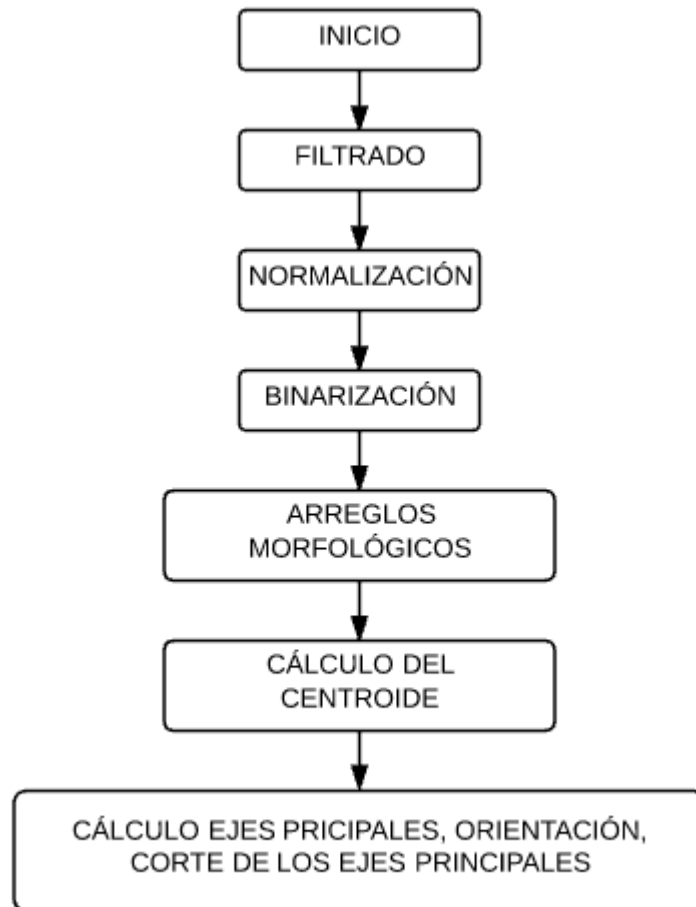
Prueba	Presión [psi]	Desviación Estándar	Muestras
Patrón	Ambiente	±0,02	1000
Prueba 1	15 psi	±0,01	1000
Prueba 2	20 psi	±0,03	1000
Prueba 3	25 psi	±0,02	1000
Prueba 4	30 psi	±0,02	1000
Prueba 5	35 psi	±0,03	1000
Prueba 6	De 35 psi a presión atm.	-	2000

En cada una de las pruebas se sensaron dentro del turbulador otras variables de interés, humedad y temperatura. En el ANEXO E se observan las gráficas del comportamiento de dichas variables en cada una de las pruebas.

3.6 TRATAMIENTO DE IMÁGENES

Con el fin de estudiar el movimiento del centroide y de los ejes principales del spot se implementó el procesamiento digital de las imágenes adquiridas con el algoritmo de la Figura 27 para obtener la información correspondiente a estos parámetros. En la Figura 28 se puede apreciar la secuencia usada para hacer el tratamiento de cada una de las muestras.

Figura 28. Algoritmo de tratamiento de imágenes.



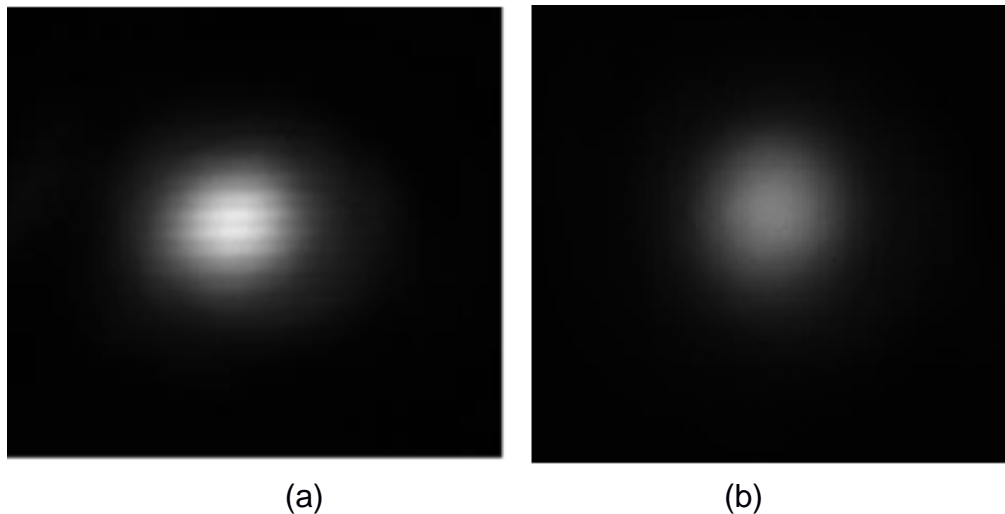
3.6.1 Inicio

Como primera etapa se llaman los datos almacenados de la imagen capturada, recordando que la muestra almacenada fue la del filtro de color rojo puesto que la longitud de onda del láser usado (632,8 nm) genera este color, por esta razón la visualización de la imagen está en escala de grises.

3.6.2 Filtrado

Los sensores CMOS contienen un filtro de protección que genera franjas que distorsionan la información contenida en la imagen, se forma un etalón (interferómetro Perot-Fabry) con franjas de paso y orientación constante. En consecuencia, se debe hacer un filtrado en el dominio de Fourier que elimine las componentes de frecuencia espacial no deseada. Así, se identifican las frecuencias asociadas a las franjas mencionadas, se sustraen y volviendo al dominio del espacio directo, como resultado se obtiene la imagen filtrada. En la Figura 29 se puede observar la imagen original y la imagen filtrada.

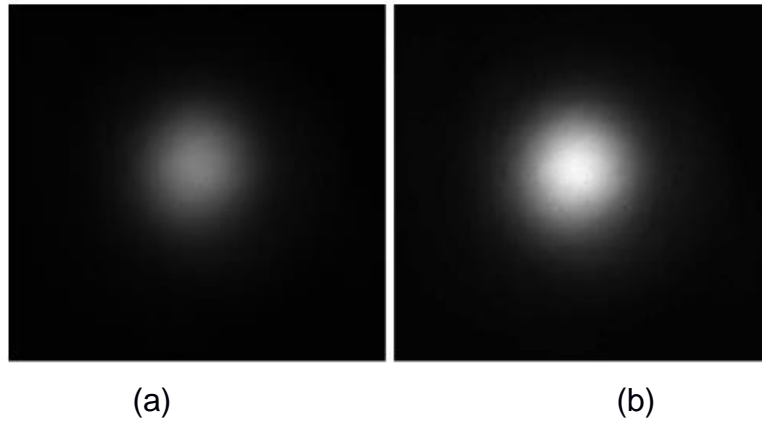
Figura 29. a) Imagen Original b) Imagen filtrada empleando FFT2 (Matlab)



3.6.3 Normalización

En esta etapa se busca hacer un reajuste al rango de valores dentro de la matriz, permitiendo una igualación del histograma. En la Figura 30 se muestra el spot antes y después de pasar por el proceso de normalización.

Figura 30. a) Imagen sin Normalizar. b) Imagen Normalizada.

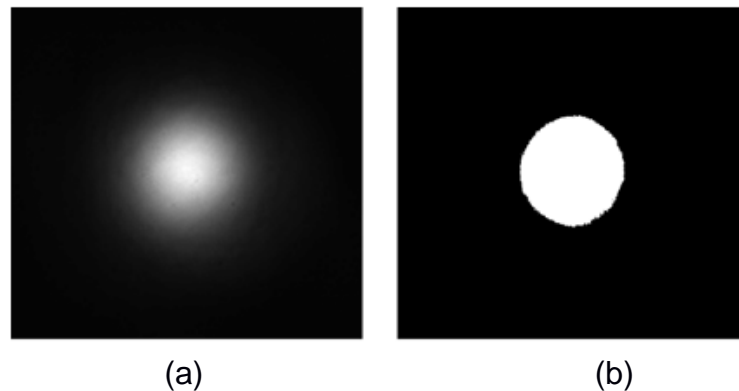


3.6.4 Binarización

El proceso de binarización consiste en traducir la información contenida en la matriz a dos únicos valores posibles, los cuales son verdadero y falso (1 o 0) [13]. En caso de una imagen digital los valores verdadero y falso corresponden a dos colores: blanco y negro. En la

Figura 31 se puede observar el spot y su respectiva binarización.

Figura 31. a) Imagen sin binarizar. b) Imagen binarizada.



3.6.5 Arreglos Morfológicos

Los arreglos morfológicos, son operaciones que se aplican para mejorar la calidad de la imagen [13]. En el proceso de tratamiento se hicieron dos operaciones morfológicas conocidas como erosión y dilatación. La erosión hace uso de un elemento estructurante que en este caso es una matriz de 3x3 rellena de unos que tiene como finalidad mejorar los bordes del spot y eliminar puntos libres.

Por otra parte, la operación dilatación se utiliza (con el mismo elemento estructurante) con el fin de recuperar el área original del spot que fue alterada con la operación erosión.

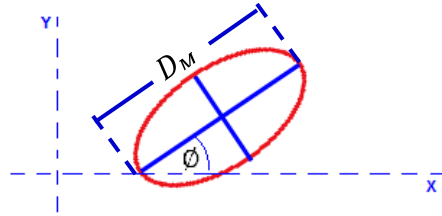
3.6.6 Cálculo del Centroide

Se conoce como centroide o centro de masa al punto en el cual se puede considerar concentrada la mayor cantidad de masa de un objeto o de un sistema [13]. Así, el centroide del spot es una característica importante porque permite observar cómo se comporta el haz en un periodo de tiempo. Para calcularlo, se busca en la matriz las regiones en las que se tiene la mayor intensidad en el spot y de esa manera, se halla no el centro geométrico sino el centro de masa.

3.6.7 Ejes principales, Orientación y Corte de los ejes

Para hallar el corte de los ejes principales del spot y hacer una comparación con el centroide encontrado, se desarrolló un algoritmo que utiliza básicamente propiedades de la imagen, que son halladas inicialmente con el comando *regionprops* de Matlab, el cual determina la orientación de los ejes principales de una imagen. En la figura 32, se puede observar la orientación y los ejes de una elipse.

Figura 32. Orientación, Eje Mayor y Eje Menor de una elipse.



(Tomado de la referencia [14]).

Donde la orientación se da por el ángulo que se forma entre el eje mayor y la línea punteada [14]. Este ángulo de orientación permite ubicar el spot con respecto al eje horizontal y a su vez hallar una posición en coordenadas polares como se enuncia en las ecuaciones (5-6).

$$X_1 = D_M * \cos(\pi * \phi / 180) \quad (5)$$

$$Y_1 = D_M * \text{sen}(\pi * \phi / 180) \quad (6)$$

Donde:

ϕ = ángulo de orientación del spot

D_M = Diámetro mayor del spot

Una vez encontradas las coordenadas X_1 y Y_1 se modeló la ecuación (7), donde k es una constante que garantiza que la recta atraviere el spot por el eje principal mayor.

$$f_1(x) = \left(\frac{Y_1}{X_1}\right)x + k \quad (7)$$

Ahora, se asume que el eje menor se encuentra a 90 grados con respecto a dicha orientación y se encuentran dos nuevas coordenadas descritas en las ecuaciones (8-9).

$$X_2 = D_M * \cos(\pi * (\phi + 90) / 180) \quad (8)$$

$$Y_2 = D_M * \text{sen}(\pi * (\phi + 90) / 180) \quad (9)$$

Aquí se modela una nueva ecuación (10) de recta perpendicular a la anterior que se emplea como referencia de una serie de rectas paralelas con las cuales se hace un barrido de todo el spot. Este barrido permite hallar el eje principal menor y a su vez el corte con el eje principal mayor, el cual sirve para comparar el mismo con los centroides previamente hallados en la sección 3.6.6.

$$f_2(x) = \left(\frac{Y_2}{X_2}\right)x + k \quad (10)$$

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan las pruebas y los análisis realizados durante el desarrollo del proyecto.

4.1 Estudio del Centroide

En la sección 3.6.6 se indicó sobre cómo se calculaba este parámetro, el cual se utilizó como una propiedad que con el paso del tiempo, podía estimar el movimiento que tenía el spot. En las secciones sucesivas, se describirán las pruebas que se diseñaron, los resultados obtenidos y sus análisis.

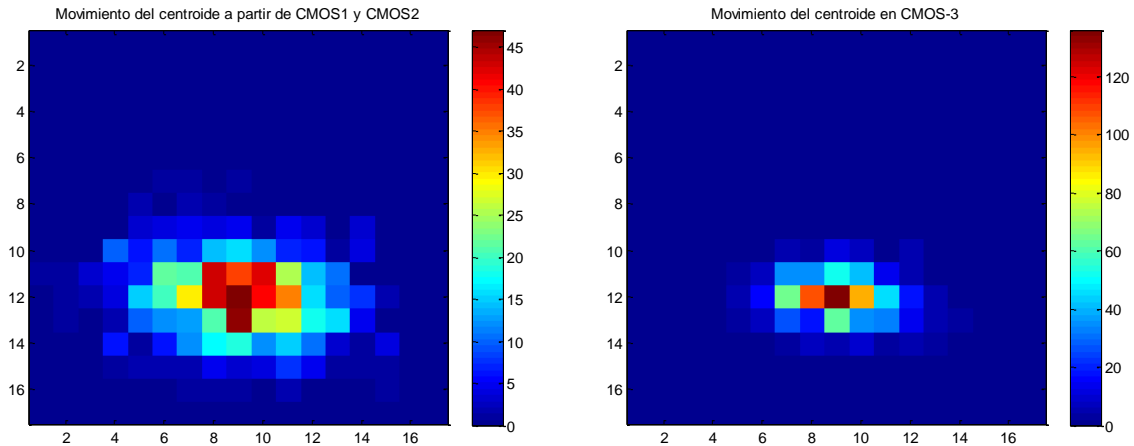
4.1.1 Prueba patrón:

Con el objetivo de tener una prueba de referencia para estudiar el efecto de la presión en el centroide, se parte del análisis del comportamiento del haz láser en condiciones normales de laboratorio, (denominada Prueba patrón). En donde se tomaron datos sin alterar las condiciones ambientales dentro del Turbulador. En la Figura 33, se comparan los resultados obtenidos en el histograma temporal de las posiciones de los centroides dadas por la cámara CMOS-3 con los reconstruidos por estimación a partir de las cámaras CMOS-1 y CMOS-2.

En la imagen izquierda de la Figura 33 se observa la dispersión del centroide que se reconstruye en un plano a la misma distancia que la CMOS3, a partir de las cámaras CMOS1 y CMOS2. En la reconstrucción se tienen en cuenta los efectos intra-cavidad propios del láser. En la imagen de la derecha se presenta la distribución del centroide de acuerdo a los datos obtenidos en la cámara 3. Como

se puede observar en ambas imágenes su comportamiento es similar. Esto sucede porque las condiciones ambiente no han sido alteradas.

Figura 33. Dispersión del centroide de la Prueba patrón. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda) y b) Visto desde CMOS3 (derecha).



Como se observa en la Figura 33, de aquí en adelante para cada prueba se presentan en las figuras 37, 41, 45, 49 y 57 una imagen situada a la izquierda que se refiere a la dispersión del centroide que se estima en un plano a la misma distancia que la CMOS3 a partir de las cámaras CMOS1 y CMOS2. Así mismo se presenta para dichas figuras, pero en una imagen ubicada en la parte derecha, el histograma temporal de las posiciones de los centroides medidos en la cámara CMOS-3.

En las figuras 34, 35 y 36, se observan en color azul el comportamiento temporal del centroide en la cámara 3, también se observan en color rojo la estimación que se obtiene a partir de los datos obtenidos en la cámara 1 y la cámara 2 proyectados en la cámara 3. En la figura 34, se observa el movimiento radial del centroide, a su vez en las figuras 35 y 36 el movimiento horizontal y vertical respectivamente. Se evidencia que en los tres casos existe una variación del

centroide que es muy pequeña puesto que no hay alteraciones de las condiciones de ambiente.

Figura 34. Movimiento radial del centroide obtenido de la Prueba patrón, en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

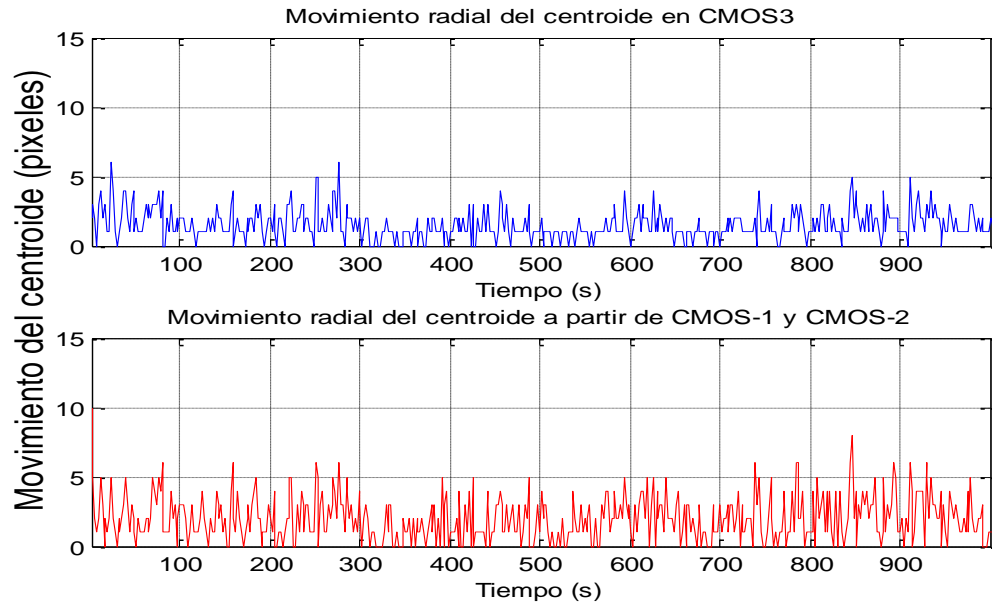


Figura 35. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba patrón, en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

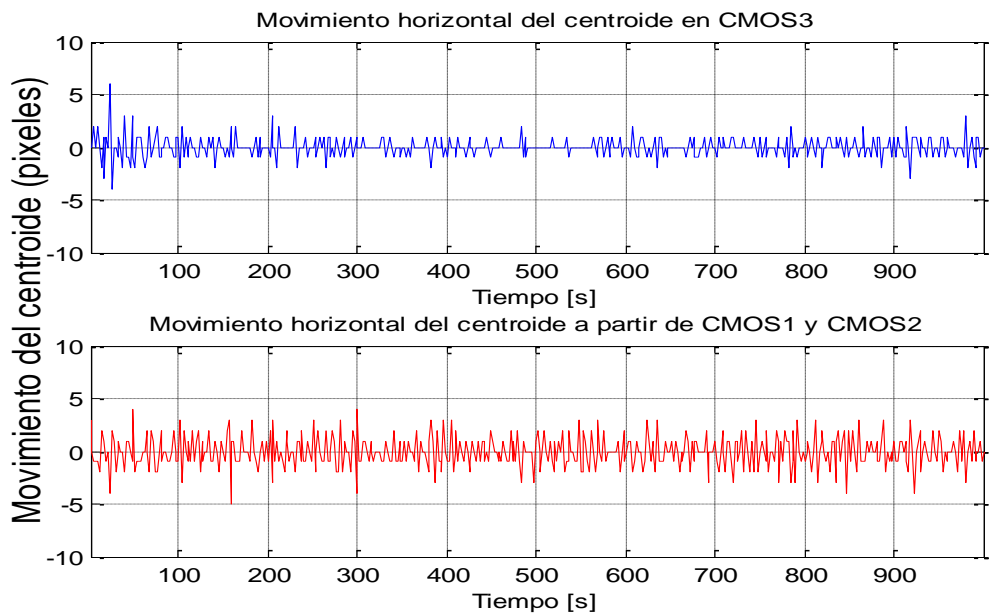
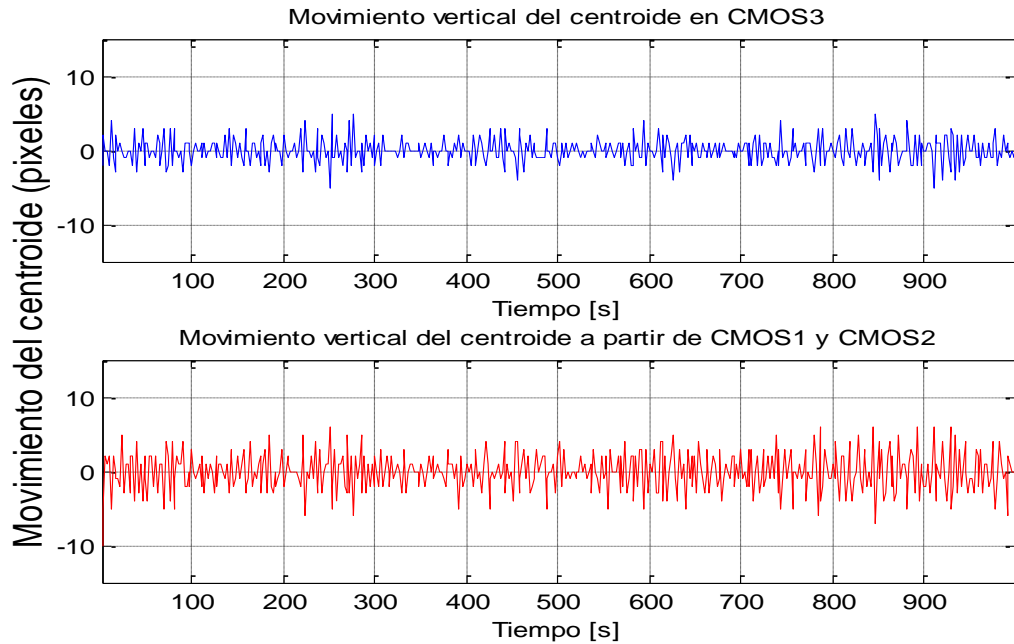


Figura 36. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba patrón, en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).



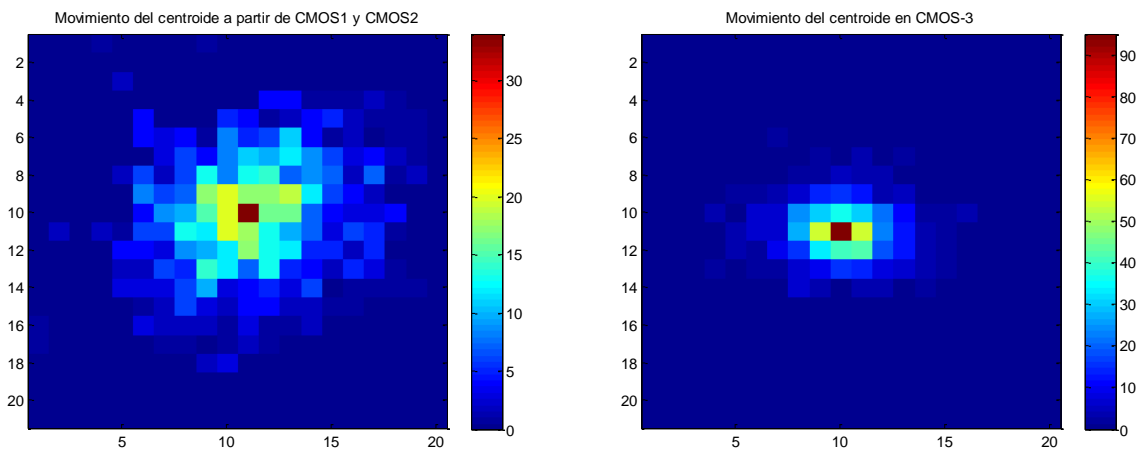
Como ya se mencionó en la figura 34, se presenta en color azul el movimiento radial del centroide en la cámara 3 de esta misma manera se hace para las pruebas restantes en las figuras 38, 42, 46, 50, 54 y 58. Lo mismo ocurre en color rojo para la estimación que se obtiene a partir de los datos obtenidos en la cámara 1 y la cámara 2 proyectados en la cámara 3 en las figuras mencionadas.

En la figura 35 se observa el movimiento horizontal, gráfica azul para la cámara 3 y roja para el estimado proyectado. Con estas mismas convenciones se presentan para cada prueba el movimiento horizontal en las figuras 39, 43, 47, 51, 55 y 59. De la misma manera se presenta para el movimiento vertical en las figuras 44, 48, 52, 56 y 60.

4.1.2 Prueba 15 [psi]

En esta prueba, se presentan los resultados cuando la presión dentro del turbulador corresponde a 15[psi]. Ver Tabla 6.

Figura 37. Dispersión del centroide obtenido de la Prueba 15 [psi]. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS3 (derecha).



Se puede observar que la distribución estimada tiene un comportamiento más disperso que la distribución obtenida en la cámara 3. Aunque a simple vista se ven diferentes, ambas se mantienen dentro de un rango similar. Por otro lado, comparando la imagen de la derecha con la imagen obtenida en la cámara 3, en la prueba patrón (Figura 33b), se nota un contraste en las dispersiones que puede ser ocasionado por la diferencia de las presiones de 15 [psi] y la presión atmosférica promedio medida en el laboratorio (12,79[psi]).

Figura 38. Movimiento radial del centroide obtenido de la Prueba 15 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

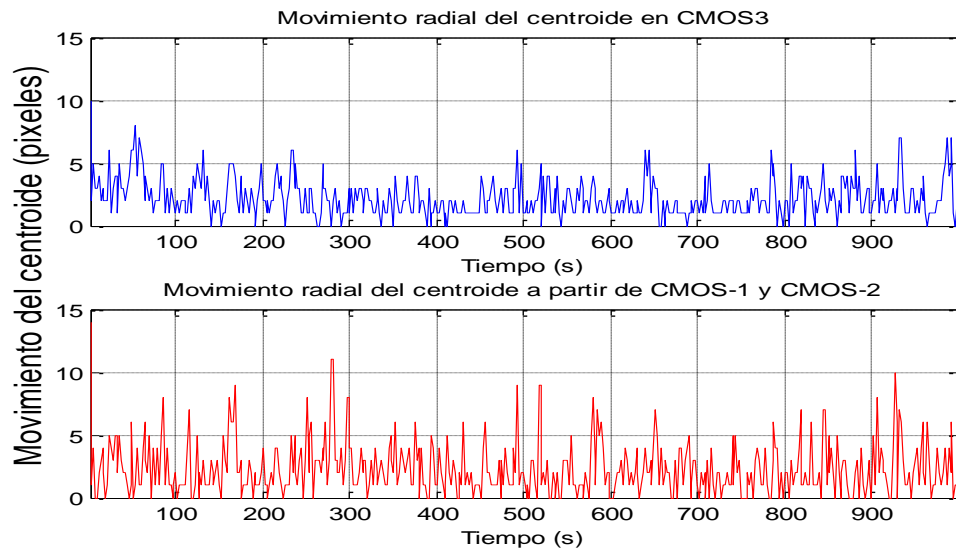


Figura 39. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba 15 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

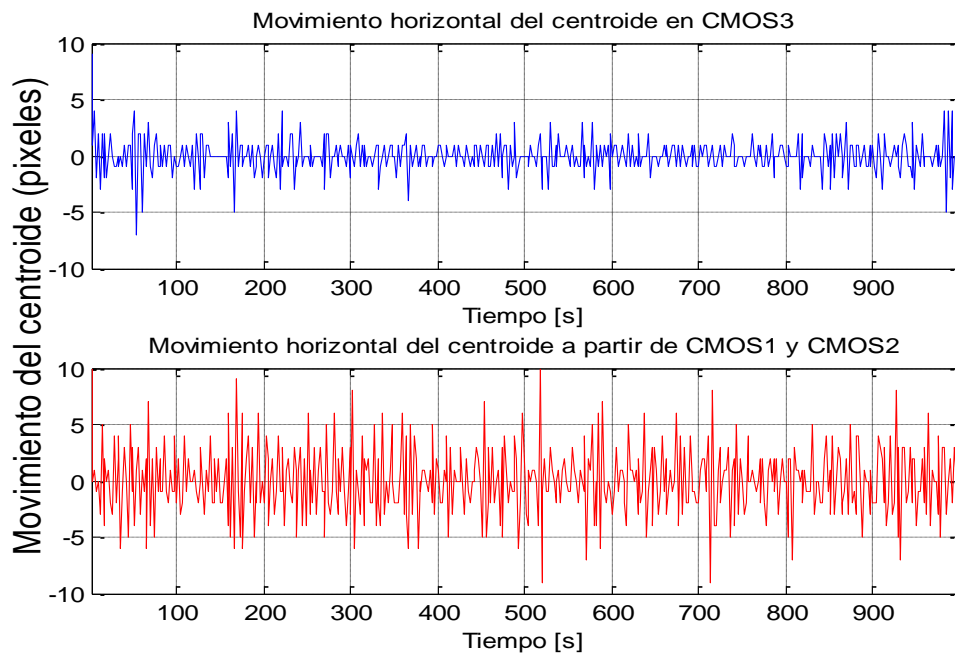
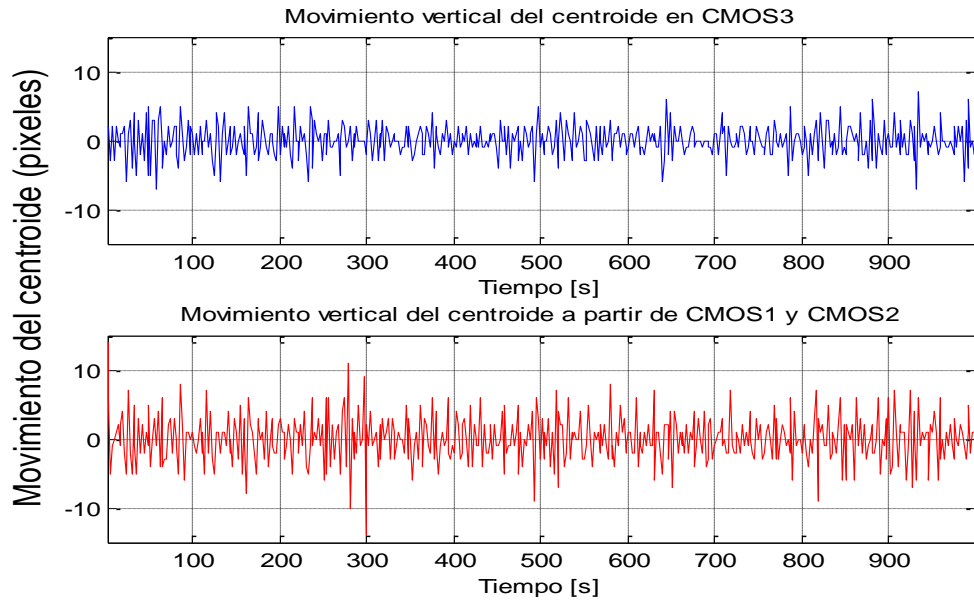


Figura 40. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba 15 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

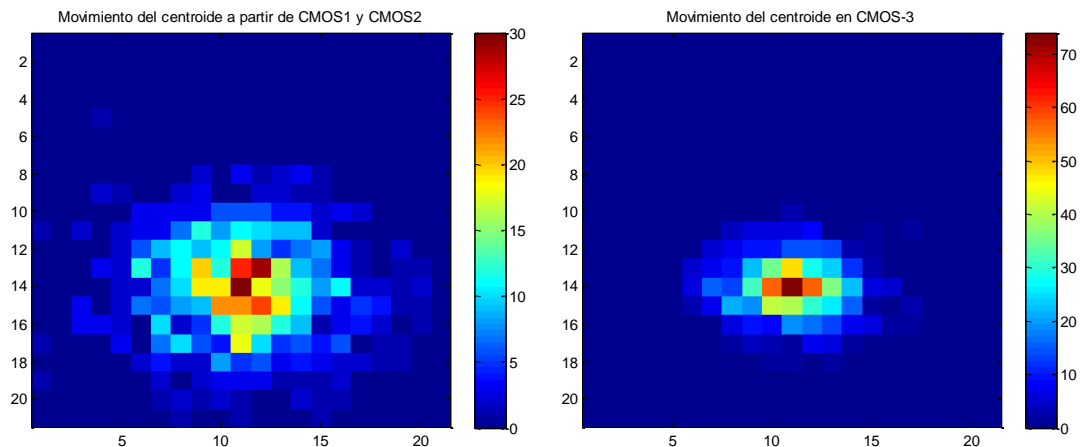


Es posible apreciar que a pesar de tener los ejes en las mismas escalas, la dispersión para esta prueba en algunos puntos fue un poco mayor.

4.1.3 Prueba a 20 [psi]

Continuando la caracterización de la presión, se realizó una nueva prueba a una presión dentro del turbulador de 20 [psi]. Ver Tabla 6.

Figura 41. Dispersión del centroide obtenido de la Prueba 20 [psi]. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS3 (derecha).



Una vez más la distribución estimada tiene un comportamiento un poco más disperso con respecto a la distribución medida en la cámara 3, no obstante, se puede notar que las distribuciones mantienen gran similitud. En contraste, la distribución medida en la cámara 3 para esta prueba comparada con la prueba patrón en la misma cámara, se observa una diferencia un poco más marcada, de lo que se puede inferir que a una presión de 20 [psi] existe más movimiento del centroide.

Figura 42. Movimiento radial del centroide en obtenido de la Prueba 20 [psi], CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

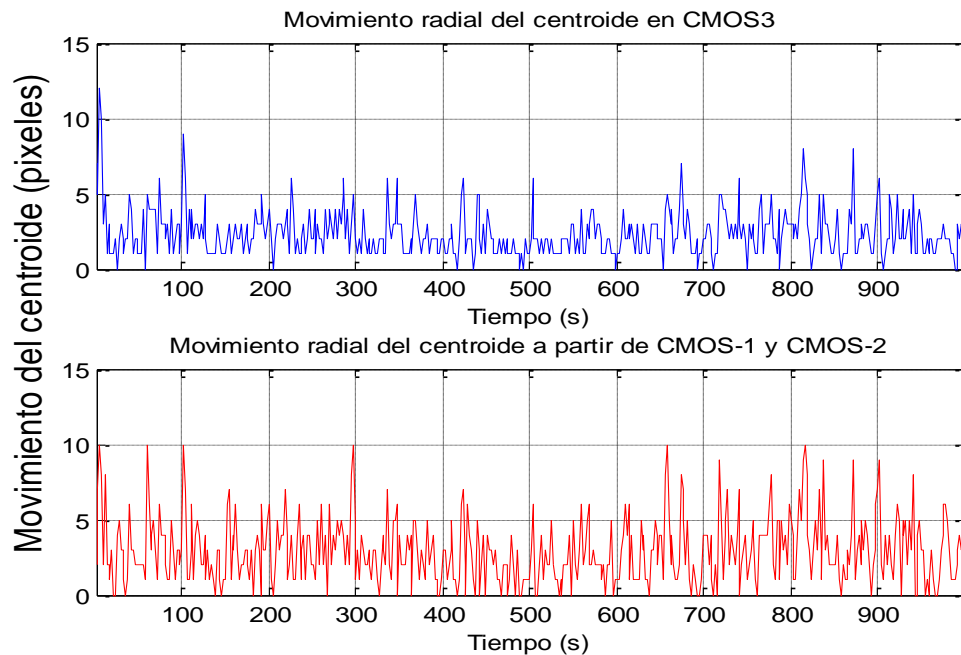


Figura 43. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba 20 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

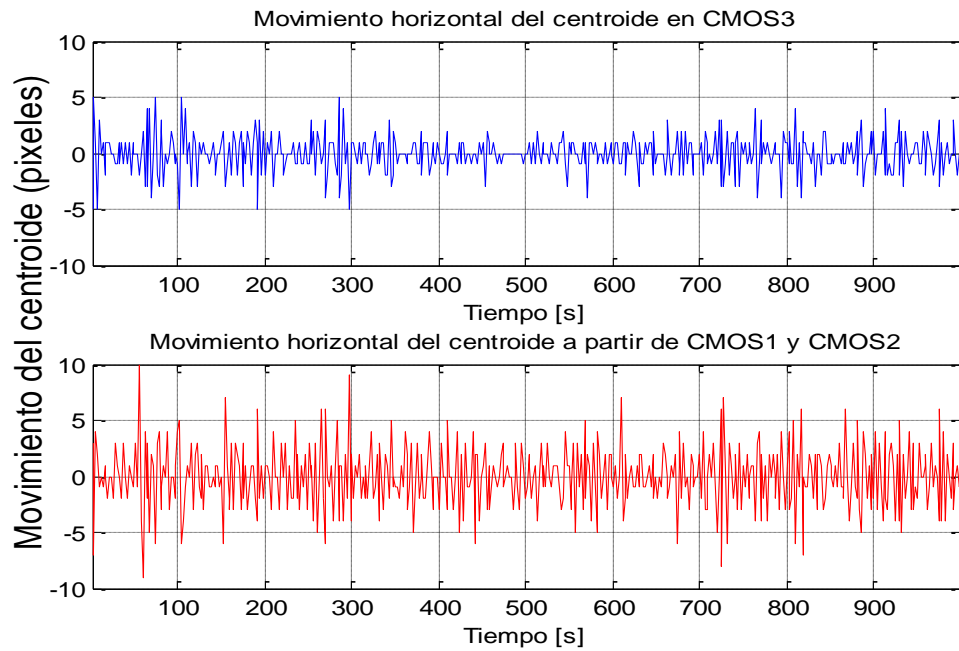
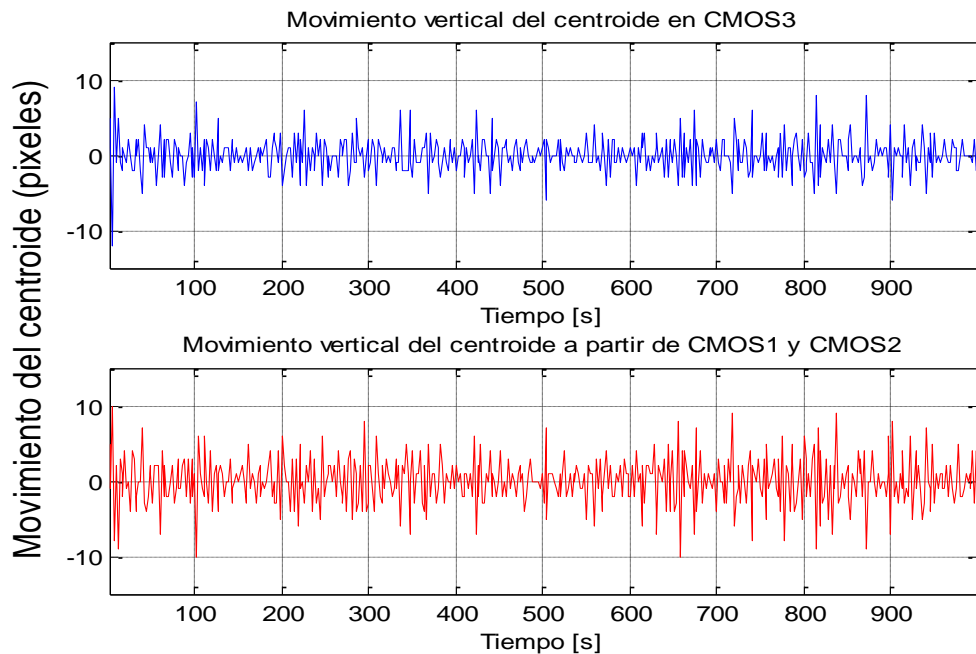


Figura 44. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba 20 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).



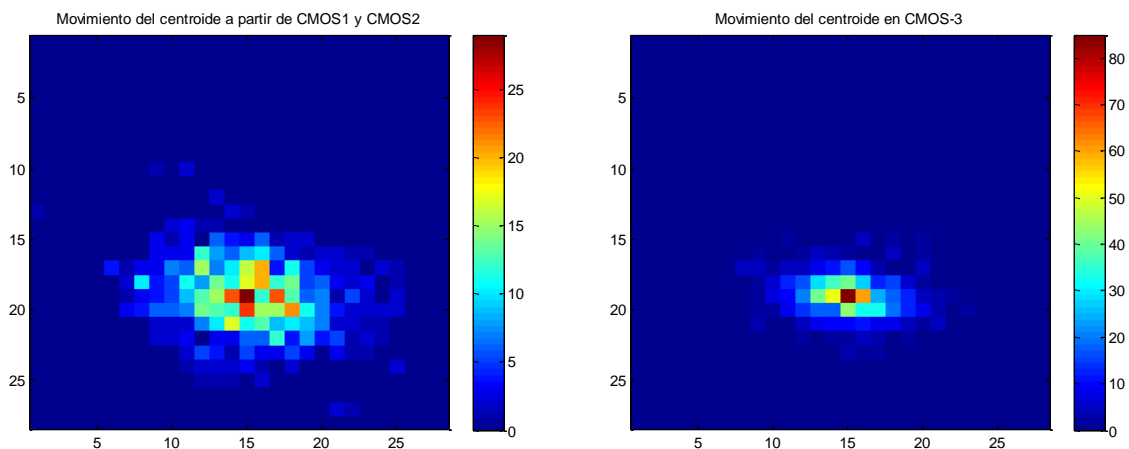
Se evidencia que, en el movimiento radial en la gráfica azul, los picos más altos tienen una magnitud similar a los picos más altos de la gráfica roja. Lo mismo se puede inferir para las gráficas del movimiento vertical. Por el contrario, se nota un comportamiento diferente para las gráficas de movimiento horizontal en las que la gráfica de color rojo presenta fluctuaciones más grandes comparadas con la gráfica azul.

4.1.4 Prueba a 25 [psi]

En esta prueba se aumentó la presión dentro del turbulador a 25 [psi]. Ver Tabla 6.

Como ha sido una constante en las pruebas anteriores se nota un comportamiento más disperso en el estimado con respecto a la dispersión medida, pero se mantiene gran similitud entre ambas dispersiones. También se puede inferir que con este aumento de presión la dispersión medida se nota un poco más amplia con respecto a la prueba patrón y a las dos pruebas anteriores.

Figura 45. Dispersión del centroide obtenido de la Prueba 25 [psi]. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS3 (derecha).



En la figura 46 se observa el movimiento radial del centroide y es notorio que tanto la gráfica azul como la roja se mantienen en las mismas escalas, así mismo ocurre con las gráficas del movimiento horizontal y el movimiento vertical (ver figuras 47 y 48).

Figura 46. Movimiento radial del centroide obtenido de la Prueba 25 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

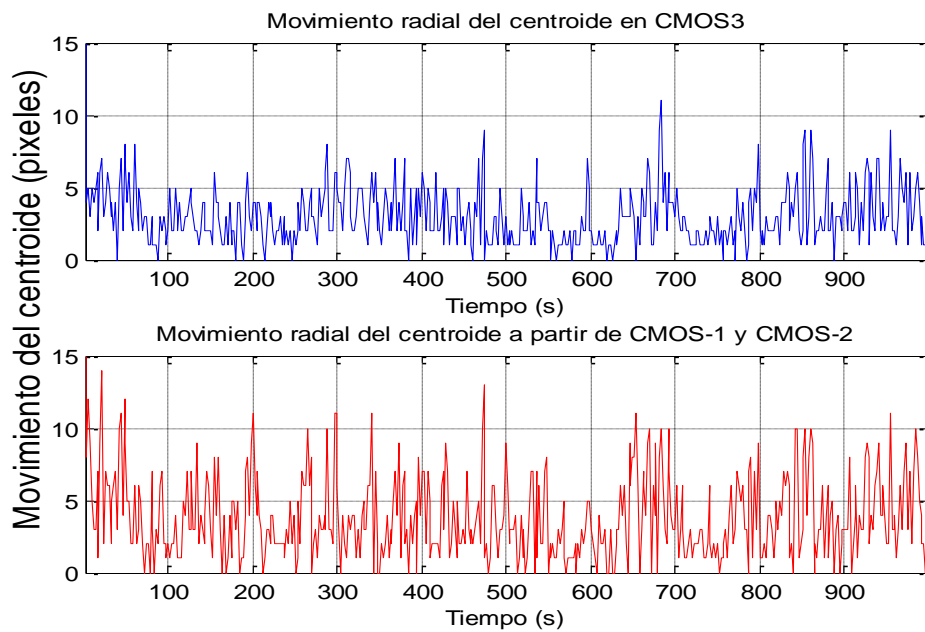


Figura 47. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba 25 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

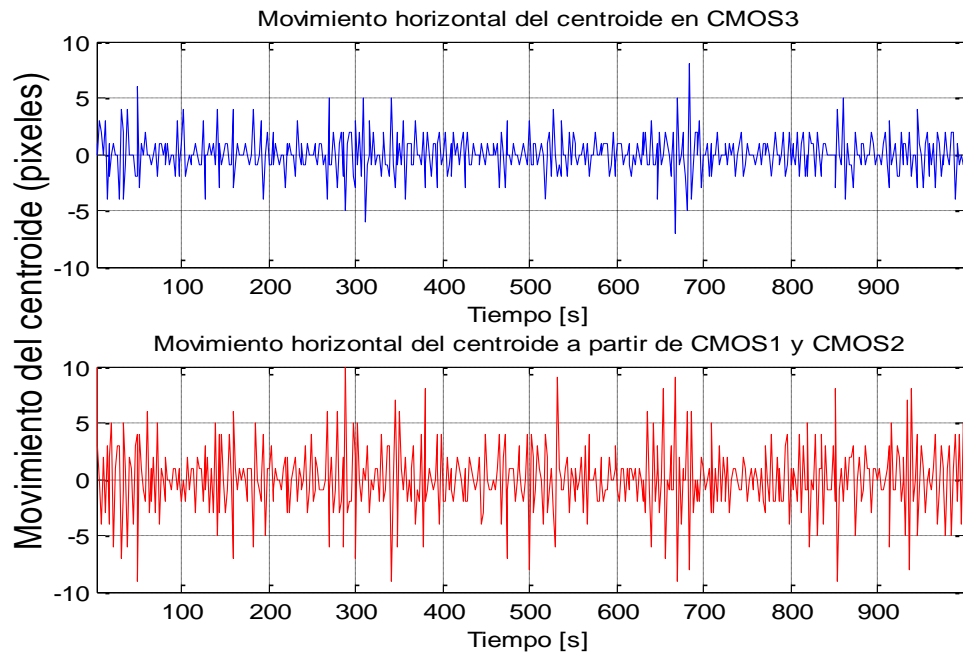
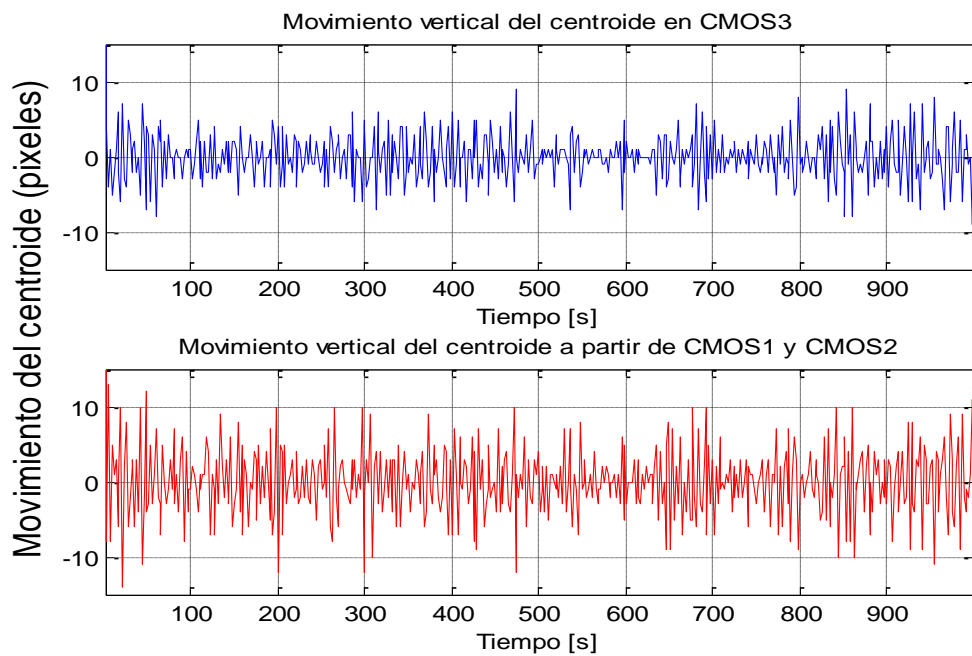


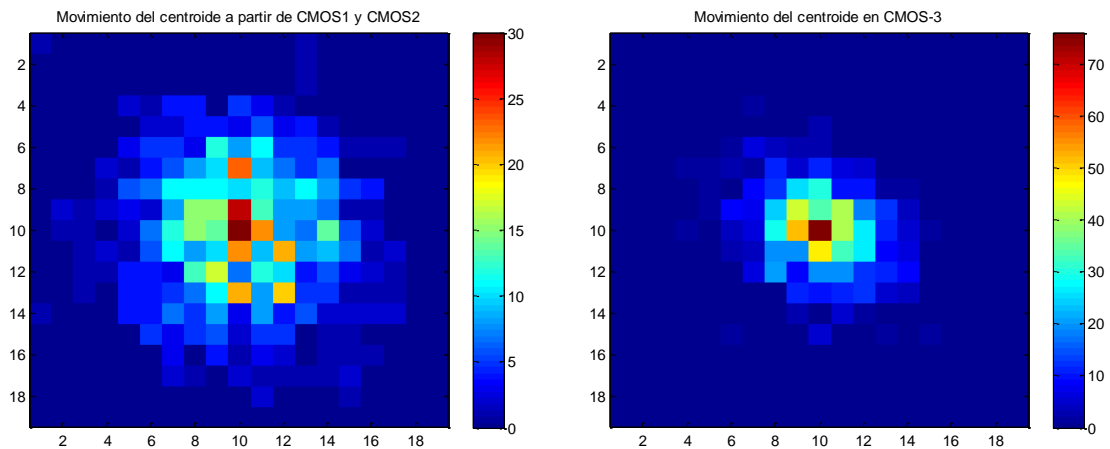
Figura 48. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba 25 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).



4.1.5 Prueba a 30 [psi]

Se realizó una prueba aumentando la presión dentro del turbulador a 30 [psi]. Ver Tabla 6.

Figura 49. Dispersión del centroide obtenido de la Prueba 30 [psi]. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS3 (derecha).



Comparando la dispersión medida en la cámara 3 en la Figura 49 con las respectivas dispersiones de las pruebas anteriores existe una diferencia en el comportamiento de esta prueba. La tendencia que se presentaba del aumento de la dispersión hacia los extremos en este caso no se mantuvo pero la frecuencia de repeticiones en sí mantiene la tendencia que se venía presentando.

Figura 50. Movimiento radial del centroide obtenido de la Prueba 30 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

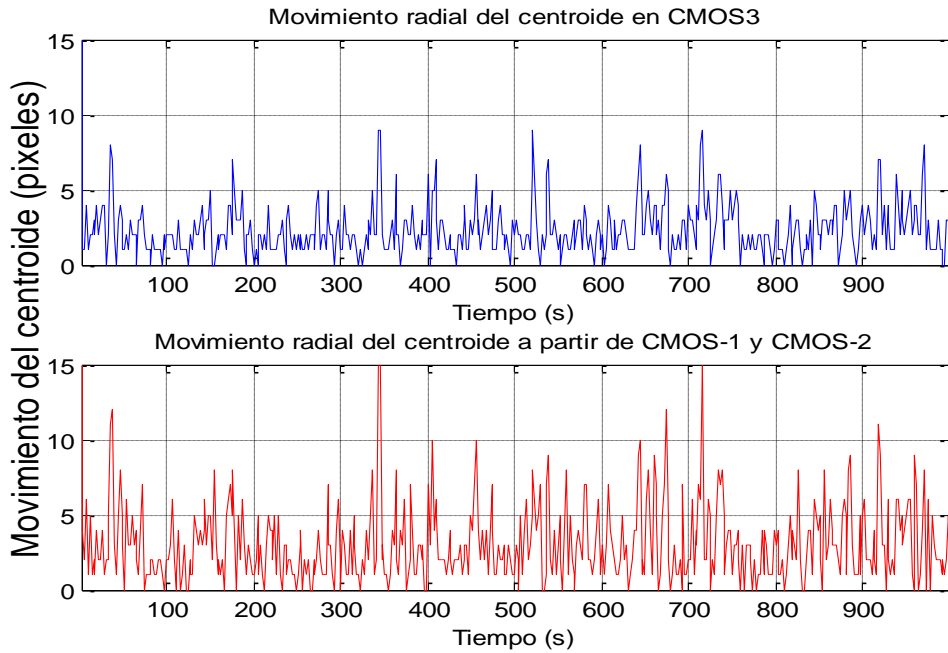


Figura 51. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba 30 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

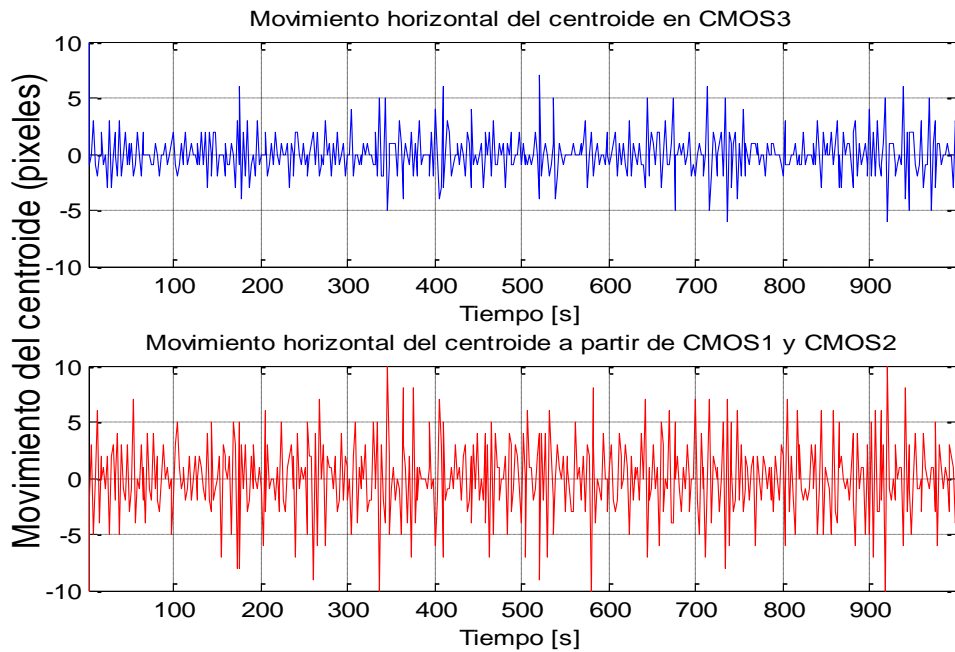
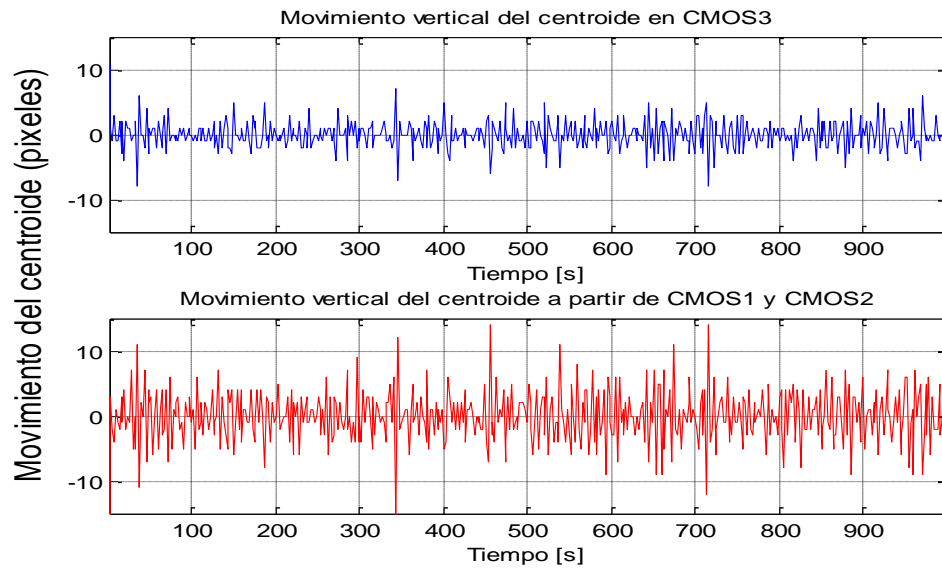


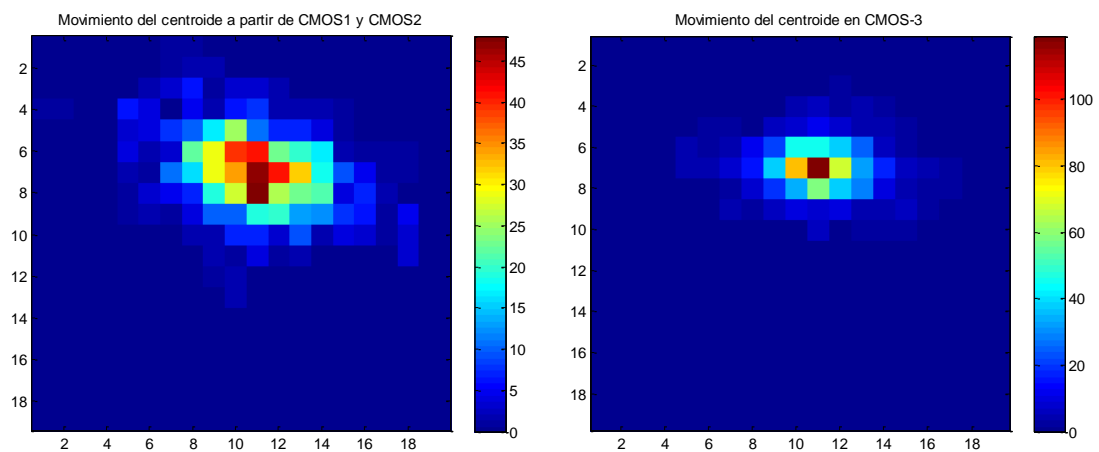
Figura 52. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba 30 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).



4.1.6 Prueba a 35 [psi]

En esta prueba la presión que se le inyectó al turbulador fue de 35 [psi]. Ver Tabla 6.

Figura 53. Dispersión del centroide obtenido de la Prueba 35 [psi]. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS3 (derecha).



En este caso la distribución estimada tiene un comportamiento muy similar a la distribución medida en la cámara 3. Haciendo una comparación entre las distribuciones medidas en la cámara 3 de la prueba Patrón y la prueba de 35 [psi] se evidencia que ésta última tiene un comportamiento más disperso.

Figura 54. Movimiento radial del centroide obtenido de la Prueba 35 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

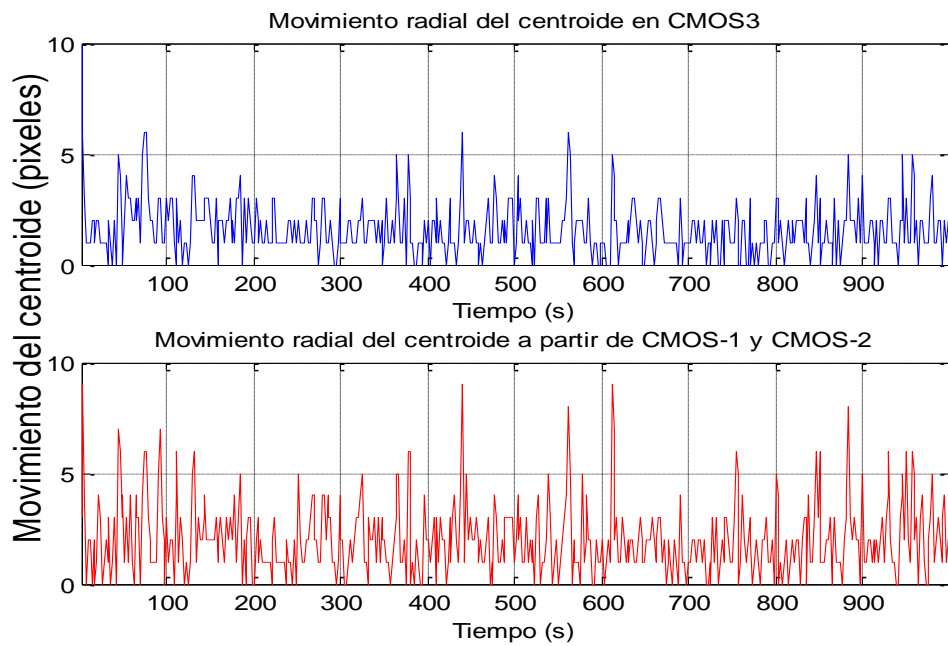


Figura 55. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba 35 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

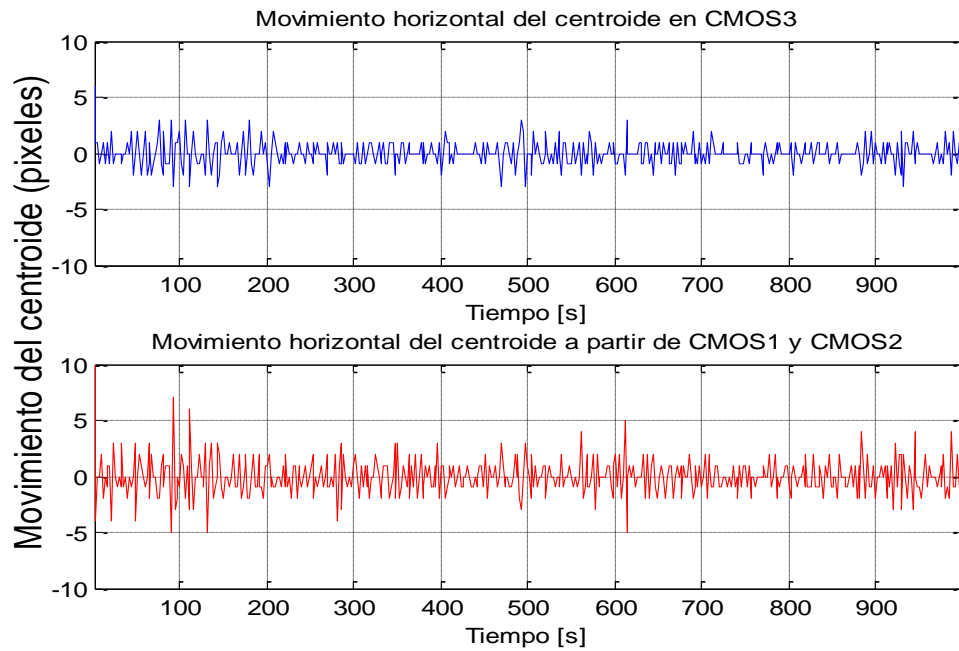
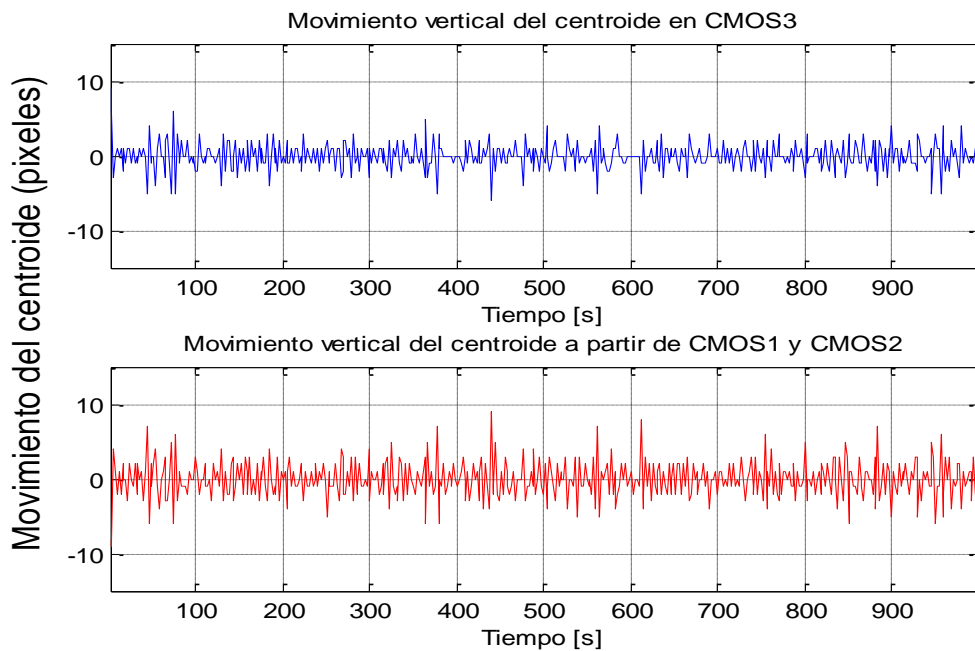


Figura 56. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba 35 [psi], en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).



En la figura 54 se observa el movimiento radial del centroide y es notorio que tanto la gráfica azul como la roja se mantienen en las mismas escalas, así mismo ocurre con las gráficas del movimiento horizontal y el vertical (figura 55 y 56).

4.1.7 Prueba de 35 [psi] a presión atmosférica

Para describir esta prueba, es importante aclarar que inyectar aire dentro del turbulador mientras se ejecuta una toma de datos podría alterar el comportamiento del haz por las vibraciones que genera el compresor, por esto se decidió hacer una prueba en la que se despresuriza el turbulador de manera controlada, lenta y en la cual se tomaron un total de 2000 muestras. Partiendo de la presión máxima que puede medir el instrumento de medición, 35 [psi], se fue reduciendo la misma hasta llegar a la presión atmosférica, la cual también fue registrada y tuvo un valor promedio de 12,86 [psi] y una desviación estándar de 0,01[psi].

En la Figura 57, se observa la dispersión del centroide medido en la cámara 3 (a) y el estimado a partir de las cámaras 1 y 2 (b). Ambas distribuciones tienen comportamientos similares. Ahora bien, por ser una prueba donde se varía la presión, en contraste con el resto en las que se mantuvo constante, se esperaba una distribución más dispersa pero como se puede ver en la figura 57 (b) se mantiene un comportamiento similar a las pruebas anteriores.

Figura 57. Dispersión del centroide obtenido de la Prueba de 35 [psi] a presión atmosférica. a) A partir de CMOS1 y CMOS2 (Izquierda). b) Visto desde CMOS3 (derecha).

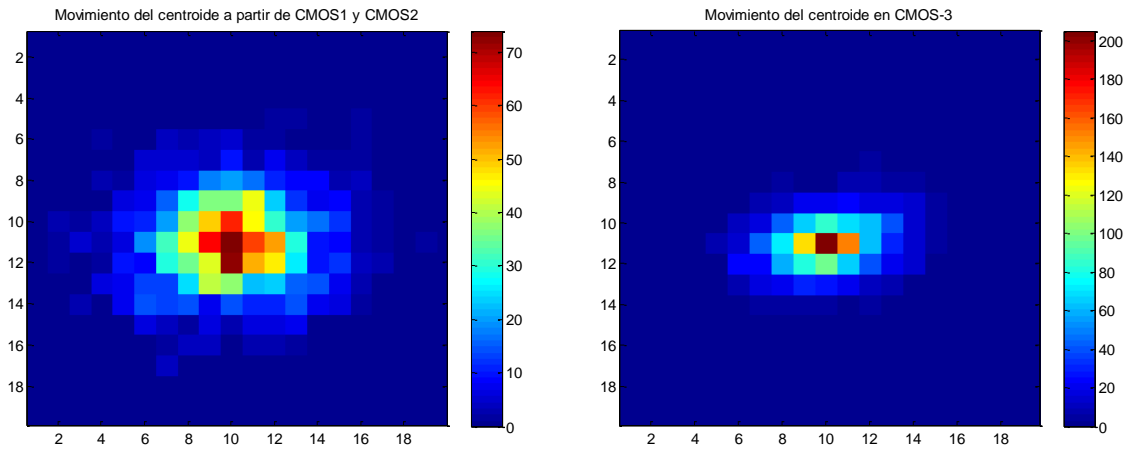


Figura 58. Movimiento radial del centroide obtenido de la Prueba de 35 [psi] a presión atmosférica, en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

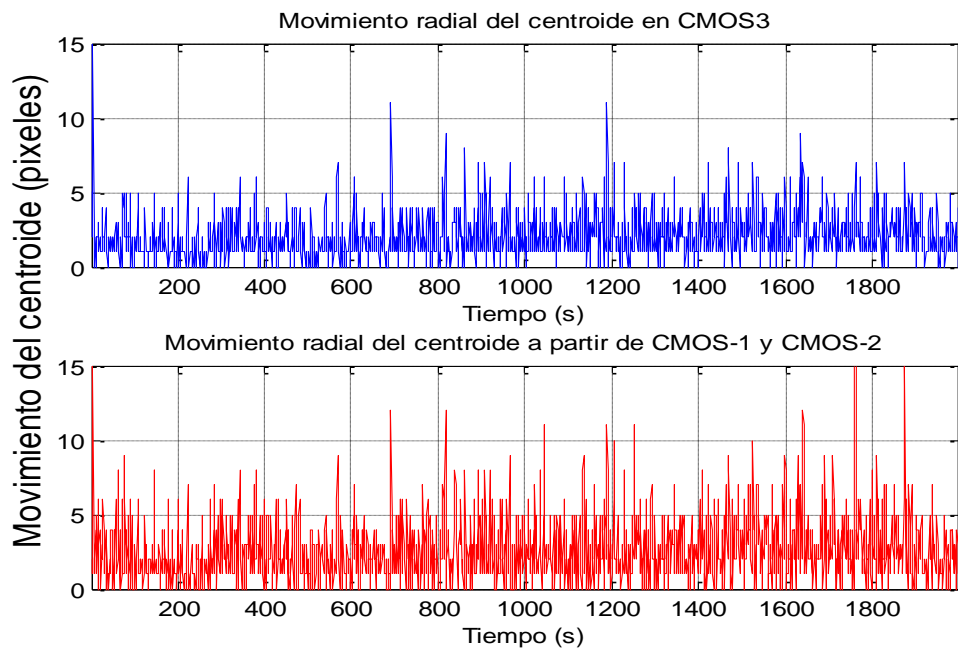


Figura 59. Movimiento horizontal del centroide obtenido de la Prueba de 35 [psi] a presión atmosférica, en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).

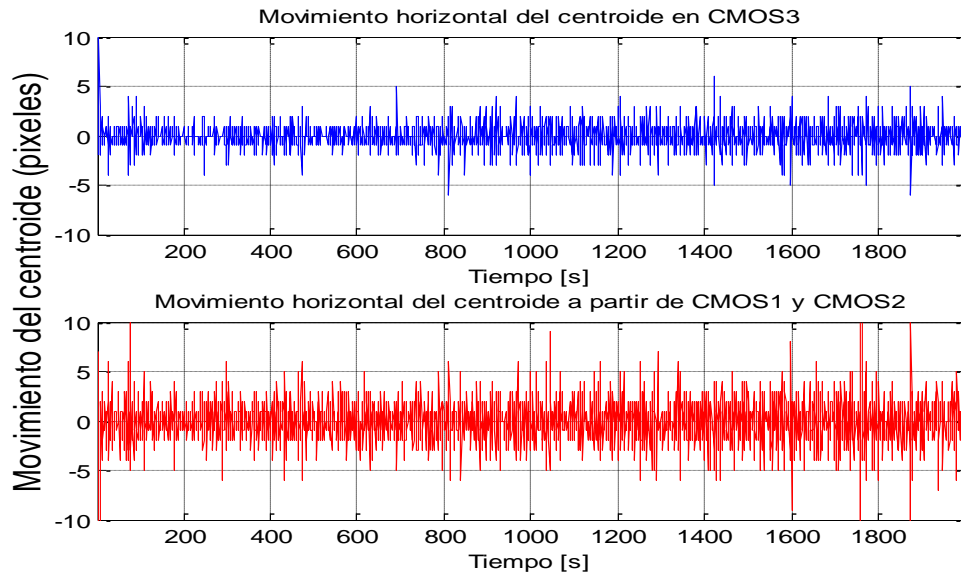
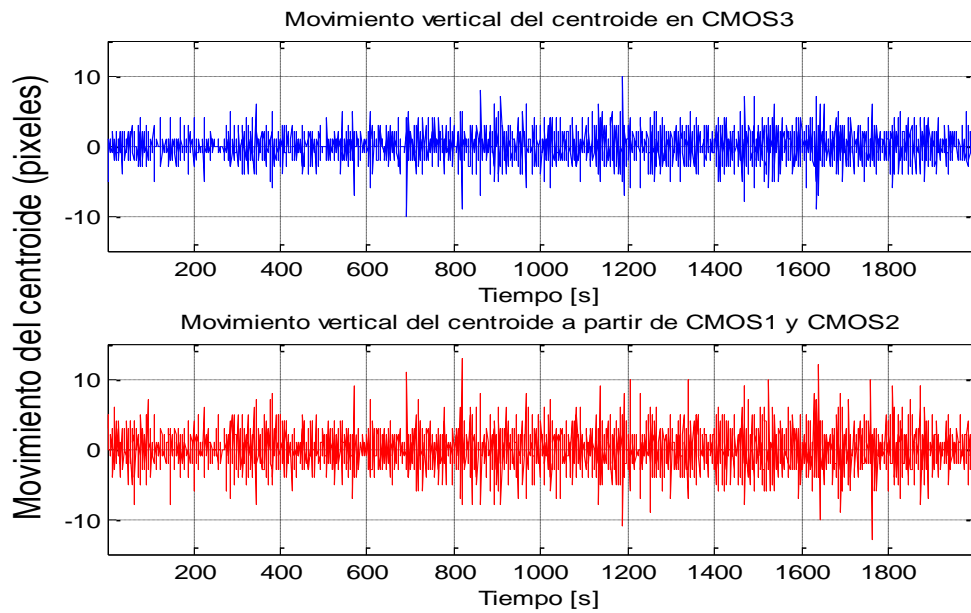


Figura 60. Movimiento vertical del centroide obtenido de la Prueba de 35 [psi] a presión atmosférica, en CMOS3 (AZUL) y a partir de CMOS1 y CMOS2 (ROJO).



En la

Figura 58 el movimiento radial del centroide medido en la cámara 3 (color azul) se puede observar que existen cambios abruptos, esto puede haber sido ocasionado porque la presión del turbulador estaba siendo manipulada. Lo mismo ocurre por separado en los movimientos verticales y horizontales (Figura 59 y Figura 60).

En la Tabla 7, se presenta la desviación estándar y el promedio del movimiento radial de la proyección estimada y el medido en la cámara 3. A su vez, el máximo movimiento en pixeles del movimiento radial de todas las pruebas.

Tabla 7 Datos relevantes Movimiento radial del centroide.

Prueba	Desviación Estándar movimiento radial [Pixeles]		Promedio movimiento radial [Pixeles]		Máximo movimiento radial [Pixeles]	
	Estimado	Medido	Estimado	Medido	Estimado	Medido
Ambiente	±2	±1	2	2	8	6
15 [psi]	±3	±1	3	2	11	8
20 [psi]	±3	±3	3	2	10	9
25 [psi]	±4	±2	3	3	14	11
30 [psi]	±3	±3	2	2	9	7
35 [psi]	±3	±2	2	2	9	9
De 35 [psi] a presión atm.	±3	±2	2	2	15	12

4.2 Comparación corte de los ejes principales con el centroide.

Para tener un parámetro adicional de medida, se calcularon los ejes geométricos principales del spot en la cámara 3, esto permitió tener una noción de cómo se comporta el frente de onda en su propagación. Una vez medidos los ejes principales del spot se halló el corte entre ellos, como se describió en la sección 3.6.7. Por lo tanto, se presentan las comparaciones para cada prueba del movimiento radial del centroide y el movimiento radial del corte de los ejes principales del spot.

4.2.1 Prueba Patrón.

En **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa en azul el movimiento radial del centroide y en rojo el movimiento radial del corte de los ejes principales. Se observa que efectivamente hay una relación entre el centroide y el corte de los ejes, ambos tienen un comportamiento similar exceptuando en un lapso de la muestra 400 a la 500 en donde se notan algunos picos constantes. Esto se debe a que el algoritmo de detección de los cortes hace un barrido en donde se encuentran los ejes máximos y en algunas ocasiones estos máximos se mantienen casi constantes, lo que genera que el corte se encuentre en puntos muy parecidos. Esta similitud se pudo corroborar en la Figura 62, donde se observa la correlación entre las señales que describen el movimiento radial del centroide (en CMOS3) calculado a partir de, su centro de masa y el corte de los ejes principales. Para las pruebas diferentes a la patrón (siguientes secciones), se utilizó el mismo método de comparación, sin embargo, la gráfica de cada uno de estos no se incluyó debido a que presenta una forma similar y el cambio sólo se presentó en el coeficiente de dicha correlación, el cual es mostrado en la tabla 8.

Figura 61 Movimiento radial del centroide obtenido en la Prueba Patrón, en CMOS3 (AZUL) y movimiento radial del corte de los ejes principales (ROJO).

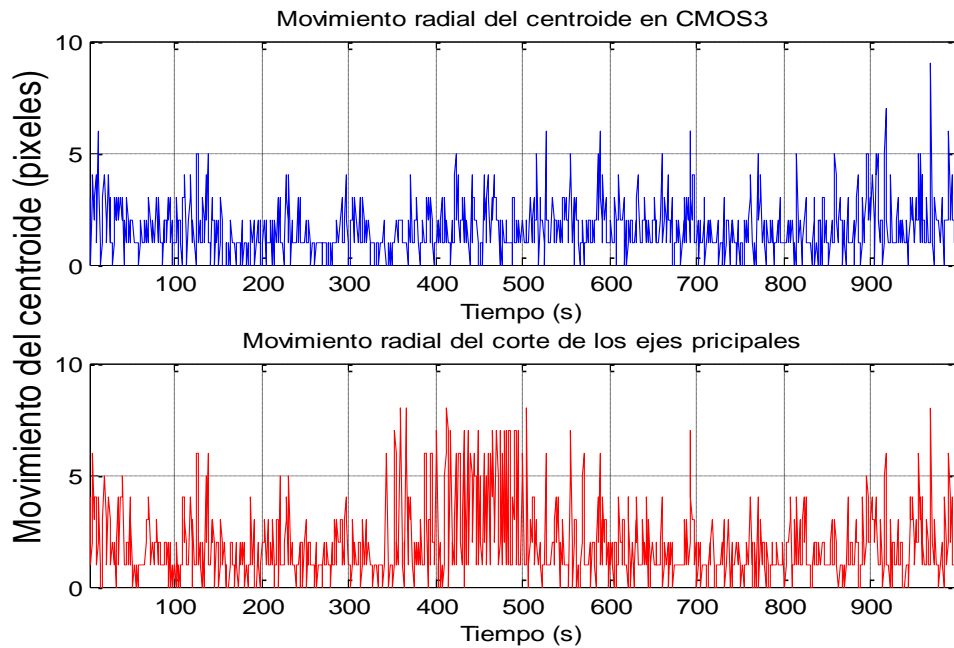
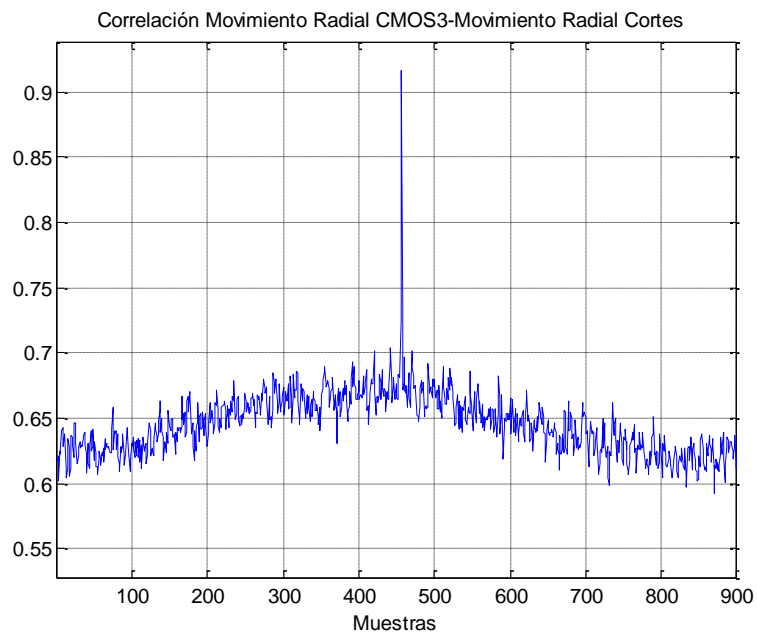


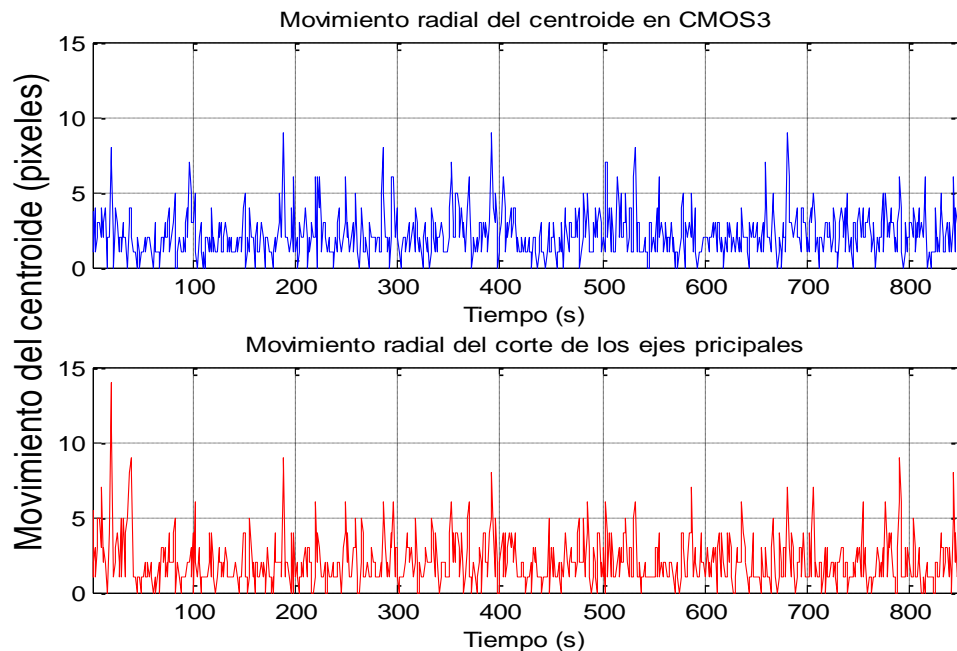
Figura 62 Correlación entre el Movimiento Radial del centroide en CMOS3 y el movimiento radial del corte de los ejes principales para la Prueba Patrón.



4.2.2 Prueba 15 [psi]

En la figura 63, se observa en azul el movimiento radial del centroide y en rojo el movimiento radial del corte de los ejes geométricos principales. El comportamiento de ambas es muy similar en base al coeficiente de correlación calculado (ver Tabla 8).

Figura 63 Movimiento radial del centroide obtenido en la Prueba de 15 [psi, en CMOS3 (AZUL) y movimiento radial del corte de los ejes principales (ROJO).

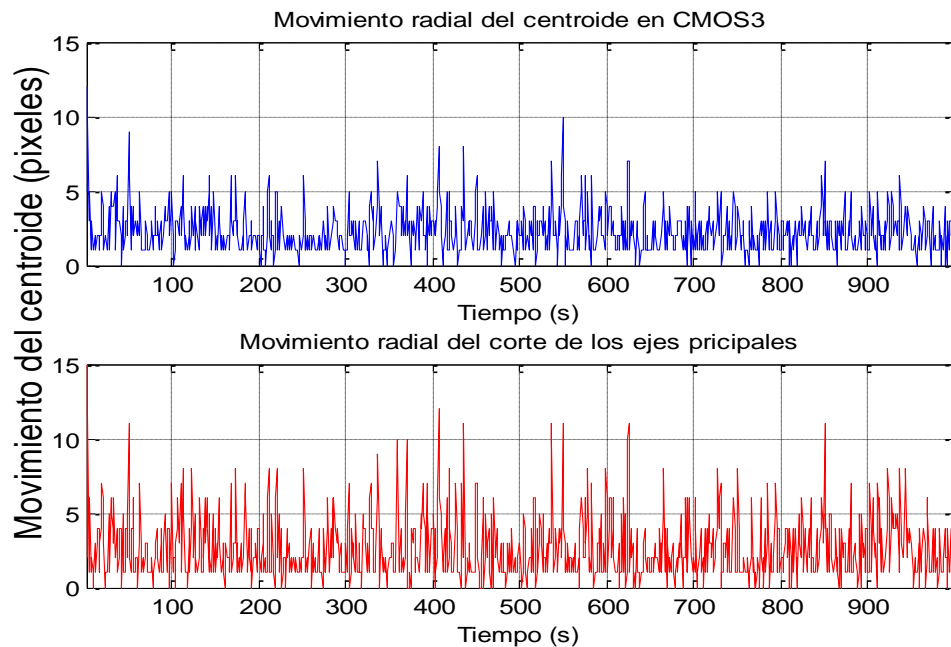


4.2.3 Prueba 20 [psi].

En la figura 64, se observa en azul el movimiento radial del centroide y en rojo el movimiento radial del corte de los ejes principales. En la gráfica se observa que

tanto la roja como la azul se mantienen en los mismos parámetros, como se puede comprobar con el coeficiente de correlación (ver Tabla 8), una vez más la relación del centroide con el corte de los ejes es notoria.

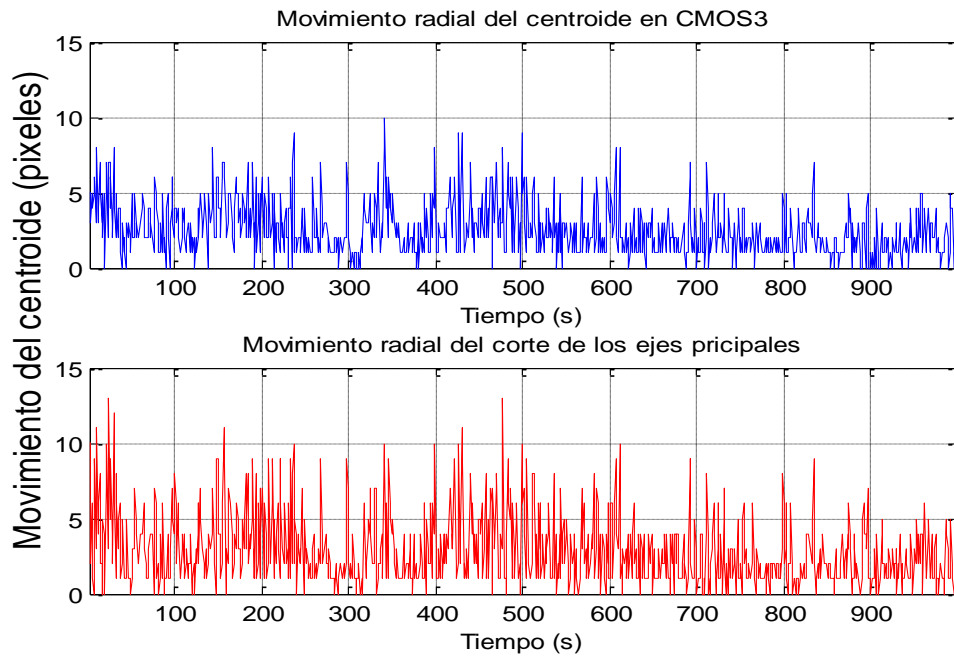
Figura 64 Movimiento radial del centroide obtenido en la Prueba de 20 [psi], en CMOS3 (AZUL) y movimiento radial del corte de los ejes principales (ROJO).



4.2.4 Prueba 25 [psi].

En la figura 65 se observa en azul el movimiento radial del centroide y en rojo el movimiento radial del corte de los ejes principales. En ambas gráficas hay un comportamiento semejante que se comprueba con el coeficiente de correlación encontrado (ver Tabla 8).

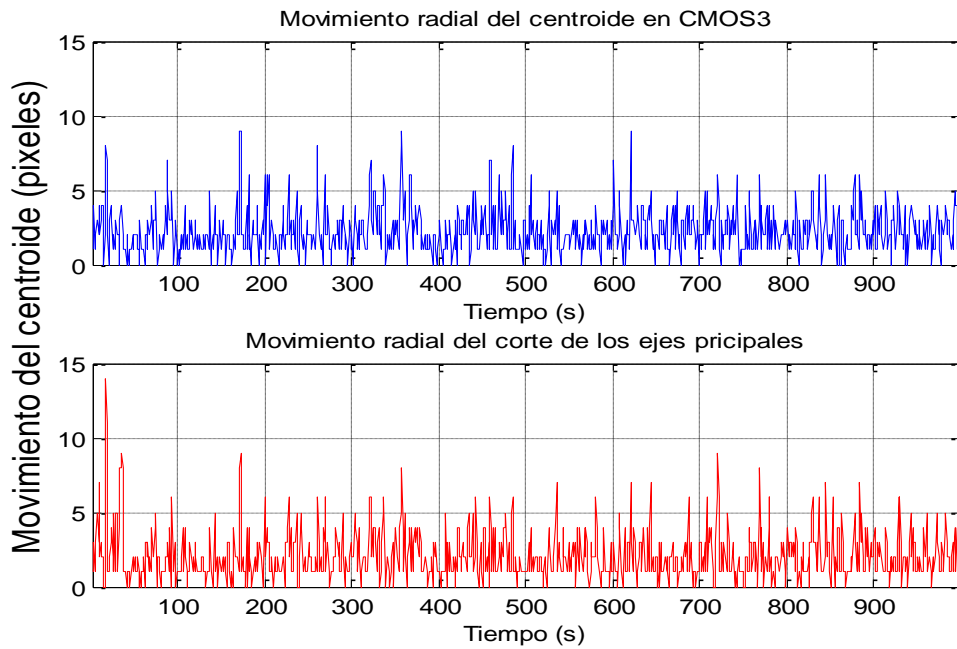
Figura 65 Movimiento radial del centroide obtenido en la Prueba de 25 [psi], en CMOS3 (AZUL) y movimiento radial del corte de los ejes principales (ROJO).



4.2.5 Prueba 30 [psi].

En la figura 66, se observa en azul el movimiento radial del centroide y en rojo el movimiento radial del corte de los ejes principales. Así como el coeficiente de correlación (ver Tabla 8) se encuentra dentro de un valor que denota la similitud entre los cálculos presentados a partir de los cortes de los ejes y el centro de masa del spot.

Figura 66 Movimiento radial del centroide obtenido en la Prueba de 30 [psi], en CMOS3 (AZUL) y movimiento radial del corte de los ejes principales (ROJO).



4.2.6 Prueba 35 [psi].

En la Figura 67 se observa en azul el movimiento radial del centroide y en rojo el movimiento radial del corte de los ejes principales. Se hace notorio desde el coeficiente de correlación (ver Tabla 8) que tanto la señal en rojo como la señal en azul siguieron manteniendo un comportamiento similar.

Figura 67 Movimiento radial del centroide obtenido en la Prueba de 35 [psi], en CMOS3 (AZUL) y movimiento radial del corte de los ejes principales (ROJO).

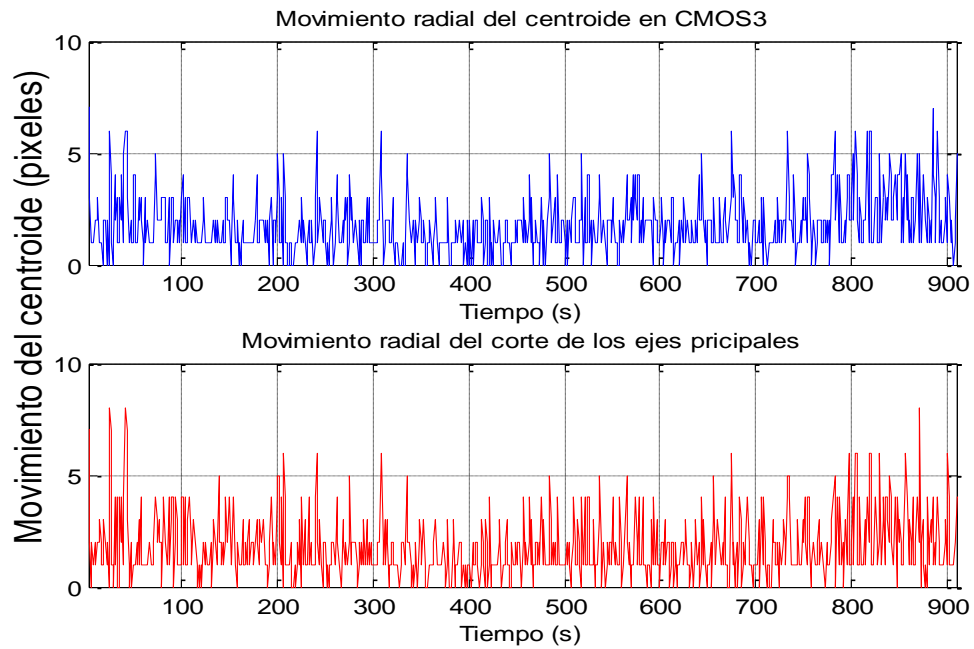


Tabla 8. Coeficientes de la correlación entre movimiento radial del centroide en CMOS3 y el movimiento radial del corte de los ejes principales obtenidos para cada prueba.

Prueba	Coefficiente de Correlación
Patrón	0,92
15 psi	0,88
20 psi	0,83
25 psi	0,87
30 psi	0,89
35 psi	0,91

4.3 Estudio de la función estructura

Como se mencionó en la sección 2.3.1 es importante hacer un estudio de las fluctuaciones del centroide ya que la turbulencia atmosférica es un fenómeno no estacionario que varía su valor medio en el tiempo. A continuación, se presenta el análisis de la función estructura del movimiento del centroide radial, horizontal y vertical, encontradas para cada una de las pruebas realizadas.

Figura 68. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba Patrón. a) Radial b) Horizontal c) Vertical.

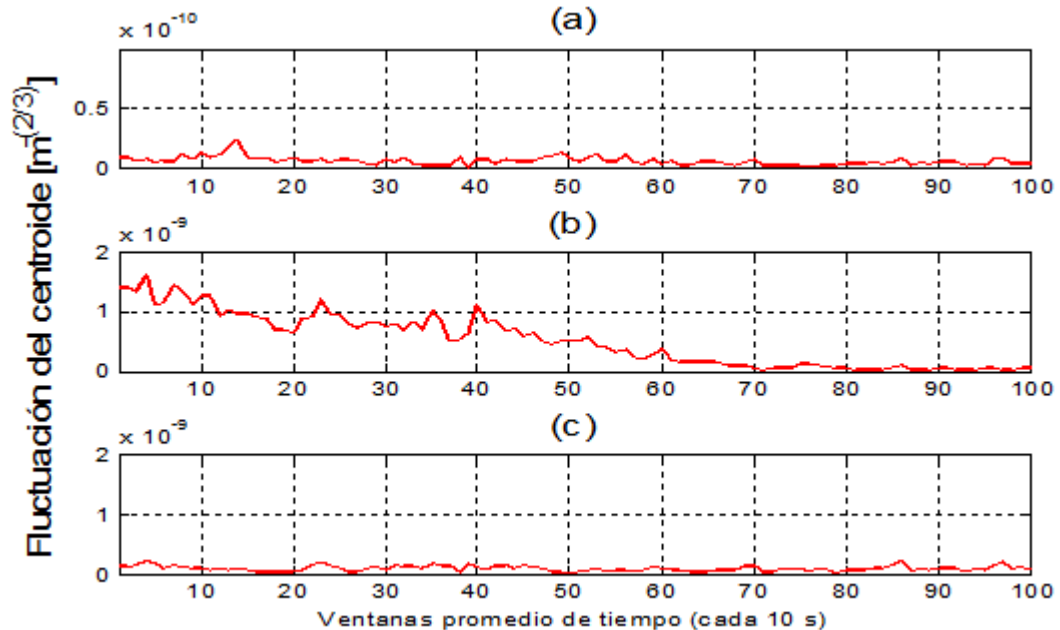


Figura 69. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba 15 [psi]. a) Radial b) Horizontal c) Vertical.

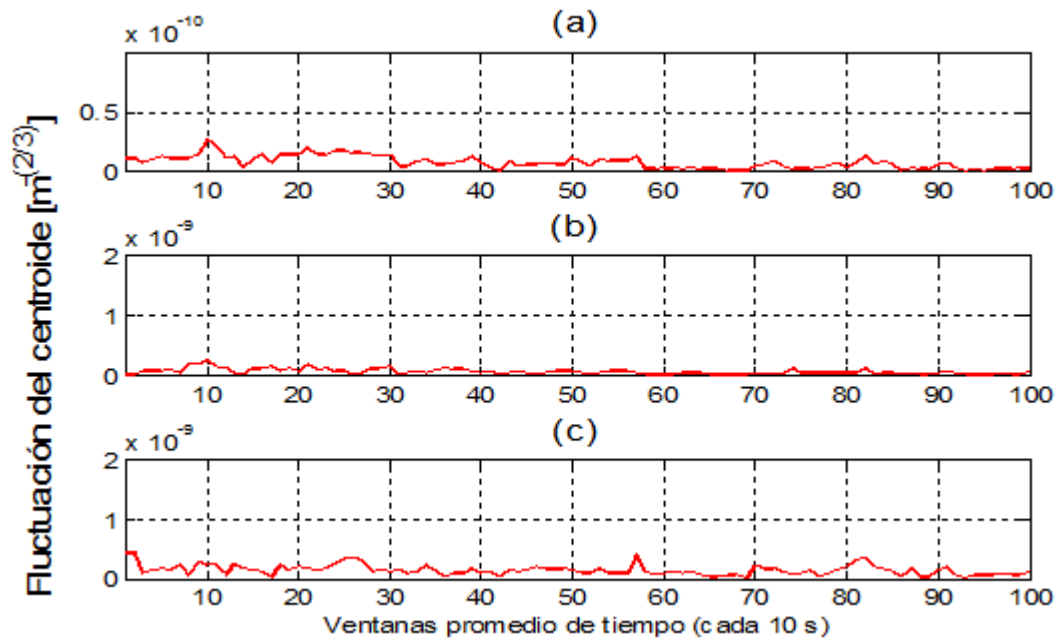


Figura 70. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba 20 [psi]. a) Radial b) Horizontal c) Vertical.

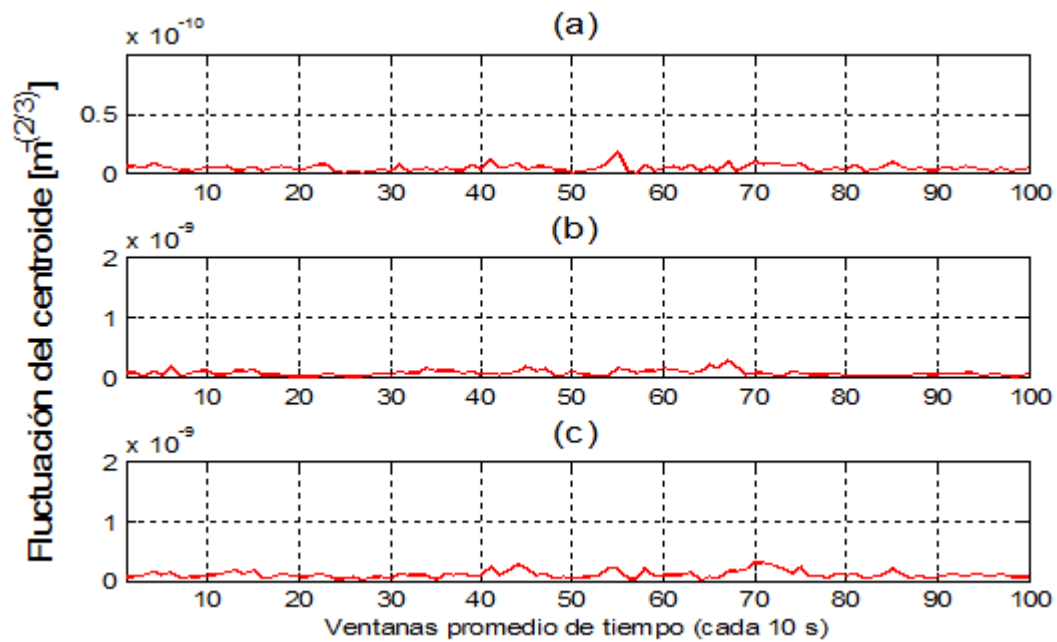


Figura 71. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba 25 [psi]. a) Radial b) Horizontal c) Vertical.

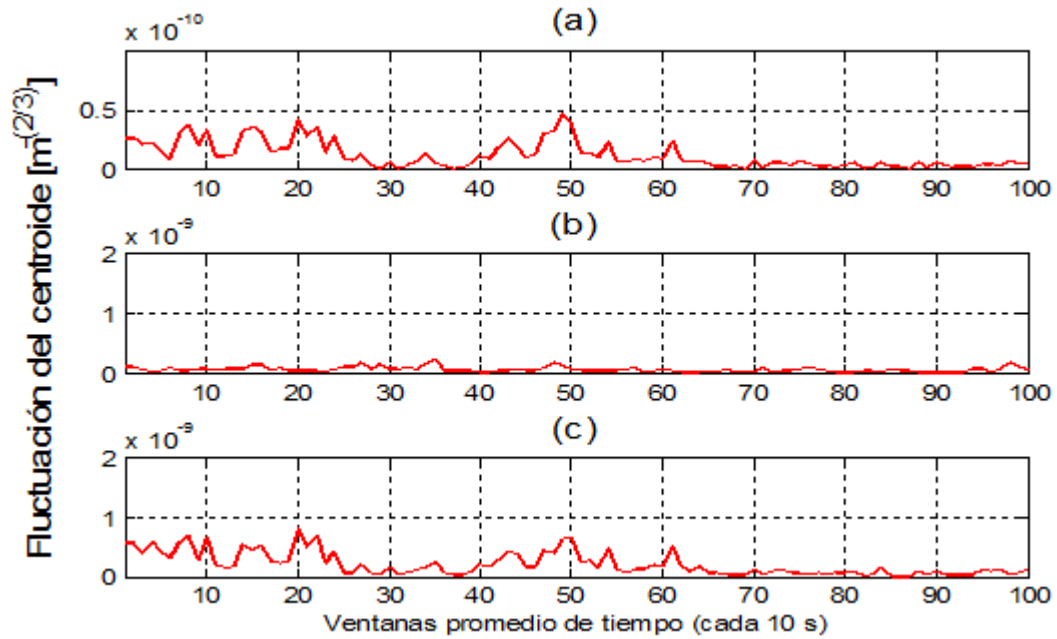


Figura 72. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba 30 [psi]. a) Radial b) Horizontal c) Vertical.

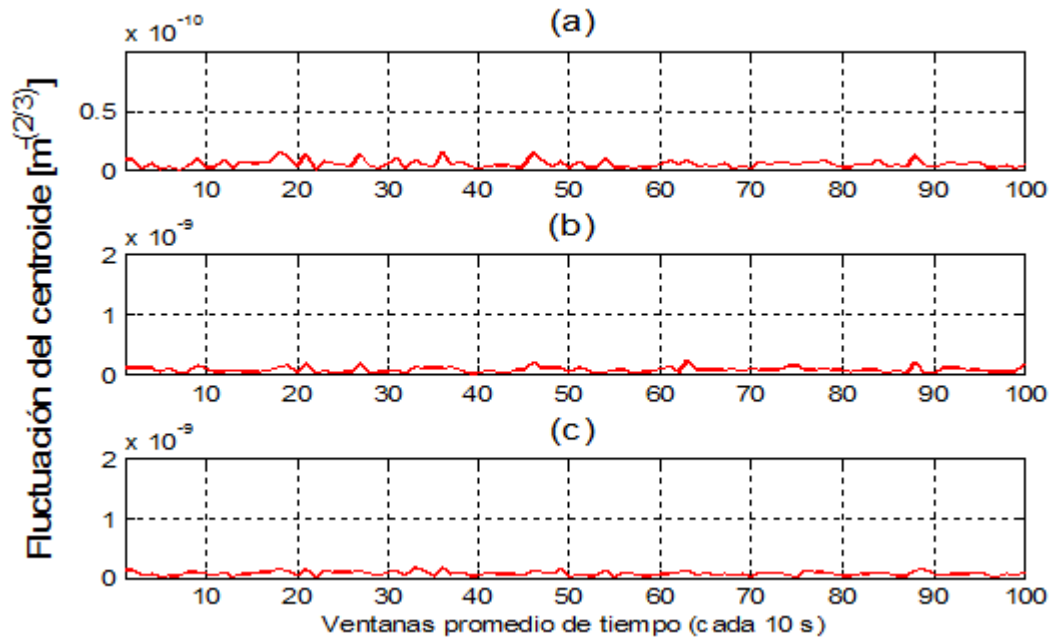


Figura 73. Función estructura del movimiento del centroide en la Prueba 35 [psi]. a) Radial b) Horizontal c) Vertical.

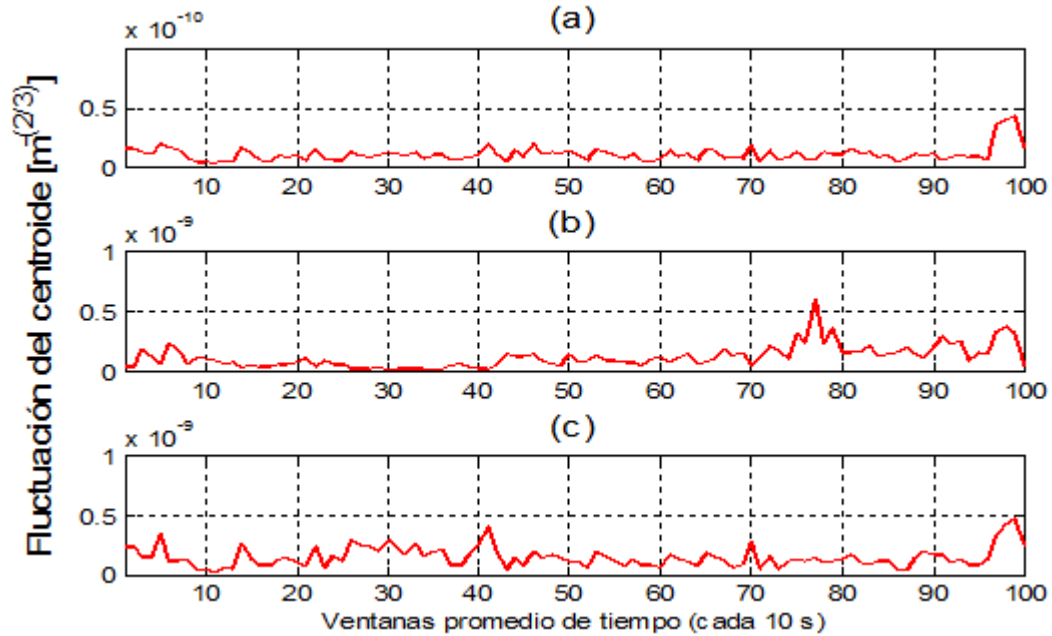


Tabla 9. Fluctuaciones promedio del centroide.

Prueba	Fluctuaciones promedio		
	Radial [$m^{2/3}$]	Horizontal [$m^{2/3}$]	Vertical [$m^{2/3}$]
Patrón	5.7566e-12	5.0726e-10	9.3745e-11
15 psi	4.8245e-12	6.5640e-11	6.9543e-11
20 psi	4.8521e-12	6.7113e-11	1.0592e-10
25 psi	1.1896e-11	5.8906e-11	2.1146e-10
30 psi	5.5823e-12	7.3270e-11	7.3859e-11
35 psi	1.0396e-11	1.0451e-10	1.3952e-10

El mayor promedio de fluctuación se encuentra en la prueba de 35 [psi] tanto radial como vertical y horizontalmente. Aunque se podría partir de la hipótesis que a menores presiones existen mayores fluctuaciones, el comportamiento de la función estructura hace nula esta hipótesis. En general las fluctuaciones del

movimiento del centroide en todas las pruebas tienen valores similares tanto radiales, como horizontales y verticales.

5. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- En este trabajo de grado se analizó la desviación de un haz láser que se produce por efectos intracavidad del láser y por la presión. Con este propósito se construyó un prototipo que tiene la capacidad de contener diferentes presiones por las cuales se propagó el haz láser.
- Se elaboró un sistema neumático que permitiera la inyección de aire comprimido a un prototipo turbulador y este mantuviera una presión constante durante las pruebas realizadas en el laboratorio. En este sistema neumático se implementaron puntos para medir la presión con un sensor MPXHZ6250A y un manómetro análogo de respaldo.
- Teniendo en cuenta las características de los algoritmos construidos y el hardware utilizado en los equipos, 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 8,6 [ms] lo cual garantiza que la toma de datos se encuentra dentro de la hipótesis de atmósfera congelada [12].
- El estimado del desplazamiento del centroide que se genera con los datos obtenidos en los sensores CMOS1 y CMOS2, que se presenta en cada una de las pruebas es una proyección del comportamiento esperado del láser que incluye los efectos producidos en la intracavidad del láser. El estimado es comparado con el valor adquirido en el sensor CMOS3 en el cual se encuentra el resultado de los efectos reales de la intracavidad y los efectos producidos por la turbulencia atmosférica. Para el caso de la Prueba Patrón

se obtiene una desviación estándar radial de 2 píxeles en las medidas de la CMOS3 y una desviación estándar radial de 4 píxeles para el estimado. Teniendo en cuenta que la precisión del dispositivo es de 1 píxel (sobre todo a la altura de las cámaras CMOS1 y CMOS2 que influyen significativamente en los valores estimados a la altura del plano de CMOS3) se puede concluir que el comportamiento del centroide es muy similar tanto en el estimado como en la medida real.

- Se encontró la desviación estándar radial en píxeles para el estimado a partir de la cámara 1 y 2 y el medido en la cámara 3 para cada una de las pruebas realizadas. La mayor desviación estándar radial es de ± 4 píxeles para el total de estimados, la mayor desviación estándar es de ± 3 para el total del movimiento medido en la cámara 3. Como se puede observar en la Tabla 7 Datos relevantes Movimiento radial del centroide. la diferencia entre la máxima desviación estimada y medida estándar es de 2 píxeles y se da para la prueba de 25 [psi]. Teniendo en cuenta la prueba patrón como referencia se puede determinar que aunque existe una variación del movimiento del centroide, ésta no se puede considerar como un cambio producido únicamente por la presión inyectada al turbulador.
- Se diseñó un algoritmo que permitiera identificar el corte de los ejes principales. Una vez encontrados los cortes para cada muestra, se compararon con el centroide hallado por la técnica del centro de masa. Hecha la correlación para cada una de las comparaciones se encontró que en el peor de los casos existe algo más de un 90% de correlación, lo que indica que el comportamiento del corte y el centroide son bastante similares,

- Se utilizó la función estructura para analizar las fluctuaciones del movimiento del centroide en ventanas de tiempo para tener una idea de su comportamiento. Se pudo observar que en estas ventanas hay un comportamiento que se podría considerar constante, y por lo tanto la escala utilizada para el aumento de presión, no se puede considerar como un factor influyente de manera significativa el comportamiento del haz.
- Siendo la caracterización de la presión y en general de la turbulencia, se plantea una investigación que considere las diferentes variables físicas que afectan la atmosfera y con ellas poder determinar con más exactitud el comportamiento del haz que atraviesa un medio turbulento en trayectorias horizontales a bajas alturas.

REFERENCIAS

- [1] F. T. N. Bretenaker, *Laser: 50 Years of Discoveries*, Hackensack, New Jersey: World Scientific Publishing Company, 2014.
- [2] T. S. McKechnie, *General theory of light propagation and imaging through the atmosphere*, Switzerland: Springer, 2016.
- [3] V. Aboites, *EL LASER*, Ciudad de Mexico: S.L. FONDO DE CULTURA ECONOMICA DE ESPAÑA, 1991.
- [4] Spectra-Physics, «Model 107B/Model127 25 or 35 mW,» Spectra-Physics, Mountain View, Estados Unidos.
- [5] O. J. Tijaro Rojas, Y. Torres Moreno y Y. Galeano, «Simple method to measure effects of horizontal atmospherical turbulence at ground level,» *Proceedings of SPIE*, pp. 1-11, 2016.
- [6] D. C. GIANCOLI, *Física para ciencias e ingeniería*. Cuarta edición, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [7] N. C. Monika Rani Jha, «Design and Analysis CMOS Image Sensor,» *International Journal of Engineering Science Invention*, vol. 5, nº 8, pp. PP 69-72, 2016.
- [8] E. O. Worldwide, *EO1312C 1/1.8" CMOS Color Lite Edition USB Camera*, Barrington, USA, 2014.
- [9] D. Liarte, «XATAKAFOTO,» 19 Diciembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.xatakafoto.com/camaras/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos>. [Último acceso: 15 Agosto 2017].
- [10] Freescale, *Media Resistant and High Temperature Accuracy for Measuring Absolute Pressure*, USA, 2005.
- [11] J. Rincón y J. Hernández, Trabajo de grado: 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., Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [12] N. A. Bharmal, «Frozen flow or not? Investigating the predictability,» de *Adapting to the Atmosphere Conference*, Durham, 2014.
- [13] R. E. W. Rafael C. González, *Digital Image Processing*, New Yersey: Pearson Education, Inc., 2008.

- [14] Matlab, «www.mathworks.com,» [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/regionprops.html>. [Último acceso: 25 Abril 2017].
- [15] Arduino, «Arduino Uno,» Arduino, [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. [Último acceso: 12 07 2016].
- [16] J. Villamizar y M. Herreño, 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.
- [17] J. Contreras, 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, 2016.

BIBLIOGRAFÍA

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

D. C. GIANCOLI, Física para ciencias e ingeniería. Cuarta edición, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008, pp. 46-58.

D. Liarte, «XATAKAFOTO,» 19 Diciembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.xatakafoto.com/camaras/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos>. [Último acceso: 15 Agosto 2017].

E. O. Worldwide, *EO1312C 1/1.8" CMOS Color Lite Edition USB Camera*, Barrington, USA, 2014.

F. T. N. Bretenaker, *Laser: 50 Years of Discoveries*, Hackensack, New Jersey: World Scientific Publishing Company, 2014, pp. 15-20.

Freescale, *Media Resistant and High Temperature Accuracy for Measuring Absolute Pressure*, USA, 2005.

J. Contreras, *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, 2016.

J. Rincón y J. Hernández, Trabajo de grado: 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., Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.

J. Villamizar y M. Herreño, 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.

Matlab, «www.mathworks.com,» [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/regionprops.html>. [Último acceso: 25 Abril 2017].

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

N. C. Monika Rani Jha, «Design and Analysis CMOS Image Sensor,» *International Journal of Engineering Science Invention*, vol. 5, nº 8, 2016 pp. 69-72.

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

R. E. W. Rafael C. González, Digital Image Processing, New Yersey: Pearson Education, Inc., 2008, pp 51-65 .

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

T. S. McKechnie, General theory of light propagation and imaging through the atmosphere, Switzerland: Springer, 2016, pp. 33-35.

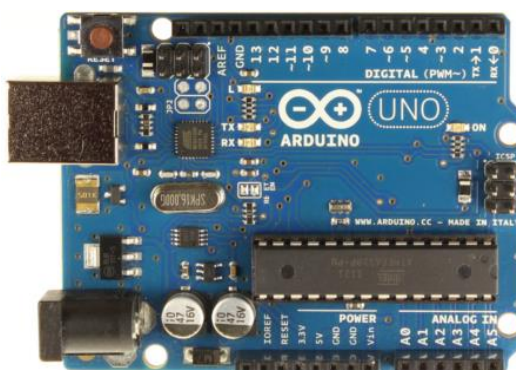
V. Aboites, EL LASER, Ciudad de Mexico: S.L. FONDO DE CULTURA ECONOMICA DE ESPAÑA, 1991, pp. 10-12.

ANEXOS

ANEXO A. ARDUINO UNO

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 [15].

Figura 74 Placa de Arduino



(Tomado de la referencia [15])

Tabla 10 Algunas especificaciones técnicas del Arduino UNO.

Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de operación	5V
Pines digitales I/O	14
Pines de entrada analógica	6
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

ANEXO B. HÍPER TERMINAL

Híper Terminal Private Edition (HTPE) es un software premiado de emulación de terminal de Windows capaz de conectarse a sistemas a través de redes TCP / IP, módems de acceso telefónico y puertos COM. Se hizo uso de la versión gratuita que está disponible en la página web del software.

Figura 75. Híper Terminal.



ANEXO C. INSTRUMENTO PATRÓN

Como instrumento patrón se utilizó un manómetro marca Ashcroft® con una resolución de 0,5 [psi] calibrado por el Laboratorio de Metrología PROGEN S.A. que cuenta con la acreditación del ONAC (Organismo Nacional de Acreditación de Colombia) el 29 de junio del 2016.

Figura 76. Manómetro calibrado utilizado para la calibración del sensor de presión



ANEXO D. 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 E. VARIABLES ADICIONALES SENSADAS.

La humedad relativa y la temperatura fueron sensadas como complemento del proyecto haciendo uso de las herramientas diseñadas por los trabajos de grado previos [16] [17].

Figura 77. Humedad Relativa dentro del turbulador medida en cada prueba.

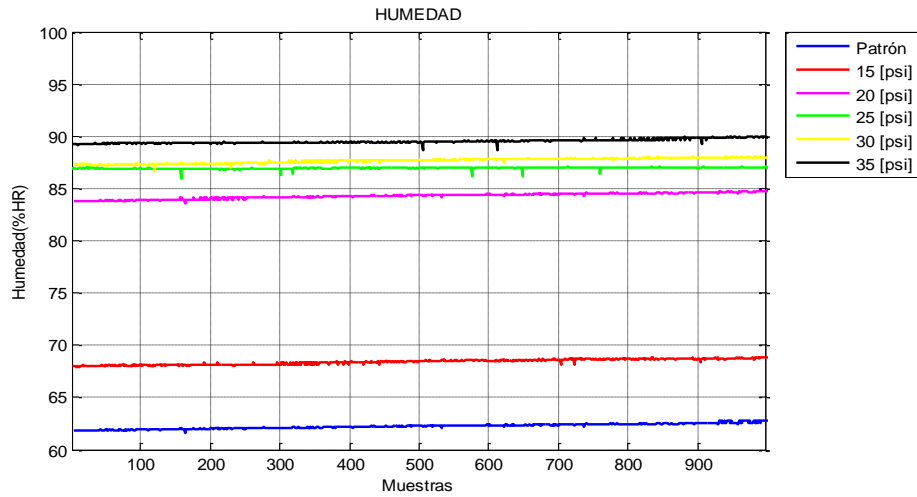


Figura 78. Temperatura medida dentro del turbulador en cada prueba.

