

**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**

**JUAN CARLOS CONTRERAS LOPEZ**

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

**2016**

**CARACTERIZACIÓN DE UN HAZ LÁSER AL PROPAGARSE A DISTANCIAS  
HORIZONTALES Y BAJA ALTURA: ESTUDIO DE LA TEMPERATURA  
ATMOSFÉRICA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FRENTE DE ONDA**

**JUAN CARLOS CONTRERAS LOPEZ**

**Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electrónico**

**Director**

**OMAR JAVIER TÍJARO ROJAS**

**Mi. Ingeniero Electrónico**

**Codirector**

**YEZID TORRES MORENO**

**Dr. Óptica y Tratamiento de la Señal**

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

**2016**

## DEDICATORIA

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

*A mi querida madre Luz que con su esfuerzo y apoyo me ha alentado a seguir adelante, que nunca desconfió en mí y siempre será aquella persona que me impulsará cada día a mejorar.*

*A mi padre Juan por ser ese pilar que me impulso a estudiar en esta maravillosa universidad, que con su sacrificio y apoyo me ha ayudado afrontar diversas dificultades.*

*A mis hermanos Kelly y Cristian por ese apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado a pesar de la distancia.*

*A mi novia Johana por motivarme a seguir adelante y brindarme su apoyo incondicional.*

*A mis amigos 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 inspirarme siempre a seguir adelante.*

*A mi universidad por ser ese espacio multicultural que cada día me enseñó a ser una buena persona, que me abrió las puertas de su seno científico que me forjaron como ingeniero.*

***Juan Carlos Contreras López***

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa su agradecimiento a:

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

Agradece al profesor Omar Javier Tijero, mi director, por su apoyo y confianza, por permitirme ser parte del grupo de investigación (GOTS), que además se tomó el arduo trabajo de transmitirme todos sus conocimientos acerca del tema, por orientarme en cada paso de mi desarrollo como ingeniero.

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

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

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 mi proceso de formación que me 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

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	22
<b>1. GENERALIDADES DEL PROYECTO</b>	24
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
1.2 JUSTIFICACIÓN	25
1.3 OBJETIVOS	25
1.3.1 Objetivo General	25
1.3.2 Objetivos Específicos	26
1.4 ALCANCES	26
<b>2. FUNDAMENTO TEÓRICO</b>	27
2.1 EL LÁSER Y LOS EFECTOS ATMOSFÉRICOS QUE INCIDEN EN EL	27
2.1.1 El láser	27
2.1.2 Turbulencia Atmosférica	29
2.1.3 Bando	30
2.1.4 Ensanchamiento Del Haz	32
2.2 TEMPERATURA EN LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA	32
2.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL ESTUDIO DEL CENTROIDE	33
2.4 SENSORES, HERRAMIENTAS DE ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES	34
2.4.1 Sensores	34

2.4.1.1 Cámaras CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor):	34
2.4.1.2 Sensores de Temperatura	37
2.4.2 Herramientas de adquisición	37
2.4.3 Procesamiento digital de Imágenes	38
2.4.3.1 Proceso de filtrado	38
2.4.3.2 Filtrado en el dominio de la frecuencia	39
2.4.3.3 Filtrado en el dominio espacial	40
<b>3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO</b>	<b>42</b>
3.1. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MONTAJES EXPERIMENTALES.	42
3.2. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE VARIACIÓN Y CONTROL DE TEMPERATURA.	42
3.3 RETARDO, ALGORITMO DE ADQUISICIÓN Y SINCRONIZACIÓN	42
3.4. TRATAMIENTO DE IMÁGENES.	43
3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	43
3.6 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MONTAJES EXPERIMENTALES.	43
3.6.1 Temperatura Ambiente	44
3.6.2 Pruebas con el Turbulador	44
3.6.2.1 Adquisición de datos.	45
3.6.3 Pruebas con el Paralelepípedo de Temperatura Controlada	46
3.6.3.1 Adquisición de datos.	47
3.7 DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE VARIACIÓN Y CONTROL DE TEMPERATURA.	47
3.7.1 Estructuras de variación de temperatura	47
3.7.1.1 Turbulador	48

3.7.1.2 Caracterización del Sistema	49
3.7.1.3 Paralelepípedo Controlado	55
3.7.1.4 Caracterización del Sistema	57
3.8 RETARDOS, ALGORITMO DE ADQUISICIÓN Y SINCRONIZACIÓN.	68
3.8.1. Retardo en los sistemas de cómputo.	68
3.8.2. Retado en el enrutamiento ARDUINO – MATLAB™.	68
3.8.3. Retado en el enrutamiento MATLAB™ – Cámaras CMOS.	69
3.8.4. Estudio del algoritmo de adquisición	70
3.8.5. Sincronización de las herramientas de adquisición	72
3.9 TRATAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES	75
3.9.1 Estudio del centroide	75
3.9.2. Estudio del diámetro.	77
3.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
3.10.1 Análisis de centroides y diámetro en el ambiente del Laboratorio.	80
3.10.2 Análisis de centroides y diámetro en el turbulador – Temperatura: 105 °C	86
3.10.3 Análisis de centroides y diámetro en el Paralelepípedo de vidrio – Temperatura: 105 °C	98
3.10.4 Función Estructura	104
<b>4. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>114</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>118</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>123</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>128</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Proceso del láser (Amplificación de luz). [1]	27
Figura 2. Elementos de un láser. [2].	28
Figura 3. Efecto distorsionador de la atmósfera sobre imágenes obtenidas desde la Tierra durante el contacto interno entre los discos del Sol y Venus; el disco del planeta parece unido al extremo del disco solar en el tránsito de Venus de Junio de 2004. [6].	30
Figura 4. Movimiento en la cavidad del láser, escena vista por dos observadores a la distancia $z_1$ y $z_2$ en el tiempo $t_1$ (línea sólida) y $t_2$ (línea punteada) [11].	31
Figura 5. Captura de comportamiento de un haz láser en una CMOS. a) Haz alineado o inicial ( $t_1$ ). b) Desplazamiento dado por la traslación ( $t_2$ ); c) Desplazamiento dado por la rotación ( $t_2$ ) [11].	32
Figura 6. Modelos diferentes de cámaras CMOS E0 – 1312. [20].	35
Figura 7. Funcionamiento del sensor CMOS – Filtro Bayer. [21]	36
Figura 8. Ejemplo de filtrado de una imagen. a) Suavizar la imagen, b) Eliminar ruido, c) Realizar bordes, d) Detectar bordes. [28]	39
Figura 9. Etapas del procesamiento de imágenes en el dominio de la frecuencia. [29]	40
Figura 10. Ejemplo de filtrado en el dominio de la frecuencia. [29].	40
Figura 11. Montaje Experimental de la prueba patrón. $Z_1 = 1.18$ m, $Z_2 = 1.45$ m, $Z_3 = 3.97$ m. BS: Divisor de haz. CMOS: Sensor. A: Atenuador.	44
Figura 12. Montaje Experimental del caso de estudio con el turbulador. $Z_1 = 1.18$ m, $Z_2 = 1.45$ m, $Z_3 = 3.97$ m. BS: Divisor de haz. CMOS: Sensor. T: Turbulador. A: Atenuador.	45

Figura 13. Montaje experimental del caso de estudio con el paralelepípedo controlado en temperatura. Z1 = 1.18 m, Z2= 1.45 m, Z3 = 3.97 m. BS: Divisor de haz. CMOS: Sensor. P: Paralelepípedo. A: Atenuador.	46
Figura 14. Turbulador, ambiente controlado por temperatura (Exterior). Reóstato - Cilindro hueco (interior)	48
Figura 15. Turbulador, a) Perfil frontal, b) Perfil lateral.	49
Figura 16. Curva característica de temperatura en el centro del turbulador. Posición del sensor = 50 [cm] en el centro de la sección transversal del turbulador.	50
Figura 17. Curva característica de Temperatura en los extremos del turbulador. Posición de los sensores = 15 [cm] - Rojo, 85 [cm] – Morado, en la parte inferior de la sección transversal del turbulador.	51
Figura 18. Curva característica de Temperatura en los extremos del turbulador. Posición de los sensores = 25 [cm] - Azul, 75 [cm] – Verde, en la parte inferior de la sección transversal del turbulador.	51
Figura 19. Curva característica de Temperatura en los extremos del turbulador. Posición de los sensores = 35 [cm] - Naranja, 65 [cm] – Amarillo, en la parte inferior de la sección transversal del turbulador.	52
Figura 20. Curva característica de Temperatura en los extremos del turbulador. Posición de los sensores = 35 [cm] - Naranja, 65 [cm] – Amarillo, en la parte superior de la sección transversal del turbulador.	53
Figura 21. Curva característica de Temperatura debajo del turbulador. Posición del sensor = 50 [cm].	54
Figura 22. Distribución de temperatura al interior del turbulador en función de la distancia del dispositivo, posición de los sensores en la parte inferior y en el centro de la sección transversal del turbulador.	54
Figura 23. Diseño del cuarto de vidrio	56
Figura 24. Circuito Impreso – Regulador de intensidad de luz	57
Figura 25. Diagrama esquemático del regulador de intensidad de luz	57
Figura 26. Curva característica de Temperatura vs Tiempo. Posición de los sensores sobre el camino óptico del haz láser.	58

Figura 27. Curva característica de Temperatura. Posición de los sensores sobre el camino óptico del haz láser.	59
Figura 28. Distribución de temperatura al interior del Paralelepípedo de vidrio, en función de la distancia del dispositivo.	60
Figura 29. Ubicación y enumeración de los sensores cara frontal del paralelepípedo de vidrio.	61
Figura 30. Curva característica de Temperatura vs Tiempo. Posición de los sensores a un radio de 3 [cm] sobre el camino óptico del haz láser, a una posición de 0 [cm] en el eje z.	61
Figura 31. Curva característica de Temperatura vs Tiempo. Posición de los sensores a un radio de 3 [cm] sobre el camino óptico del haz láser, a una posición de 5 [cm] en el eje z.	62
Figura 32. Curva característica de Temperatura vs Tiempo. Posición de los sensores a un radio de 3 [cm] sobre el camino óptico del haz láser, a una posición de 10 [cm] en el eje z.	62
Figura 33. Curva característica de Temperatura vs Tiempo. Posición de los sensores a un radio de 3 [cm] sobre el camino óptico del haz láser, a una posición de 15 [cm] en el eje z.	63
Figura 34. Curva característica de Temperatura vs Tiempo. Posición de los sensores a un radio de 3 [cm] sobre el camino óptico del haz laser, a una posición de 20 [cm] en el eje z.	63
Figura 35. Diagrama de calibración. Medidor de temperatura Fluke (naranja) - Sensor (azul).	65
Figura 36. Gráfica del sensor T1 de temperatura contra Tensión.	66
Figura 37. Datos del medidor FLUKE contra valores calibrados del sensor	67
Figura 38. Diagrama de flujo del código de adquisición.	71
Figura 39. Diagrama esquemático del circuito de inicialización y captura de temperatura en el Arduino.	72
Figura 40. Diferencias encontradas entre los tiempos de captura de los dispositivos	73

Figura 41. Diagrama de flujo del tratamiento de imágenes – Estudio del centroide.	75
Figura 42. Izq. imagen original captura por el sensor CMOS. Der. Imagen filtrada empleado la FFT.	76
Figura 43. Dispersión del brillo en el objeto (centro de masas)	76
Figura 44. Diagrama de flujo del tratamiento de imágenes – Estudio del diámetro.	77
Figura 45. Imagen binarizada a). Binarización al 13.53% de la intensidad máxima b). Al 50%	77
Figura 46. Elemento estructurante, disk.	78
Figura 47. Posición del centroide en CMOS3 – Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	81
Figura 48. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	82
Figura 49. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	82
Figura 50. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera.	83
Figura 51. Movimiento del centroide en el Eje Y. Sin Bando – Sólo Atmósfera.	83
Figura 52. Distribución 2D de los centros de masa (solo efectos de la atmósfera)	84
Figura 53. Cálculo del diámetro a lo largo del tiempo a partir de datos experimentales. A) Cámara 1, B) Cámara 2, C) Cámara 3.	85
Figura 54. Posición del centroide en CMOS3 – Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	86
Figura 55. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	87
Figura 56. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	87
Figura 57. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera.	88

Figura 58. Movimiento del centroide en el Eje Y. Sin bandeo – Sólo atmósfera.	88
Figura 59. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)	88
Figura 60. Temperatura irradiada sobre el haz láser por una fuente puntual de temperatura (aquí suministrada por un caudín).	90
Figura 61. Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado (abajo).	90
Figura 62. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)	91
Figura 63. Gradientes de temperatura presentes en el turbulador	93
Figura 64. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	94
Figura 65. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	94
Figura 66. Movimiento del centroide en el Eje Y. Sin bandeo – Sólo atmósfera	95
Figura 67. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera.	95
Figura 68. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)	95
Figura 69. Calculo del diámetro a lo largo del tiempo a partir de datos experimentales en la Cámara 3.	98
Figura 70. Posición del centroide en CMOS3 – Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	99
Figura 71. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	99
Figura 72. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	100
Figura 73. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera.	100
Figura 74. Movimiento del centroide en el Eje Y. Sin bandeo – Sólo atmósfera.	101

Figura 75. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)	101
Figura 76. Cálculo del diámetro a lo largo del tiempo a partir de datos experimentales en la Cámara 3.	102
Figura 77. Función estructura del movimiento del centroide en X en las pruebas p1, p2, p3 y p4 del paralelepípedo de vidrio.	105
Figura 78. Función estructura del movimiento del centroide en Y en las pruebas p1, p2, p3 y p4 del paralelepípedo de vidrio.	106
Figura 79. Función estructura del cambio del diámetro en las pruebas p1, p2, p3 y p4 del paralelepípedo de vidrio.	107
Figura 80. Función estructura del movimiento del centroide en X en las pruebas p1, p2, p3 y p4 del turbulador.	109
Figura 81. Función estructura del movimiento del centroide en Y en las pruebas p1, p2, p3 y p4 del turbulador.	110
Figura 82. Función estructura del cambio del diámetro en las pruebas p1, p2, p3 y p4 del turbulador.	111
Figura 83. Función estructura del movimiento del centroide a) en X b) en Y c) y diámetro en la prueba ambiente.	113
Figura 84. Dimensiones sensor de temperatura LM35. Tomado de la referencia [24].	130
Figura 85. Tarjeta de desarrollo para controlador Arduino (ATMEGA 2560).	131
Figura 86. Posición del centroide en CMOS3 – Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	138
Figura 87. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	139
Figura 88. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo)	139
Figura 89. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera	140
Figura 91. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)	140

Figura 92. Posición del centroide en CMOS3 – Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	141
Figura 93. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	142
Figura 94. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	143
Figura 95. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera	144
Figura 96. Movimiento del centroide en el Eje Y. Sin bandeo – Sólo atmósfera	144
Figura 97. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)	145
Figura 98. Posición del centroide en CMOS3 – Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	146
Figura 99. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	147
Figura 100. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).	148
Figura 101. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera	148
Figura 102. Movimiento del centroide en el Eje Y. Sin bandeo – Sólo atmósfera	149
Figura 103. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)	149

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Especificaciones de la prueba echas con el Turbulador.	45
Tabla 2. Especificaciones de la prueba realizadas con el Paralelepípedo.	47
Tabla 3. Especificaciones de la primera prueba.	50
Tabla 4. Especificaciones de la segunda prueba.	50
Tabla 5. Especificaciones de la tercera prueba.	52
Tabla 6. Datos obtenidos en la interpolación	55
Tabla 7. Especificaciones de la prueba	58
Tabla 8. Especificaciones de la segunda prueba	59
Tabla 9. Valor de la pendiente obtenida – Valor de la desviación máxima.	66
Tabla 10. Constantes y desviación máxima para la caracterización de los cuatro (4) sensores de temperatura.	67
Tabla 11. Retardo en el enrutamiento MATLAB – Cámaras CMOS	69
Tabla 12. Retardo promedio entre cada par de computadores en la prueba de sincronización.	74
Tabla 13. Tiempos de sincronismo para cada prueba (Resaltando el mejor y peor tiempo en cada uno de los montajes experimentales)	79
Tabla 14. Movimiento máximo del centroide para todas las pruebas realizadas en cada situación.	103
Tabla 15. Fluctuación promedio global de los centroides en X – Paralelepípedo.	106

Tabla 16. Fluctuación promedio global de los centroides en Y – Paralelepípedo.	107
Tabla 17. Fluctuación promedio global del diámetro del spot – Paralelepípedo.	108
Tabla 18. Fluctuación promedio global de los centroides en X – Turbulador.	110
Tabla 19. Fluctuación promedio global de los centroides en Y – Turbulador.	111
Tabla 20. Fluctuación promedio global del diámetro del spot – Turbulador.	112
Tabla 21. Fluctuación promedio global del centroide en X, en Y y el diámetro – Prueba ambiente.	113
Tabla 22. Especificaciones del Láser Modelo 127. [3].	128
Tabla 23. Propiedades del sensor CMOS EO-1312. a [22].	129
Tabla 24. Características del LM35. [24].	129
Tabla 25. Especificaciones Técnicas Arduino Mega 2560. [25].	131
Tabla 26. Especificaciones Técnicas de los equipos de cómputo.	132

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. DISPOSITIVOS Y SOFTWARE UTILIZADOS	128
ANEXO B. ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	134
ANEXO C. ALGORITMO DE DATOS DE TEMPERATURA	136
ANEXO D. PARALELEPÍPEDO DE VIDRIO – PRUEBA INCREMENTANDO LA TEMPERATURA DE 25°C A 100°C (ESTUDIO DEL CENTROIDE).	138
ANEXO E. TURBULADOR – PRUEBA INCREMENTANDO LA TEMPERATURA DE 25°C A 145°C (ESTUDIO DEL CENTROIDE).	146

## RESUMEN

**TITULO:** CARACTERIZACIÓN DE UN HAZ LÁSER AL PROPAGARSE A DISTANCIAS HORIZONTALES Y BAJA ALTURA: ESTUDIO DE LA TEMPERATURA EN LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL FRENTE DE ONDA\*

**AUTORES:** JUAN CARLOS CONTRERAS LÓPEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Temperatura, Turbulencia Atmosférica, Haz Láser.

### DESCRIPCIÓN:

La temperatura es una magnitud que se relaciona con el índice de refracción, entre más intensa sea la temperatura el índice de refracción fluctuará más de manera aleatoria, lo que generará una mayor distorsión en el frente de onda y por consiguiente un desplazamiento en el centroide.

Este proyecto de grado muestra los efectos que tiene la temperatura sobre la trayectoria de un haz láser al propagarse de manera horizontal a bajas alturas, con el fin de mejorar el procesamiento respecto a la distorsión, debido a que en este rango de medida (a nivel de la corteza terrestre), la luz se ve afectada por la turbulencia atmosférica distorsionando de esta manera la imagen.

Con la intención de observar el efecto causado al propagar un haz láser por un medio turbulento fuertemente influenciado por la temperatura, se experimentó con dos sistemas de variación y control de temperatura en su interior. El primero un turbulador y el segundo un paralelepípedo de vidrio, a través de un montaje experimental se capturó la información del haz láser y de la temperatura presente sobre los dos sistemas mencionados, por medio de una configuración de tres (3) cámaras CMOS Y cuatro (4) sensores de temperatura (LM35) en forma sincronizada. La información obtenida se analizó con la herramienta de software MATLAB®, lo cual permitió hallar la posición del centro de masa del spot en el tiempo, y las desviaciones causadas por las diferentes condiciones turbulentas generadas en los sistemas de temperatura. Los resultados se vieron reflejados en el análisis estadístico del desplazamiento del centroide.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E<sup>3</sup>T), Director MI. Omar Javier Tijaro Rojas, Codirector Dr. Yezid Torres Moreno

## ABSTRACT

**TITLE:** LASER BEAM CHARACTERIZATION AFTER A HORIZONTAL DISTANCE AND GROUND LEVEL PATH: STUDY OF THE ATMOSPHERIC TURBULENCE TEMPERATURE ON WAVEFRONT PROPERTIES\*

**AUTORES:** JUAN CARLOS CONTRERAS LÓPEZ\*\*

**KEY WORDS:** Temperature, Atmospheric Turbulence, Laser Beam.

### DESCRIPTION:

Temperature is a physical magnitude, related to refractive index, if temperature is higher, then refractive index presents more important fluctuations randomly, which produce a greater distortion in the wavefront and thus a displacement in the centroid.

This end degree project shows the effect that has the temperature on the laser beam horizontal path at ground level, in order to improve processing regarding distortion, because in this measuring range (at the level of the earth's crust), the light is affected by atmospheric turbulence thus distorting the image.

With the intention to observe the effect caused by the turbulent medium strongly influenced by temperature on propagation laser beam, we experimented with two variable and controllable temperature systems designed-made for this purpose. The first one is a Turbulador and the second is a parallelepiped glass. Experimental setup information for the laser beam and turbulence temperature in these two systems is captured through a configuration of three (3) CMOS cameras and four (4) temperature sensors (LM35) synchronously. The obtained information is analyzed with the software tool MATLAB ®. This tool allows find the position of the spot mass center in function of time evolution, and it for their deviations caused by different turbulent conditions generated inside the two temperature manufactured systems. The results were reflected in the statistical analysis of the centroid translation.

---

\* End pregraduate work

\*\* Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications (E<sup>3</sup>T) Engineering School, Director MI. Omar Javier Tijaro Rojas, Codirector Ph.D. Yezid Torres Moreno.

## INTRODUCCIÓN

En su esfuerzo por comprender e interpretar el comportamiento de diferentes fenómenos en la tierra, el ser humano ha intentado estudiar objetos que le ayuden a entender de mejor manera estos hechos; una de las ciencias en la cual la humanidad ha dirigido sus investigaciones es la astronomía, porque el universo es uno de los conceptos más amplios y desconocido por ellos, por tal motivo es considerada una de las ciencias con mayores avances tecnológicos durante la última década [34], en ella se utilizan diferentes instrumentos ópticos y electrónicos que hacen percibir de mejor manera una imagen acerca del cosmos; muchas de esas herramientas en su mayoría son afectadas por la atmósfera, la cual difumina la imagen de muchos objetos observados.

La atmósfera de la tierra es un medio cuyo índice de refracción es cercano a la unidad [17]. Esto permite realizar ligeras modificaciones a las técnicas de propagación de la luz en un medio vacío, para realizar simulaciones de la propagación a través de la atmósfera. Desafortunadamente el índice de refracción atmosférico adopta valores aleatorios en el espacio y tiempo; este efecto causa una distorsión aleatoria en la propagación de un haz de luz por este medio; por tal motivo, los sistemas ópticos que dependen de la luz y se propagan a través de la atmósfera deben superar este gran desafío, como por el ejemplo los sistemas basados en la emisión del haz láser [17].

Por tal razón, actualmente se adelantan investigaciones [35] que buscan aumentar la resolución para formar imágenes en presencia de turbulencia a bajas altitudes. Algunas dificultades para la formación de imágenes en estas condiciones son que la turbulencia a nivel de suelo es mucho más fuerte que con la altura, es por tal motivo, que los observatorios astronómicos son ubicados en lo alto de las

montañas, debido a que la turbulencia es menor en estos lugares. Además, la turbulencia en un camino horizontal se encuentra distribuida a lo largo del mismo y el modelo de la lámina delgada de fase aplicado en condiciones verticales no es aplicable en este aspecto [17].

A continuación se presenta el proyecto asociado a la caracterización de un haz láser al propagarse a distancias horizontales y baja altura, con el objeto de visualizar y estudiar los efectos dados debido a la turbulencia atmosférica y al movimiento natural propio del haz dentro de su cavidad resonante.

# 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema a tratar, se centró en el desarrollo de una técnica capaz de corregir los efectos causados por la cavidad resonante propia de un láser (rotación, desviación) que experimentalmente se modelaba como un haz ideal, para la obtención de imágenes a baja altura y a cierta distancia del objeto, con el fin de obtener en lo posible sólo el efecto de la turbulencia atmosférica (de carácter aleatorio), el cual afecta la formación precisa de imágenes y la distorsión del haz láser transmitido.

Las características propias de la fabricación del láser, las temperaturas internas que se manejan y la potencia generada hacen que el haz no sea emitido siempre en la misma posición espacial y con la misma orientación, lo cual ocasiona un efecto no deseado en la obtención de imágenes. De esta manera es necesaria la caracterización de dicho movimiento, con el fin de conocer la operación del sistema y así, proceder a construir un algoritmo de corrección el cual permitirá separar este efecto del ejercido por la atmósfera sobre el centroide calculado a una distancia determinada.

El presente trabajo tuvo como finalidad comprender la distorsión que se genera por la fuente de luz al propagarse, para la obtención de imágenes a gran distancia horizontal y baja altura, debido a que en este rango de medida (a nivel de la superficie terrestre) la luz de iluminación se ve afectada por la turbulencia atmosférica distorsionando de esta manera la imagen; la manera de corroborar que el efecto distorsionador observado al obtener la imagen sea provocado únicamente por la turbulencia atmosférica es a través de pruebas experimentales,

en donde se eliminará el efecto de la cavidad resonante del láser (rotación y desviación) al momento de la emisión, y si es posible, extender la técnica para diferentes temperaturas

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Los efectos que provoca la turbulencia atmosférica sobre la propagación horizontal de un haz láser a baja altura es un tema que muy poco se ha estudiado, resulta un gran desafío obtener imágenes de alta calidad y resolución en presencia de este fenómeno, por tal motivo fue un gran reto estudiar un efecto que está íntimamente relacionado con la distorsión de las imágenes como lo es la temperatura, y obtener por medio de la corrección o modificación a los frentes de onda la corrección de dichas imágenes.

Actualmente se adelantan investigaciones que estudian otras magnitudes que al igual que la temperatura de la turbulencia afectan en gran medida la propagación horizontal de un haz láser, para este proyecto se pretende conocer el comportamiento de la turbulencia atmosférica y estudiar los efectos generados por su temperatura sobre un haz láser, empleando múltiples cámaras CMOS a diferentes distancias, y de esta manera separar los efectos de desviación provocados por la temperatura por medio de algoritmos y técnicas de detección.

## **1.3 OBJETIVOS**

**1.3.1 Objetivo General** Caracterizar el movimiento tridimensional de un haz láser causado por su propia cavidad resonante y su impacto sobre la propagación a baja altura y distancias horizontales; con el fin de estudiar el efecto de éste en la

onda propagada y consecuentemente extraer información acerca de la turbulencia causada por la atmósfera.

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

- Analizar y comprender el funcionamiento de un láser.
- Estudiar el efecto de desviación natural que tiene un láser por su fabricación, caracterizándolo para su posterior estudio y análisis.
- Conocer el comportamiento de la turbulencia atmosférica y estudiar los efectos generados por su temperatura sobre un haz láser, empleando múltiples cámaras CMOS a diferentes distancias.
- Separar el efecto de desviación del efecto de la turbulencia sobre un haz láser por medio de algoritmos y técnicas de detección.

#### **1.4 ALCANCES**

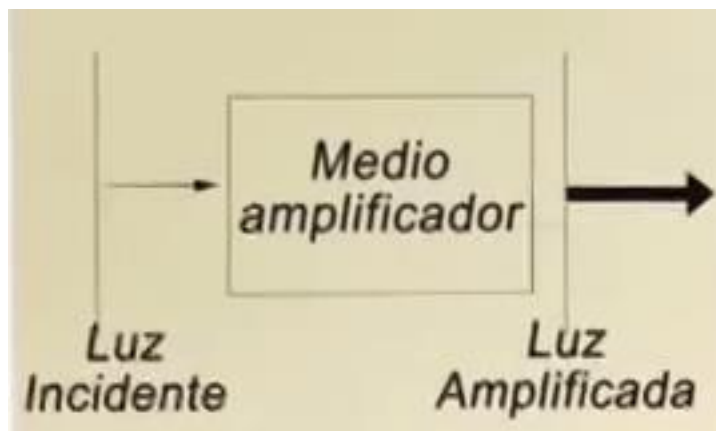
Se caracterizaron las variaciones de los centroides al propagar un haz láser por diferentes condiciones atmosféricas fuertemente influenciadas por la temperatura. Se emplearon dos montajes experimentales uno para cada sistema de variación y control de temperatura utilizada, cada uno está compuesto por tres (3) cámaras CMOS de dos dimensiones y cuatro (4) sensores de temperatura (LM35).

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 EL LÁSER Y LOS EFECTOS ATMOSFÉRICOS QUE INCIDEN EN EL

**2.1.1 El láser** Es una fuente de luz casi-monocromática (con una longitud de onda bien definida y coherente); para entender bien el funcionamiento de un láser se tienen que tener conceptos básicos acerca de la luz, la cual se puede modelar como una onda que se propaga en el vacío, con una determinada frecuencia la cual define las veces que el campo electromagnético oscila en un segundo, de esta manera la frecuencia especifica la sensación del color que los ojos perciben en la luz; las frecuencias bajas corresponden a colores que perciben los ojos en la región de los rojos, mientras que las frecuencias altas corresponden a colores que perciben los ojos en la región de los azules [1].

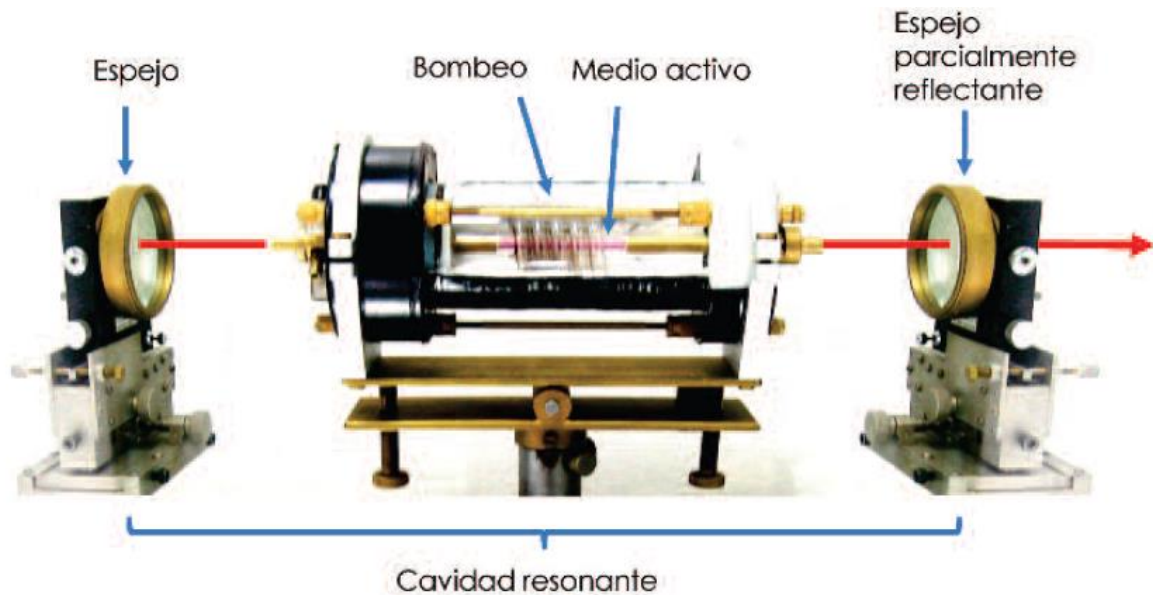
**Figura 1. Proceso del láser (Amplificación de luz). [1]**



El láser es una fuente de luz, compuesta por un medio amplificador que se encuentra en una cavidad óptica, y dos espejos, un espejo de salida que tiene una reflectividad parcial y que deja salir parte de la luz que se encuentra en la cavidad.

En la figura 2 se observan los elementos que componen el láser, en ella uno de los espejos debe ser parcialmente reflectante, capturando la mayor parte de la radiación en el interior de la cavidad, pero al mismo tiempo dejando que una pequeña fracción pueda salir al exterior formando el haz láser. La luz emitida y amplificada en el medio activo posee una cierta anchura espectral, en general mucho mayor de la que deseamos que emita el láser, esto se debe a que, en realidad, los niveles de energía de los átomos nunca se encuentran exactamente definidos. Por tanto la emisión estimulada, no se produce a una única frecuencia, sino en un pequeño rango en torno a la frecuencia de la transición ideal. En consecuencia, el poder amplificador del medio, conocido como curva de ganancia, tiene forma acampanada, siendo máximo para la frecuencia de la transición ideal y decreciendo a medida que nos alejamos de ella [2].

**Figura 2. Elementos de un láser. [2].**

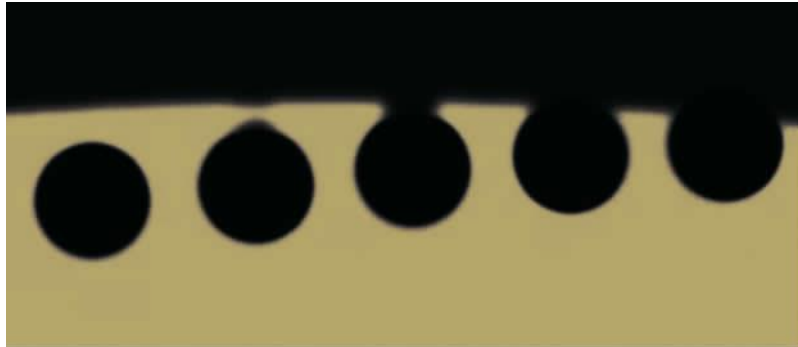


En la tabla 22 del Anexo A se muestran las características y especificaciones del láser utilizado en el laboratorio (HELIUM - NEON LASER MODEL 127).

**2.1.2 Turbulencia Atmosférica** La atmósfera terrestre es un medio que no se comporta de manera homogénea debido a los procesos de calentamiento y enfriamiento que ocurren debido al sol. Como resultado, se crea un régimen turbulento el cual es modelado por Kolmogorov en el que describe la atmósfera como un proceso continuo de generación de torbellinos, que a su vez se descomponen en otros torbellinos de menor tamaño, hasta llegar al punto de desaparición total con disipación de energía [4]. El tamaño de estos torbellinos se encuentra en el rango desde algunos milímetros, hasta centenares de metros, y las masas de aire que los generan se encuentran a temperaturas ligeramente distintas entre sí [4]. Por lo tanto, como el índice de refracción está íntimamente relacionado con la temperatura del medio; los índices de refracción de cada uno de estos torbellinos aledaños presentan valores ligeramente diferentes entre ellos. Desde el punto de vista óptico, se puede considerar cada torbellino como una lente individual, aunque de muy baja potencia. Además, teniendo en cuenta la transformación continua de los torbellinos y su movimiento debido al viento, el efecto en general causado sobre cualquier haz de luz que se propague a través de la atmósfera terrestre, puede ser muy intenso y de naturaleza compleja y aleatoria.

En la figura 3, se puede observar el efecto debido a la atmósfera terrestre presente en nuestro planeta en el evento de tránsito de Venus por delante del disco del Sol, dicho efecto recibe el nombre de “gota negra” el cual impide cronometrar con precisión los instantes de contacto entre el disco del planeta y el Sol. Por mucho tiempo se pensó que el efecto de la gota negra se debía a la densa atmósfera de Venus, y de hecho se consideró que era la primera evidencia real de que Venus tenía una atmósfera. Sin embargo, ahora se piensa que es un efecto óptico causado por la mancha de la imagen de Venus por la turbulencia en la atmósfera de la Tierra o imperfecciones en los instrumentos de visualización [5].

**Figura 3. Efecto distorsionador de la atmósfera sobre imágenes obtenidas desde la Tierra durante el contacto interno entre los discos del Sol y Venus; el disco del planeta parece unido al extremo del disco solar en el tránsito de Venus de Junio de 2004. [6].**

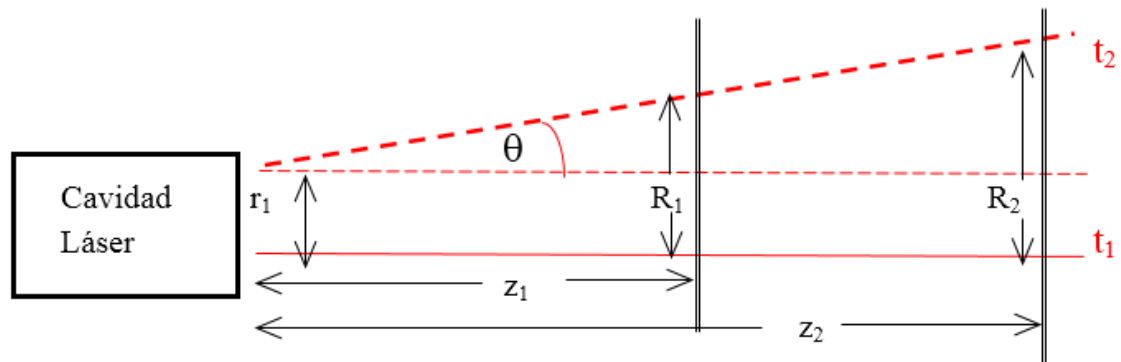


**2.1.3 Bando** Es una variación periódica en la separación línea a línea o la intensidad de la salida, se produce en la cavidad resonante del láser [7]. El ojo humano es muy sensible a los errores periódicos. Las fuentes que originan el bando son las variaciones de la reflectividad. Desde finales de 1980, el bando ha sido ampliamente estudiado y modelado. La mayoría de la literatura y las patentes parecen sugerir que existe una alta correlación entre el espaciamiento de las líneas no uniformes y la aparición del bando [8]. Loce y otros modelaron la vibración inducida de medio tono de bando en los procesos electrofotográficos [9]. Por su parte Burns y su equipo de trabajo señalaron que el error de posicionamiento del haz láser ocasionaría ruido de imagen no deseado, que degradaría la calidad de la imagen [10]. Debido a ello, se analizó este efecto presente en las imágenes adquiridas para poder descartarlo y poder percibir con una mayor exactitud el efecto causado por la temperatura presente en la turbulencia atmosférica.

Para este proyecto, los movimientos del spot son encontrados en imágenes capturadas en todas las cámaras; claramente la distancia longitudinal es diferente, entonces el desplazamiento en cada sensor es proporcional a éste, pero el efecto

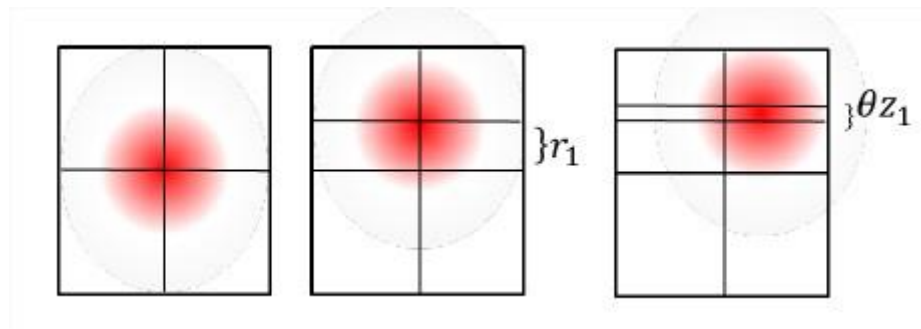
de la atmósfera genera movimientos adicionales que distorsionan el centro de masa. Por este inconveniente, el primer paso es caracterizar el movimiento de la cavidad del láser (véase *figura 4*) con sensores tan cercanos como sea posible para modelar este movimiento en un sensor lejano y evaluar la nueva posición de éste último. El segundo paso es discretizar el modelo para el cálculo de los centros de masa con la muestra anterior. Finalmente, se analizan los resultados con pruebas de aleatoriedad y se revisa que el índice de refracción en una onda propagada en la atmósfera puede ser aleatorio [11].

**Figura 4. Movimiento en la cavidad del láser, escena vista por dos observadores a la distancia  $z_1$  y  $z_2$  en el tiempo  $t_1$  (línea sólida) y  $t_2$  (línea punteada) [11].**



Para obtener imágenes con mayor calidad que evidencien muestras del efecto de la turbulencia atmosférica sobre el haz propagado, es necesario identificar los efectos del bandeo sobre dicho haz, los cuales se clasificaron en dos movimientos, desviación (rotación del haz respecto al eje de propagación) y traslación del centroide del spot (figura 5), estos son movimientos tridimensionales del haz láser producido por sus propias características de fabricación, por las temperaturas internas que se manejan y la potencia generada en él, lo cual hacen que el haz no sea emitido siempre en la misma posición espacial con la misma orientación, y ocasiona un efecto de traslación no deseado en el plano de captura de las imágenes.

**Figura 5. Captura de comportamiento de un haz láser en una CMOS. a) Haz alineado o inicial (t1). b) Desplazamiento dado por la traslación (t2); c) Desplazamiento dado por la rotación (t2) [11].**



**2.1.4 Ensanchamiento Del Haz** Sucede cuando el tamaño del haz óptico se propaga con un mayor tamaño que el predicho por la teoría de la difracción (también es llamado ensanchamiento de dispersión del haz). En un medio libre de turbulencia, un rayo láser que sale desde una abertura de diámetro  $D$ , en un campo lejano, tendría una ligera dispersión angular  $\theta$  del orden de  $\lambda/D$ . El ensanchamiento del haz es inducido por pequeñas escalas de torbellinos turbulentos en un medio de propagación que es usualmente dependiente de la longitud de onda. El diámetro o radio del haz es usualmente usado para medir el ensanchamiento del haz [16].

Una imagen borrosa y una imagen “bailando” son consecuencia del ensanchamiento del haz y el “bando” respectivamente. El efecto “bando” es importante en consideraciones de puntería y seguimiento del haz, mientras que el ensanchamiento de corta duración es importante para la propagación de pulsos y sistemas láser de alta energía [14].

## **2.2 TEMPERATURA EN LA TURBULENCIA ATMOSFÉRICA**

La turbulencia atmosférica en la Tierra es causada por variaciones aleatorias en temperatura y movimiento del aire por convección, el cual altera el índice de refracción espacialmente y temporalmente [17]. En los últimos cien años, se han desarrollado varias teorías y verificaciones experimentales para modelar los efectos de la turbulencia en la propagación óptica. La teoría más ampliamente aceptada del flujo turbulento fue la propuesta por A. N Kolmogorov [18].

La diferencia entre el calentamiento y enfriamiento diario en la Tierra debido a la luz solar y el ciclo diurno causan una gran escala de variaciones en la temperatura del aire. Este proceso consecuentemente crea el viento.

### **2.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL ESTUDIO DEL CENTROIDE**

Se ha visto que la temperatura es un parámetro que afecta en gran medida la trayectoria de un láser, el modelo descrito por Kolmogorov nos da indicios acerca de esto, puesto que la atmósfera terrestre es un medio que no se comporta de manera homogénea debido a los procesos de calentamiento y enfriamiento que ocurren debido al sol [4].

Esto se debe a los índices de refracción del aire creados por cada torbellino generado en la atmósfera terrestre, depende de la densidad y la temperatura a los cuales esté sometido el medio.

Por lo tanto al tener una mayor cantidad de temperatura en un espacio concentrado, el índice de refracción fluctúa dependiendo de qué tan intenso sea ésta variable física en dicho espacio, esto genera una mayor distorsión en el frente de onda y por consiguiente un desplazamiento en el centroide del láser. A medida que la distancia de propagación sea más larga estos efectos sobre el frente de onda y el centroide serán aún mucho más fuertes y aleatorios.

A pesar de que este tema está aún abierto, en este proyecto se creó un modelo a partir de los centroides de las imágenes para medir eficientemente la trayectoria natural de las oscilaciones dentro de la cavidad láser y así tener un mejor acercamiento en la medición de los efectos en la onda propagada. Este modelo debe usarse para encontrar los centros de masa en la pantalla lejana dónde los efectos de la turbulencia tienen desplazado su propio centroide.

## **2.4 SENSORES, HERRAMIENTAS DE ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES**

**2.4.1 Sensores** Los sensores son dispositivos diseñados para captar o detectar información de una magnitud del exterior (magnitudes físicas o químicas) y transformarlas en variables eléctricas o neumáticas.

Normalmente estos dispositivos son elaborados mediante la utilización de componentes pasivos (resistencias variables, todos aquellos elementos que varían su magnitud en función de alguna variable física), y la utilización de componentes activos [19].

Con la realización de un montaje experimental y un algoritmo, se efectuaron pruebas que buscaron minimizar los efectos propios del láser y el ruido presente en el medio, para ello se usaron dos (2) tipos de sensores, uno que pudiera captar las imágenes del frente de onda (cámaras CMOS) y otro que pudiera medir la temperatura del aire y la temperatura superficial (LM35) en un paralelepípedo de vidrio y en un turbulador respectivamente.

**2.4.1.1 Cámaras CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor):** Las cámaras digitales utilizadas en el laboratorio capturan las imágenes con los

sensores CMOS. El sensor CMOS es la parte fundamental de la cámara, es el elemento que capta la imagen cuya información es completamente analógica y la traduce a un formato digital con la cual se experimentó para mejorar la imagen. En la figura 6 se aprecian diferentes modelos de cámaras CMOS.

**Figura 6. Modelos diferentes de cámaras CMOS E0 – 1312. [20].**



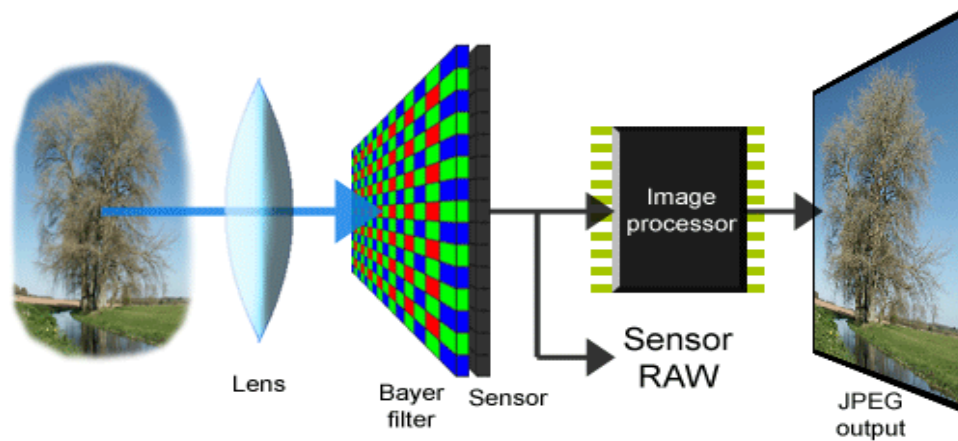
Físicamente, un sensor CMOS está compuesto por un conjunto de receptores que recogen los valores lumínicos recibidos desde el exterior. Cada fotoreceptor recibe un nivel de intensidad lumínica y lo almacena para ser enviado al procesador de la cámara. El nivel de intensidad que cada receptor registra depende de los factores que están presente en cada fotografía (características de reflexión de luz de la toma fotográfica, apertura del diafragma, estructura de los elementos intermedios como los objetivos, etc.). Cuando se han recogido todos los datos son enviados, ya en formato digital, al procesador a través del circuito electrónico que recorre todo el chip [21].

### **Funcionamiento del sensor CMOS:**

El método utilizado para la obtención de los colores de cada punto de la toma fotográfica es el denominado uso del Filtro de Bayer. Como se aprecia en la figura 7, cada celda fotoreceptora del sensor fotográfico es recubierta de una malla de filtros con los tres colores básicos: Rojo, Verde, Azul.

El fotoreceptor recibirá diferentes intensidades de colores (rojo, azul y verde) en función de la onda luminosa que reciba, esta información será enviada al procesador de imagen junto con la propia intensidad luminosa y los datos de la celda, y se conformará un pixel con una intensidad luminosa y con un color derivado determinado, de tal manera que la unión de todos los pixeles junto con su información de intensidad luminosa y de color, conformen la imagen correcta que se acaba de fotografiar [21].

**Figura 7. Funcionamiento del sensor CMOS – Filtro Bayer. [21]**



Para la captura de imágenes del frente de onda, son indispensables tres (3) cámaras EO-1312 CMOS Color Lite Edition USB, colocadas en una determinada posición para la caracterización y posterior adquisición de las imágenes.

Las especificaciones acerca del funcionamiento y características de este sensor se muestran en la tabla 23 del anexo A. Con el fin de obtener una óptima adquisición de imágenes.

**2.4.1.2 Sensores de Temperatura** Estos elementos se utilizan en todo tipo de proceso que requiera indicación y/o control de la variable temperatura, entre los sensores más empleados para medir esta variable con instrumentación electrónica se tienen: RTDs, termistores, sensores de circuitos integrados (IC) y termocuplas; en la práctica se utilizaron los sensores de circuitos integrados (IC), debido a su economía, a su linealidad, rendimiento y a su fácil interface.

#### **Sensores de circuitos integrados (IC):**

Los sensores de circuito integrado se fundamentan en la característica de la unión p-n de los semiconductores. Están formados por circuitos integrados sobre un chip, el cual presenta una salida lineal y proporcional a la temperatura. Se consiguen sensores IC que presentan salidas en voltaje analógico y en forma digital. Por estar hechos a base de silicio, su rango de temperatura está limitado aproximadamente a los 150 °C [23].

En la práctica se utilizaron cuatros (4) LM35 (Ver Figura 84 del Anexo A), los cuales midieron la temperatura superficial y la temperatura del aire en un turbulador y en un paralelepípedo de vidrio respectivamente, en la Tabla 24 del Anexo A se muestran las características y especificaciones de éste sensor.

**2.4.2 Herramientas de adquisición** Para la adquisición fueron necesarios diversos equipos de cómputo que obtuvieran cada uno, las imágenes de las tres cámaras, una plataforma de hardware de código abierto (Arduino Mega 2560) que controló y midió la temperatura en el medio y un sistema de programación y cálculo (Matlab ®) que obtuvo la información de las cámaras CMOS, de esta manera la adquisición se llevó a medios digitales para poder utilizar el procesamiento de señales en una y dos dimensiones.

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

**2.4.3 Procesamiento digital de Imágenes** El procesamiento digital de imágenes es el conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes digitales con el objetivo de mejorar la calidad o facilitar la búsqueda de información [30].

Una imagen puede ser definida como una función en dos dimensiones  $f(x, y)$ , donde  $x$  y  $y$  denotan las coordenadas espaciales, la cual se asocia a una matriz, y la amplitud de  $f$  es llamada intensidad o nivel de gris de la imagen en ese punto dentro de la matriz. Cuando las coordenadas  $x, y$  y los valores de intensidad de  $f$  son finitos, todos los valores discretos de la imagen reciben el nombre de imagen digital [28]. Una imagen RGB, es un arreglo de tres matrices que contienen la información espacial e intensidad de los colores básicos, rojo, verde y azul; los cuales al superponerse, crean la imagen digital a color.

**2.4.3.1 Proceso de filtrado** Es el conjunto de técnicas englobadas dentro del pre-procesamiento de imágenes cuyo objetivo fundamental es obtener, a partir de una imagen origen, otra final cuyo resultado sea más adecuado para una aplicación específica mejorando ciertas características de la misma que posibilite efectuar operaciones del procesado sobre ella [28] (Ver figura 8).

Los principales objetivos que se persiguen con la aplicación de filtros son:

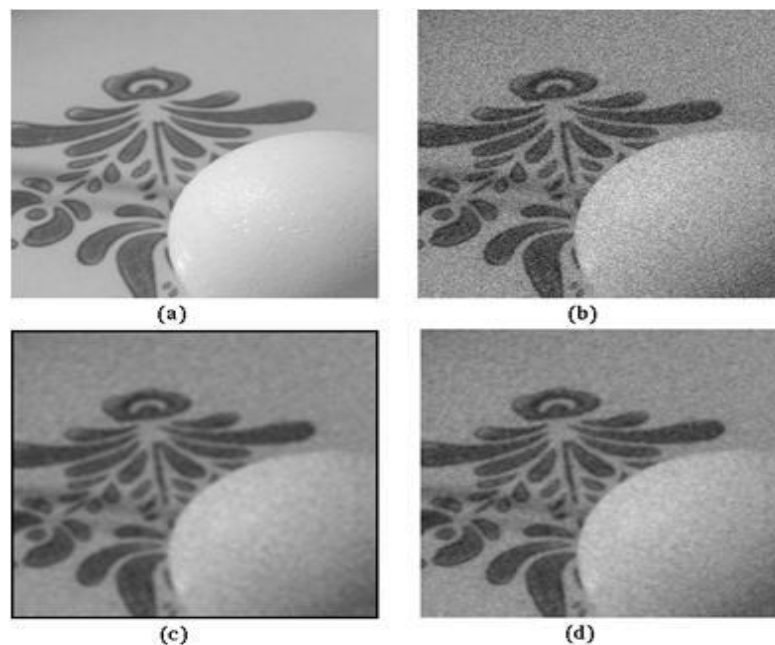
**Suavizar la imagen:** Reducir la cantidad de variaciones de intensidad entre píxeles vecinos.

**Eliminar ruido:** Eliminar aquellos píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos y cuyo origen puede estar tanto en el proceso de adquisición de la imagen como en el de su transmisión.

**Realzar bordes:** Destacar los bordes que se localizan en una imagen.

**Detectar bordes:** Detectar los píxeles donde se produce un cambio brusco en la función intensidad.

**Figura 8. Ejemplo de filtrado de una imagen. a) Suavizar la imagen, b) Eliminar ruido, c) Realizar bordes, d) Detectar bordes. [28]**



**2.4.3.2 Filtrado en el dominio de la frecuencia** Los filtros de frecuencia procesan una imagen trabajando sobre el dominio de la frecuencia en la Transformada de Fourier de la imagen [29]. Para ello, ésta aprovecha la propiedad de la convolución correspondiente así:

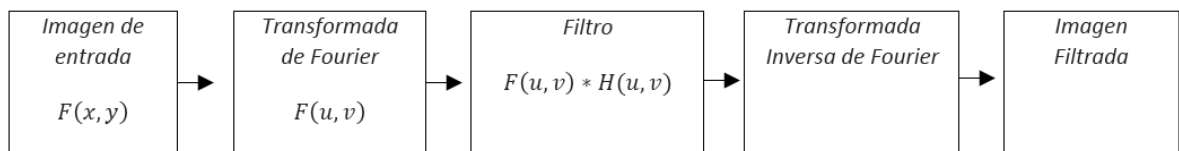
1. Se aplica la Transformada de Fourier
2. Se multiplica posteriormente por la función del filtro que ha sido escogido,
3. Para concluir re-transformándola al dominio espacial empleando la Transformada Inversa de Fourier.

**Teorema de la convolución (frecuencia):**  $G(u, v) = F(u, v)H(u, v)$

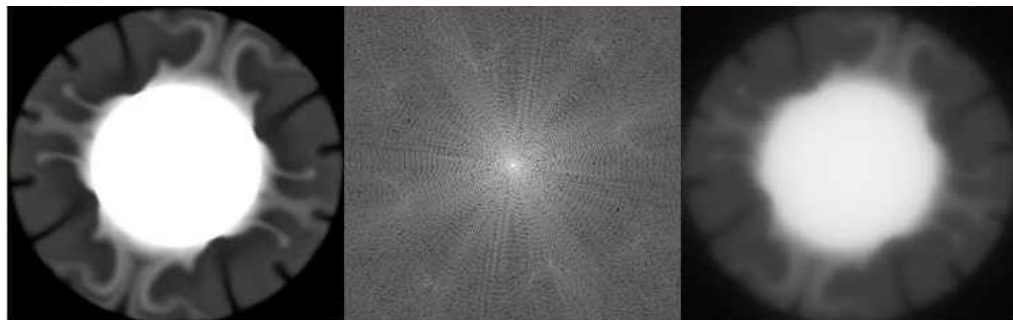
$F(u, v)$ : Transformada de Fourier de la imagen.

$H(u, v)$ : Filtro Atenuador de frecuencias.

**Figura 9. Etapas del procesamiento de imágenes en el dominio de la frecuencia. [29]**



**Figura 10. Ejemplo de filtrado en el dominio de la frecuencia. [29].**



**2.4.3.3 Filtrado en el dominio espacial** Las operaciones de filtrado se llevan a cabo directamente sobre los píxeles de la imagen. En este proceso se relaciona, para todos y cada uno de los puntos de la imagen, un conjunto de píxeles próximos al píxel objetivo con la finalidad de obtener una información útil, dependiente del tipo de filtro aplicado, que permita actuar sobre el píxel concreto en que se está llevando a cabo el proceso de filtrado para, de este modo, obtener mejoras sobre la imagen y/o datos que podrían ser utilizados en futuras acciones o

procesos de trabajo sobre ella [30]. Los filtros en el dominio espacial pueden clasificarse en:

**Filtros lineales** (filtros basados en kernels o máscaras de convolución).

**Filtros no lineales.**

El concepto de kernel o núcleo de transformación se entiende como una matriz de coeficientes donde el entorno del punto  $(x, y)$  que se considera en la imagen para obtener  $g(x, y)$  está determinado por el tamaño y forma del “kernel” seleccionado.

Para realizar un filtrado en el dominio espacial se realiza una convolución (barrido) del “kernel” sobre la imagen. Para ello se sigue el Teorema de Convolución en el espacio:  $G(u, v) = F(u, v)H(u, v)$

Cada píxel de la nueva imagen se obtiene mediante el sumatorio de la multiplicación del “kernel” por los píxeles contiguos:

$$g(x, y) = \sum \sum f(i, j)w(i, j)$$

Generalmente se divide sobre cierto valor constante para normalizar, valor que suele obtenerse de la suma de los valores del “kernel” empleado [30]

### **3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO**

El desarrollo del presente trabajo de grado se considera en cinco etapas:

#### **3.1. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MONTAJES EXPERIMENTALES.**

Con la finalidad de evidenciar el efecto que sufre el spot del haz láser al ser éste propagado por un medio influenciado por la atmósfera y la variable temperatura.

#### **3.2. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE VARIACIÓN Y CONTROL DE TEMPERATURA.**

Espacio donde se genera un medio turbulento fuertemente influenciado por la temperatura, a través del cual se propaga el haz láser.

#### **3.3 RETARDO, ALGORITMO DE ADQUISICIÓN Y SINCRONIZACIÓN**

1. Estudio y ejecución de un algoritmo de adquisición que capte la información pertinente del haz láser y la temperatura.
2. Sincronización de los equipos de adquisición. Los parámetros que definen la turbulencia atmosférica se consideran constantes en un lapso menor a 100 [ms], conocida como la hipótesis de atmósfera congelada [17].

### **3.4. TRATAMIENTO DE IMÁGENES.**

Con el fin de individualizar el efecto de la temperatura presente en el desplazamiento transversal del centroide del spot y su área, suprimiendo así el efecto del bandeo causado por la cavidad resonante del láser.

### **3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

Estudio de los diferentes resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas.

### **3.6 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MONTAJES EXPERIMENTALES.**

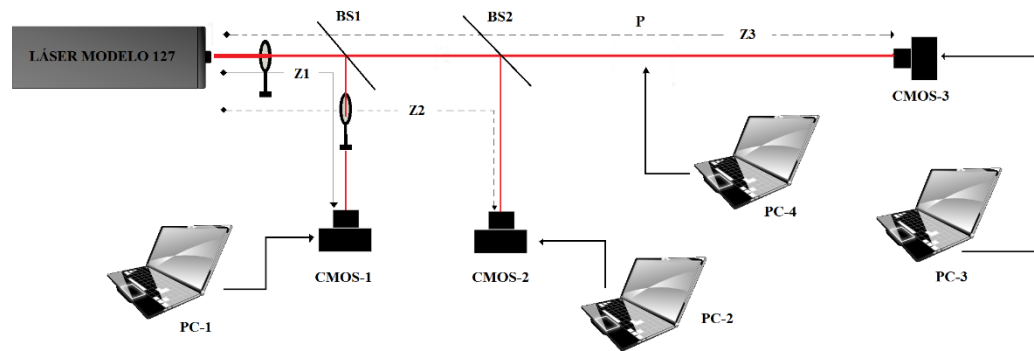
Se emplearon tres (3) cámaras CMOS además de una tarjeta de adquisición, donde las cámaras 1 y 2 están ubicadas cerca del láser con el objetivo de encontrar el efecto del bandeo. La tercera cámara registra dichos efectos propios de la cavidad resonante del láser más las desviaciones debidas a los efectos de la temperatura sobre la turbulencia atmosférica.

En el algoritmo de adquisición se captan imágenes en cada una de las cámaras y valores de temperatura en la tarjeta de desarrollo de manera sincronizada en grupos de 4000 muestras, por tal razón, cada elemento de adquisición es conectado independientemente a un computador para realizar una adquisición en paralelo sincronizado ópticamente.

En las tablas 22, 23, 24, 25 y 26 del Anexo A se muestran los resúmenes de las especificaciones de los elementos utilizados en el montaje experimental.

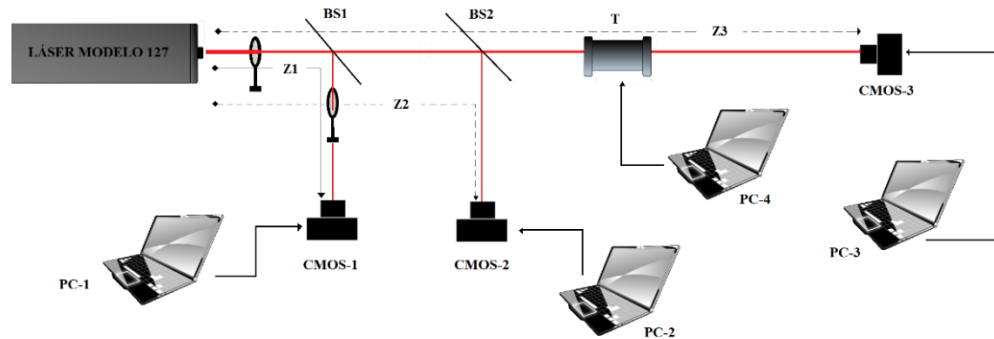
**3.6.1 Temperatura Ambiente** Inicialmente se tiene el montaje experimental de la figura 11, donde se adquirieron 4000 muestras a temperatura ambiente dentro del laboratorio de óptica del grupo (GOTS), para tener un valor base de los efectos causados por la atmósfera en la posición del centroide registrado en la cámara 3. Esta prueba sirve de comparación con las realizadas en los dos diferentes escenarios de estudio con los sistemas de variación y control de temperatura, respectivamente.

**Figura 11. Montaje Experimental de la prueba patrón.  $Z1 = 1.18$  m,  $Z2 = 1.45$  m,  $Z3 = 3.97$  m. BS: Divisor de haz. CMOS: Sensor. A: Atenuador.**



**3.6.2 Pruebas con el Turbulador** En el primer escenario de estudio, se trabajó con el “turbulador”, el cual como se observó en la sección 2.2.1, es un sistema metálico capaz de variar la temperatura en su interior para generar un medio turbulento fuertemente influenciado por un gradiente de temperatura. La figura 12 muestra el montaje experimental<sup>1</sup> usado para los diferentes casos de estudios, los cuales son presentados en la tabla 1.

**Figura 12. Montaje Experimental del caso de estudio con el turbulador. Z1 = 1.18 m, Z2= 1.45 m, Z3 = 3.97 m. BS: Divisor de haz. CMOS: Sensor. T: Turbulador. A: Atenuador.**



1

**Tabla 1. Especificaciones de la prueba echas con el Turbulador.**

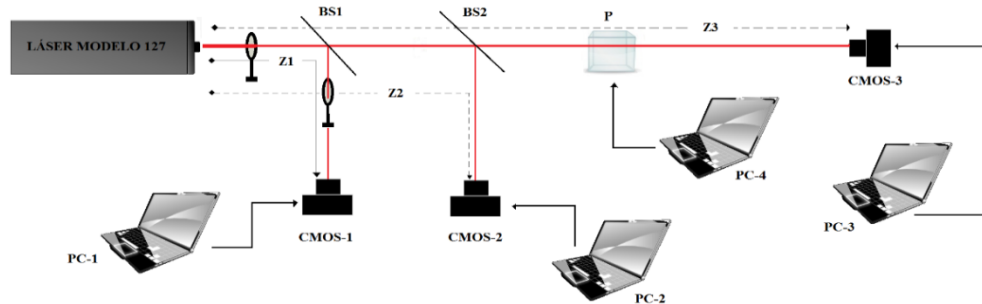
Prueba	Temperatura [°C]	Tensión de alimentación [V]	Número de muestras
1	45	30	3000
2	70	50	3000
3	105	70	3000
4	145	90	3000

**3.6.2.1 Adquisición de datos.** Para cada una de las pruebas, se adquirieron 3000 muestras del montaje experimental, alimentando el turbulador a tensiones iguales a 30 V, 50 V, 70 V, 90 V, donde la temperatura se mantiene constante en el centro del Turbulador sobre el camino óptico del haz láser, esto depende del voltaje suministrado al reóstato (véase tabla 1). Gracias a estas pruebas se observaron los efectos que tiene la temperatura sobre la posición del centroide registrado en la cámara 3.

<sup>1</sup> La distancia correspondiente de la apertura de salida del láser a la cámara 1 es de 118 cm, la 2 es de 145 cm y la 3 es de 396 cm con tiempos de exposición en las cámaras de 0,250[ms], 0,0706[ms] y 0,2[ms] respectivamente. El turbulador mide 100 cm con un diámetro interno de 7cm y un diámetro externo de 9,7cm. La distancia desde la apertura del láser hasta el turbulador es de 248 cm.

**3.6.3 Pruebas con el Paralelepípedo de Temperatura Controlada** En el segundo escenario, se utiliza el sistema cúbico de control de temperatura, el cual como se mostró en la sección 2.2.1.3, consta de un cuarto de vidrio de seis capas que incorpora una tarjeta de circuito impreso (PCB – del inglés *Print Circuit Board*), que regula la intensidad de luz en cada uno de los bombillos ubicados al costado superior del paralelepípedo, en la figura 13 se muestra el montaje experimental<sup>2</sup> implementado en los diferentes casos de estudio, los cuales son presentados en la tabla 2.

**Figura 13. Montaje experimental del caso de estudio con el paralelepípedo controlado en temperatura. Z1 = 1.18 m, Z2= 1.45 m, Z3 = 3.97 m. BS: Divisor de haz. CMOS: Sensor. P: Paralelepípedo. A: Atenuador.**



2

<sup>2</sup> La distancia correspondiente de la apertura de salida del láser a la cámara 1 es de 118 cm, la 2 es de 145 cm y la 3 es de 396 cm con tiempos de exposición en las cámaras de 0,250[ms], 0,0706[ms] y 0,2[ms] respectivamente. El paralelepípedo tiene dimensiones de 20[cm]\*20[cm]\*20[cm] construido en vidrio comercial de 6 capas. La distancia desde la apertura del láser hasta el paralelepípedo es de 236 cm, la altura del suelo al orificio donde pasa el haz es de 112 [cm].

**Tabla 2. Especificaciones de la prueba realizadas con el Paralelepípedo.**

<b>Prueba</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Tensión de alimentación [V]</b>	<b>Tensión en los bombillos [V]</b>	<b>Número de muestras</b>
<b>1</b>	45	120	30	3000
<b>2</b>	60	120	50	3000
<b>3</b>	80	120	70	3000
<b>4</b>	105	120	90	3000

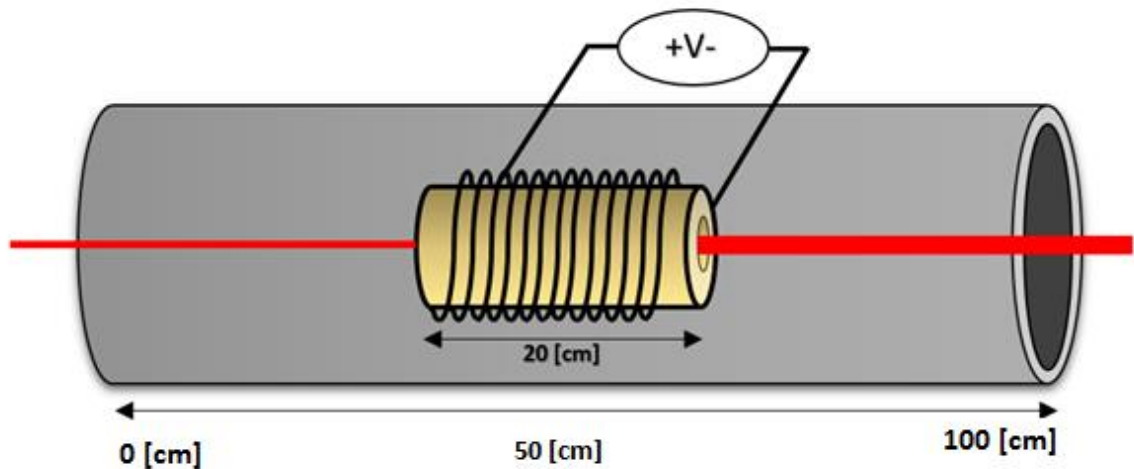
**3.6.3.1 Adquisición de datos.** Para cada una de las pruebas, se adquieren 3000 muestras alimentando el circuito de regulación de intensidad a una tensión de 120V. Al moverse el potenciómetro de 100 k $\Omega$  se varía el tiempo de carga del capacitor causando que se incremente o reduzca la diferencia de fase de la tensión de alimentación y la que se aplica a la compuerta, para las pruebas se mueve el potenciómetro de tal manera que el voltaje en los bombillos sean de 30 V, 50 V, 70 V Y 90 V, por lo que la temperatura máxima en el interior del dispositivo cambia dependiendo de dicho voltaje (ver tabla 2), la cual se presenta a una posición del sensor de 15 cm a lo largo del camino óptico del haz láser, gracias a estas pruebas se observan los efectos que tiene la temperatura sobre la posición del centroide registrado en la cámara 3.

## **3.7 DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE VARIACIÓN Y CONTROL DE TEMPERATURA.**

**3.7.1 Estructuras de variación de temperatura** Con la intención de observar el efecto causado al propagar un haz láser por un medio turbulento fuertemente influenciado por la temperatura se trabajó con dos sistemas de variación y control de temperatura en su interior. A continuación se describe cada uno de ellos.

**3.7.1.1 Turbulador** Con el objetivo de facilitar las variaciones de temperaturas, se emplea un tubo metálico de dimensiones: 1 metro de largo, 7 centímetros de diámetro interno, 7,5 centímetros de diámetro externo – (del laboratorio de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS)) como se ilustra en la figura 14 y figura 15, el cual tiene en un interior un reóstato hueco de dimensiones (20 centímetros de largo, 3 centímetros de diámetro interno, 3,5 centímetros de diámetro externo). El sistema cuenta con perforaciones diseñadas previamente para la alimentación de dicho reóstato el cual provee la temperatura al interior del sistema denominado “Turbulador”.

**Figura 14. Turbulador, ambiente controlado por temperatura (Exterior). Reóstato - Cilindro hueco (interior)**



**Figura 15. Turbulador, a) Perfil frontal, b) Perfil lateral.**



**a)**

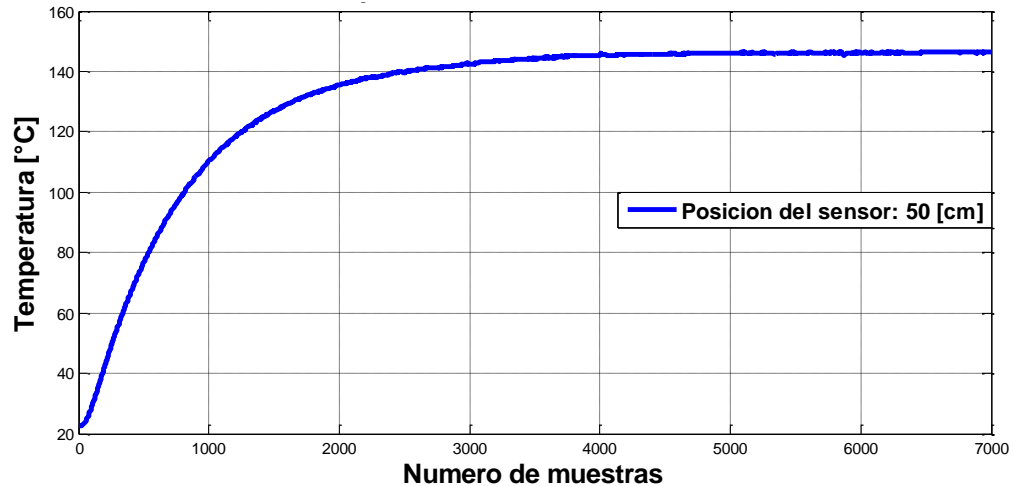


**b)**

**3.7.1.2 Caracterización del Sistema** Es fundamental conocer la distribución de temperatura dentro del turbulador, para ello es necesario medir la variación de esta variable en diferentes posiciones espaciales, por tal motivo se realizaron mediciones de temperatura en la parte baja, alta y en el centro del turbulador, variando en cada una de ellas la posición de los sensores de los extremos al punto donde se concentra mayor temperatura (centro del reóstato) en el dispositivo. Para ello se dispuso de tres sensores LM35 para su caracterización. En la tabla 24 del Anexo A, se muestran las especificaciones técnicas del sensor.

Inicialmente se realizó una prueba para evaluar la temperatura máxima al interior del sistema a una tensión de alimentación de 90V. Para ello se registraron 7000 muestras. Se determinó que la temperatura máxima al interior del turbulador es de 146 °C y se logra en un tiempo de 5000 segundos, como se aprecia en la figura 16, en cambio la temperatura en los extremos es de 32°C y se logra en un tiempo similar tasado en el número de muestras (figura 17). Las especificaciones de la prueba se muestran en la tabla 3.

**Figura 16. Curva característica de temperatura en el centro del turbulador. Posición del sensor = 50 [cm] en el centro de la sección transversal del turbulador.**



Luego, variando la posición de los sensores a la especificada en la tabla 4, se obtiene una temperatura máxima en los extremos de 34°C, en un tiempo similar tasado en el número de muestras (figura 18).

**Tabla 3. Especificaciones de la primera prueba.**

Sensor	Posición	Tensión de alimentación	Muestras
LM35 - 1	85 [cm]	90 [V]	7000
LM35 - 2	50 [cm]		
LM35 - 3	15 [cm]		

**Tabla 4. Especificaciones de la segunda prueba.**

Sensor	Posición	Tensión de alimentación	Muestras
LM35 - 1	75 [cm]	90 [V]	5000
LM35 - 2	50 [cm]		
LM35 - 3	25 [cm]		

Figura 17. Curva característica de Temperatura en los extremos del turbulador. Posición de los sensores = 15 [cm] - Rojo, 85 [cm] – Morado, en la parte inferior de la sección transversal del turbulador.

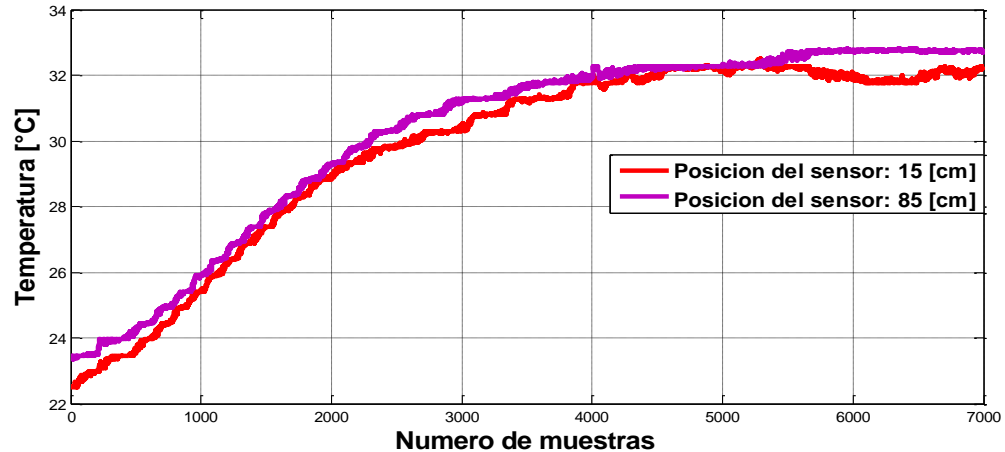
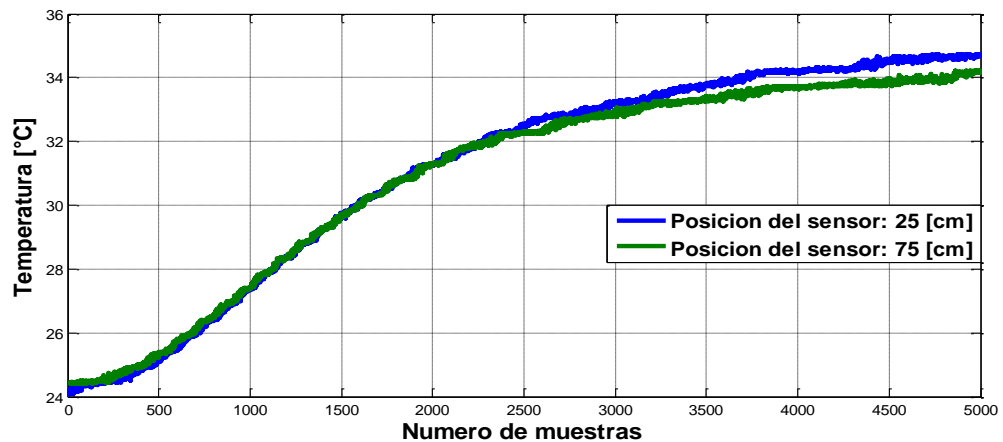


Figura 18. Curva característica de Temperatura en los extremos del turbulador. Posición de los sensores = 25 [cm] - Azul, 75 [cm] – Verde, en la parte inferior de la sección transversal del turbulador.

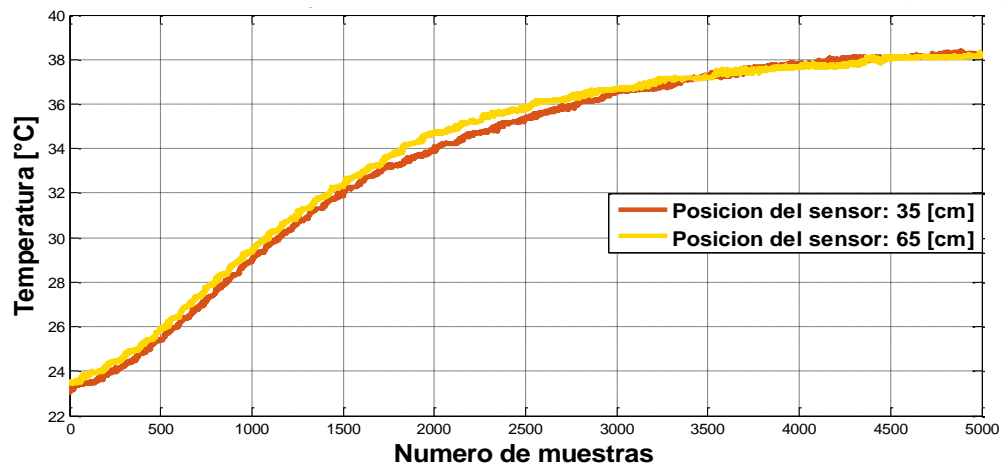


Variando la posición de los sensores a la especificada en la tabla 5, se obtiene una temperatura máxima en los extremos de 38°C, en un tiempo similar tasado en el número de muestras (figura 19).

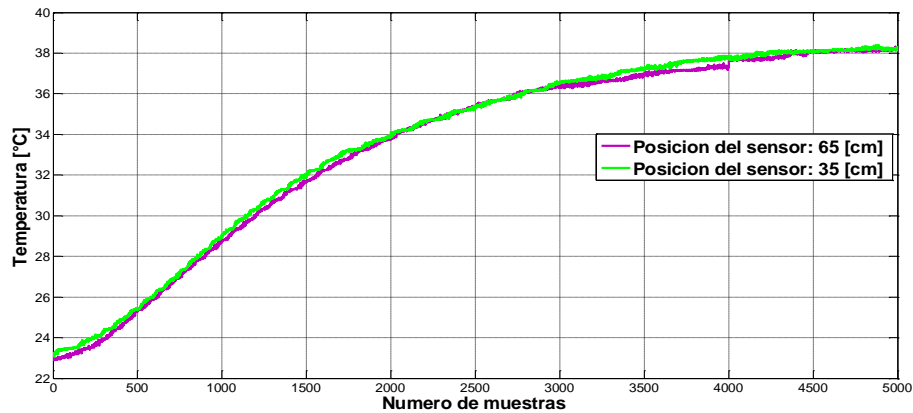
**Tabla 5. Especificaciones de la tercera prueba.**

Sensor	Posición	Tensión de alimentación	Muestras
LM35 - 1	65 [cm]	90 [V]	5000
LM35 - 2	50 [cm]		
LM35 - 3	35 [cm]		

**Figura 19 Curva característica de Temperatura en los extremos del turbulador. Posición de los sensores = 35 [cm] - Naranja, 65 [cm] - Amarillo, en la parte inferior de la sección transversal del turbulador.**

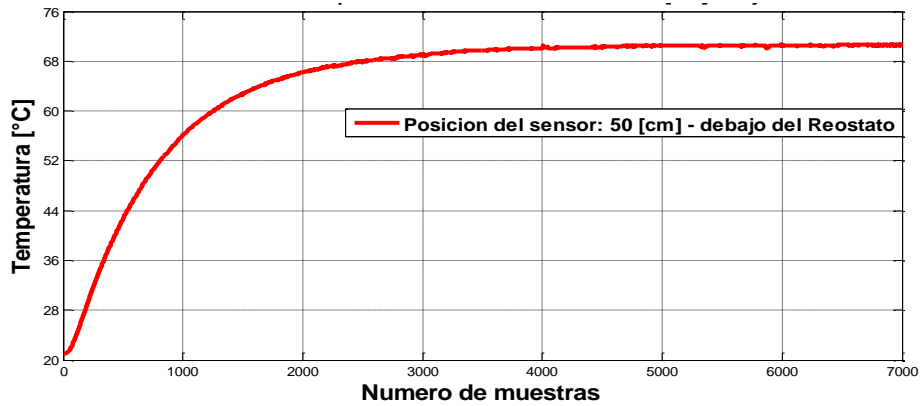


**Figura 20. Curva característica de Temperatura en los extremos del turbulador. Posición de los sensores = 35 [cm] - Naranja, 65 [cm] – Amarillo, en la parte superior de la sección transversal del turbulador.**

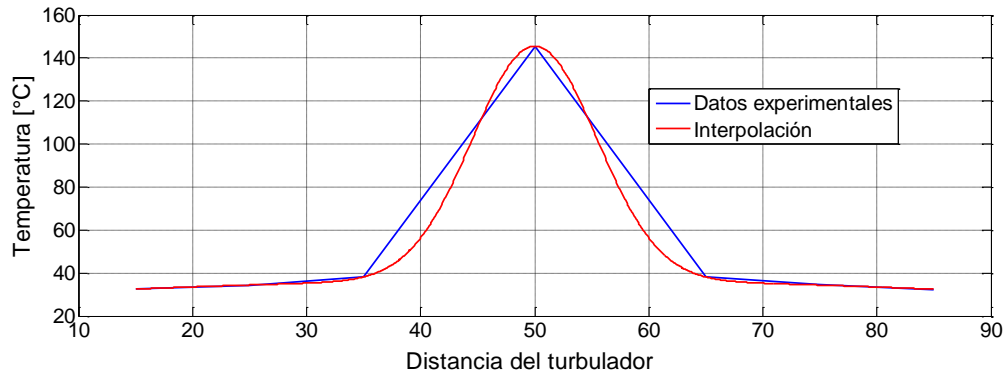


A medida que los sensores se acercan al reóstato (dispositivo que genera la temperatura en el turbulador), la temperatura que miden va aumentando, como se logra ver en las figuras 17, 18, 19. Al ser una comparación de los sensores ubicados en la parte superior del turbulador (figura 20) con los ubicados en la parte inferior (figura 19) a la misma distancia, se logra ver que la temperatura se dispersa de manera homogénea en estos puntos, pero esta va cambiando a medida que los sensores se acercan o se alejan del reóstato, caso contrario sucede cuando el sensor es ubicado en el centro del reóstato a una distancia de 50 [cm] (figura 16) y otro de igual manera se coloca a esa misma distancia pero debajo del reóstato (figura 21), claramente se observa que la temperatura en la primera situación es el doble que cuando se coloca el sensor debajo del reóstato, por lo que se concluye que la máxima concentración de energía y por ende la máxima temperatura en el turbulador se da en el centro del reóstato.

**Figura 21. Curva característica de Temperatura debajo del turbulador. Posición del sensor = 50 [cm].**



**Figura 22. Distribución de temperatura al interior del turbulador en función de la distancia del dispositivo, posición de los sensores en la parte inferior y en el centro de la sección transversal del turbulador.**



La figura 22 muestra el gradiente de distribución en el interior del turbulador, cuando éste se alimenta a una tensión de 90 [V], en ella se corrobora que la máxima temperatura en el turbulador se presenta en el centro del reóstato a una distancia de 50 [cm] del extremo del mismo. Luego de hacer una interpolación con Matlab ® se evidencio un comportamiento Gaussiano en la distribución, cuya expresión viene dada por la siguiente ecuación:

$$(a1) \left( e^{-\frac{(x-b1)^2}{c1}} \right) + (a2) \left( e^{-\frac{(x-b2)^2}{c2}} \right)$$

Donde:

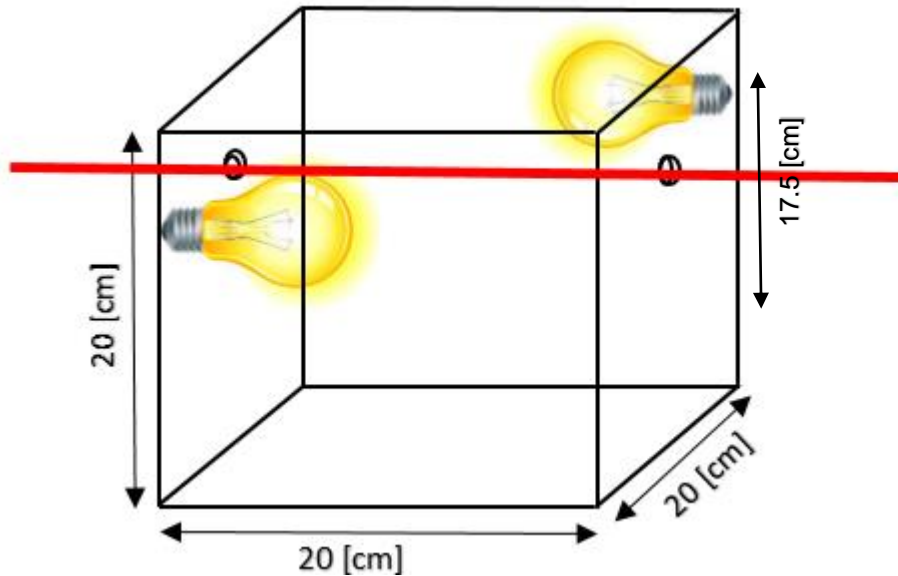
a1	b1	c1	a2	b2	c2
109	50	7.704	36.52	49.83	102.7

**Tabla 6. Datos obtenidos en la interpolación**

<b>Índice de confianza</b>	95 %
<b>Desviación</b>	1
<b>Desviación ajustada</b>	0.9999
<b>Error cuadrático medio</b>	0.4599

**3.7.1.3 Paralelepípedo Controlado** Como segundo escenario de estudio se diseñó y construyó un sistema cúbico de control de temperatura de dimensiones 20[cm] de lado. Se utilizó vidrio de seis capas para que la estructura concentrara más la temperatura. Dicho cuarto de vidrio cuenta con un orificio de 0.8 [cm] de diámetro en sus dos caras (delantera y trasera), a través de los cuales se propaga el haz láser, y está recubierto de papel oscuro en sus caras, más no en sus orificios, que garantiza que la luz en el interior del dispositivo no se propague a ninguna de las cámaras CMOS, ocasionando que alguna de ella se sature. En la figura 23, se muestra el diseño del cuarto de vidrio con los orificios.

**Figura 23. Diseño del cuarto de vidrio**



Para estudiar diferentes rangos de temperatura dentro del cuarto de vidrio, se diseñaron dos circuitos electrónicos capaces de regular la intensidad de luz en cada uno de los bombillos ubicados al costado superior del paralelepípedo, para ello fueron necesarios un Triac BT136600 empleado para controlar la potencia suministrada en la carga, un Diac para autocompletar el ritmo variado del disparo del Triac BT136600, dos capacitores de 0,22 [ $\mu\text{F}$ ] y 0,47 [ $\mu\text{F}$ ], un potenciómetro de 100 [ $\text{k}\Omega$ ] que al moverse, varia el tiempo de carga de un capacitor causando que se incremente o reduzca la diferencia de fase de la tensión de alimentación y la cual se aplica a la compuerta, una resistencia de 100 [ $\Omega$ ] y dos de 20 [ $\text{k}\Omega$ ], dos diodos 1N4006, que permiten que la corriente circule en un sólo sentido, los bombillos utilizados para el calentamiento interno del dispositivo eran de 120V a 75W (véase figura 25 el diagrama esquemático).

En la figura 24 se aprecia el circuito impreso el cual regula la intensidad de luz generada por la bombilla.

Figura 24. Circuito Impreso – Regulador de intensidad de luz

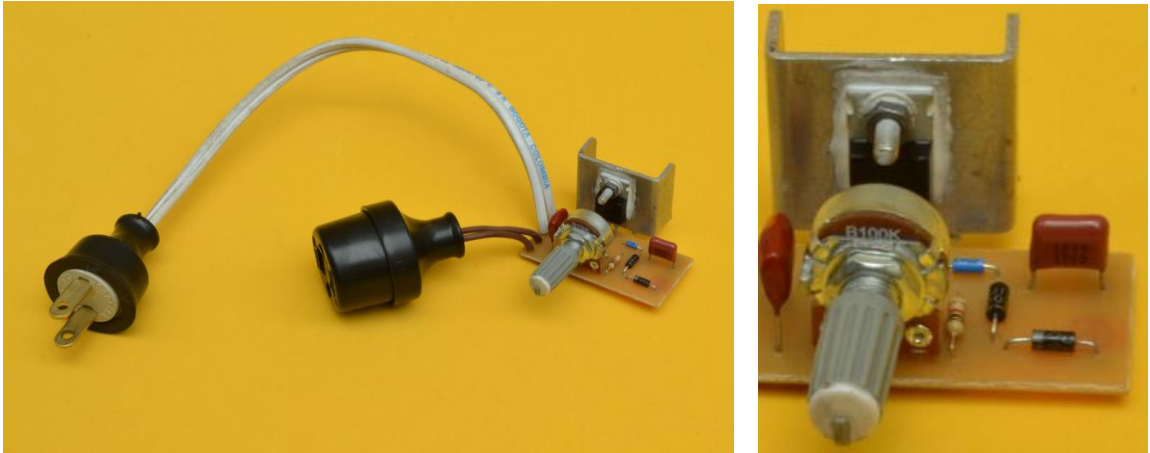
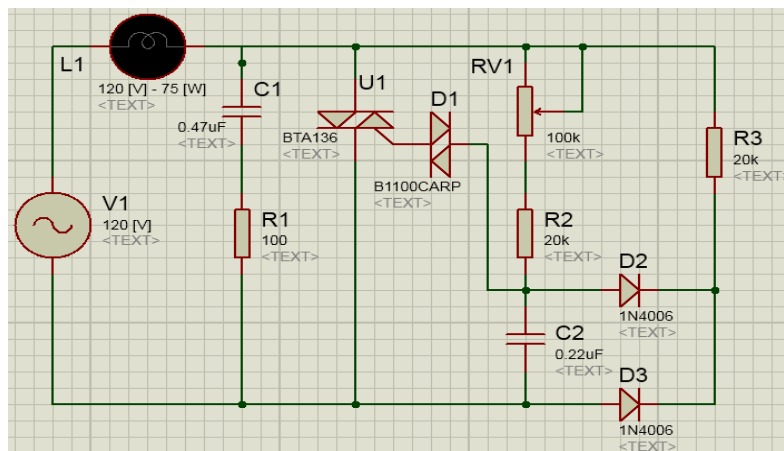
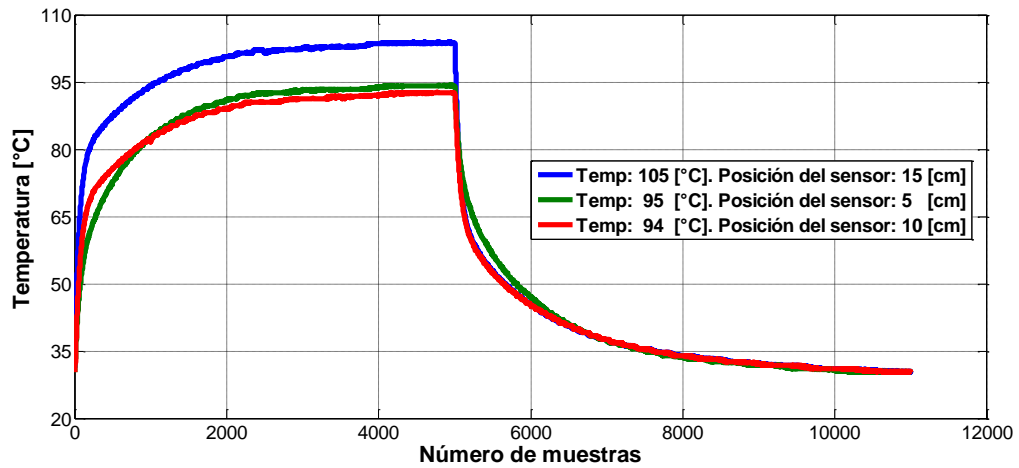


Figura 25. Diagrama esquemático del regulador de intensidad de luz



**3.7.1.4 Caracterización del Sistema** Es importante conocer la distribución de temperatura al interior del cuarto de vidrio en diferentes posiciones espaciales, inicialmente se realizaron pruebas con los sensores ubicados a una altura de 17 cm el cual será prácticamente el camino óptico seguido por el láser, para ello se dispuso de tres (3) sensores LM35 para su caracterización.

**Figura 26. Curva característica de Temperatura vs Tiempo. Posición de los sensores sobre el camino óptico del haz láser.**



En la figura 26, se evidencia que la temperatura máxima presente en el paralelepípedo de vidrio fue de 105°C en una referencia de 15 cm del sensor sobre el camino óptico del haz, a una tensión de alimentación de 90V, esto ocurre en un tiempo igual a 4000 muestras (equivalente a 4000 segundos). Al ser el paralelepípedo de vidrio un dispositivo no totalmente homogéneo y que emite luz a través de los bombillos ubicados en la parte de la esquina superior de la cara delantera y trasera de la caja, ocurrirá que los sensores ubicados en los extremos (cercanos a la fuente de calor) medirán temperaturas más altas que el ubicado en el centro, caso contrario ocurría en el turbulador, en donde en el centro se presentaba una mayor concentración de temperatura. En la tabla 7 se evidencia los detalles de esta prueba.

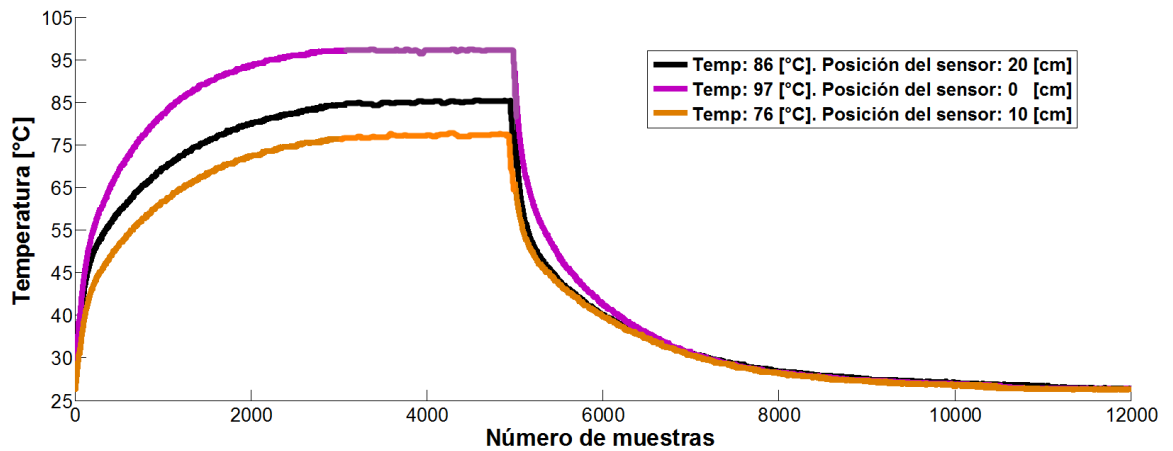
**Tabla 7. Especificaciones de la prueba**

Sensor	Posición	Tensión de alimentación	Muestras
LM35 - 1	5 [cm]	90 [V]	11000
LM35 - 2	10 [cm]		
LM35 - 3	15 [cm]		

**Tabla 8. Especificaciones de la segunda prueba**

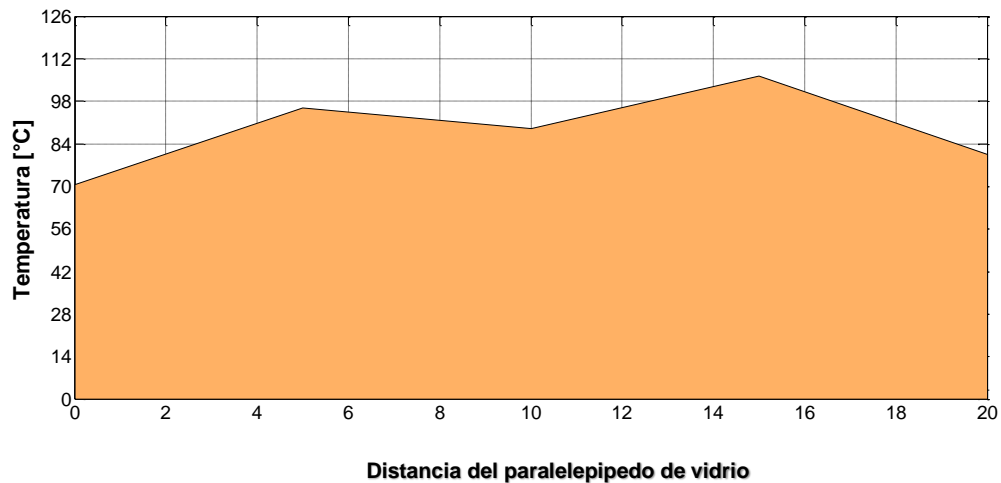
Sensor	Posición	Tensión de alimentación	Muestras
LM35 - 1	0 [cm]	90 [V]	12000
LM35 - 2	10 [cm]		
LM35 - 3	20 [cm]		

**Figura 27. Curva característica de Temperatura. Posición de los sensores sobre el camino óptico del haz láser.**



En la tabla 8 se evidencian los detalles de la prueba reflejada en la figura 27.

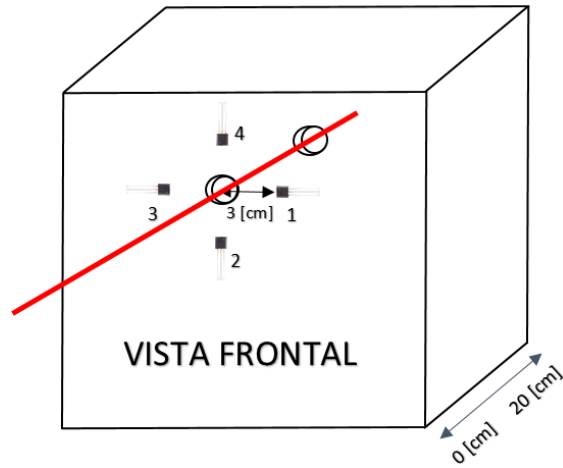
**Figura 28. Distribución de temperatura al interior del Paralelepípedo de vidrio, en función de la distancia del dispositivo.**



Las primeras dos pruebas determinaron el gradiente espacial de distribución de temperatura al interior del paralelepípedo (Figura 28) cuando el sistema aumenta su temperatura hasta su valor máximo y posteriormente disminuye de forma natural (en el tiempo) al apagar las bombillas de 75W, en ella se corrobora que la máxima temperatura en el interior del paralelepípedo se presenta en los extremos del dispositivo, en especial a una distancia de 5 y 15 cm respectivamente (cercanos a la fuente como se espera).

Luego se procedió a caracterizar el sistema con cuatro (4) sensores de temperatura LM35 en diferentes posiciones a un radio de 3 cm sobre el camino óptico del láser, a una distancia de 0 cm en el eje z (figura 29) se obtuvieron las siguientes curvas de temperatura (ver figura 30).

**Figura 29. Ubicación y enumeración de los sensores cara frontal del paralelepípedo de vidrio.**



El sensor 1 de la figura 29 registró una temperatura igual a 95°C en el interior del paralelepípedo de vidrio a una distancia de 0 cm sobre la cara frontal del paralelepípedo en el eje z a un radio de 3 cm sobre el camino óptico del haz (figura 30), Para ésta distancia esa fue la máxima temperatura registrada.

**Figura 30. Curva característica de Temperatura vs Tiempo. Posición de los sensores a un radio de 3 [cm] sobre el camino óptico del haz láser, a una posición de 0 [cm] en el eje z.**

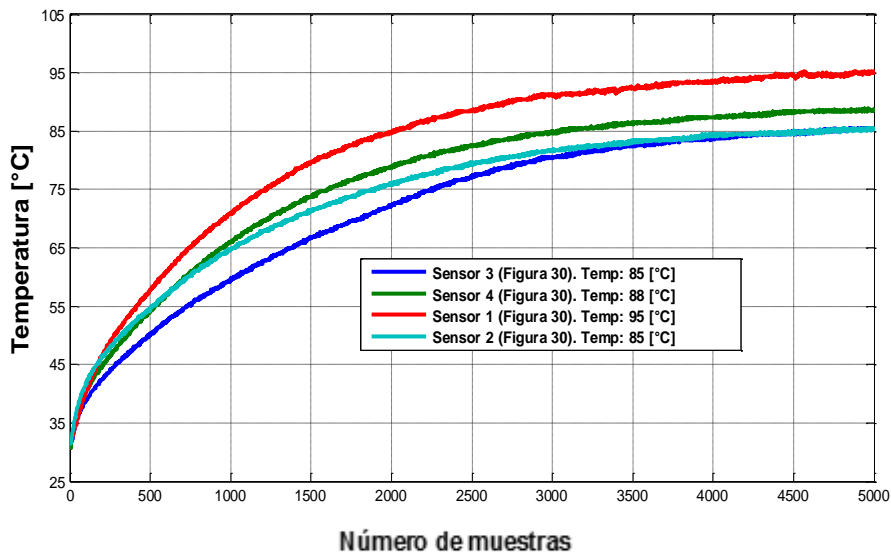


Figura 31. Curva característica de Temperatura vs Tiempo. Posición de los sensores a un radio de 3 [cm] sobre el camino óptico del haz láser, a una posición de 5 [cm] en el eje z.

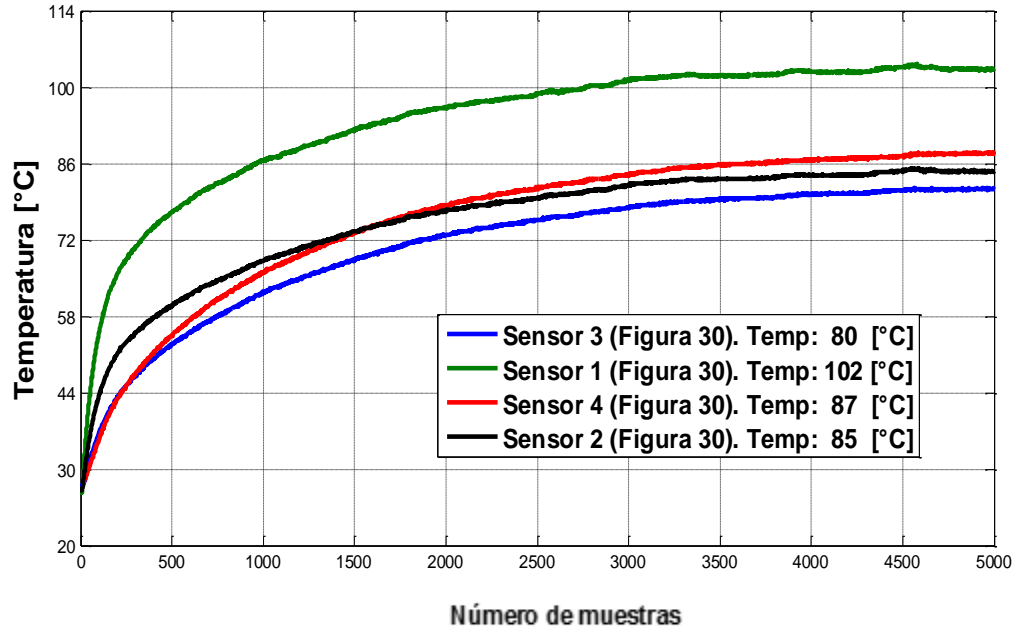


Figura 32. Curva característica de Temperatura vs Tiempo. Posición de los sensores a un radio de 3 [cm] sobre el camino óptico del haz láser, a una posición de 10 [cm] en el eje z.

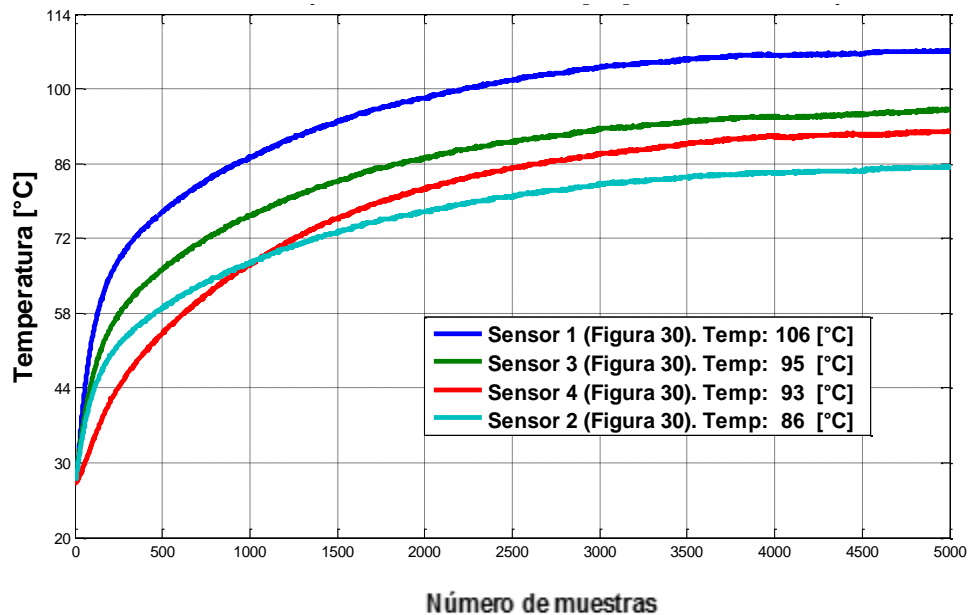


Figura 33. Curva característica de Temperatura vs Tiempo. Posición de los sensores a un radio de 3 [cm] sobre el camino óptico del haz láser, a una posición de 15 [cm] en el eje z.

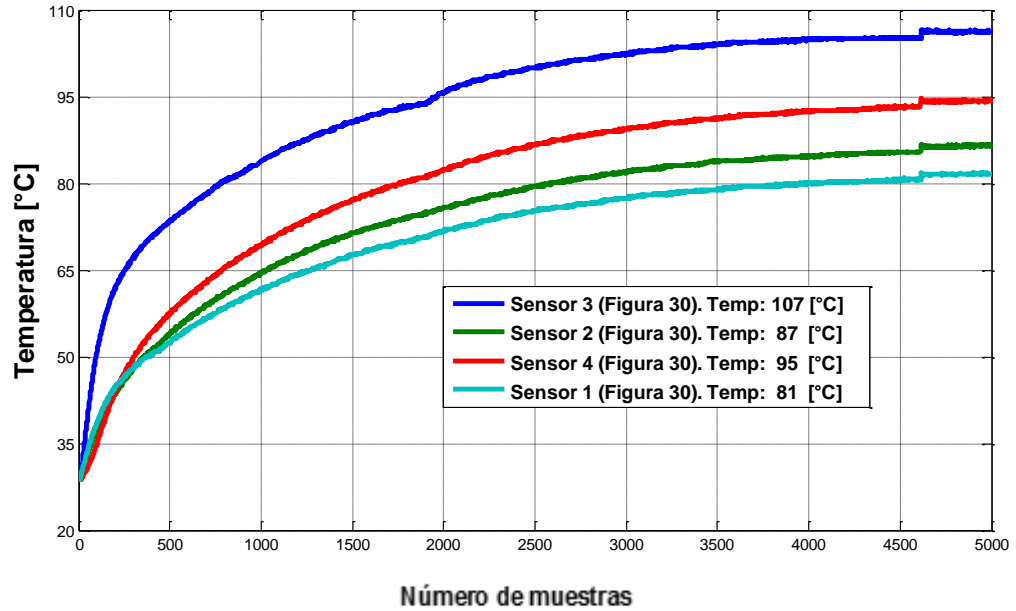
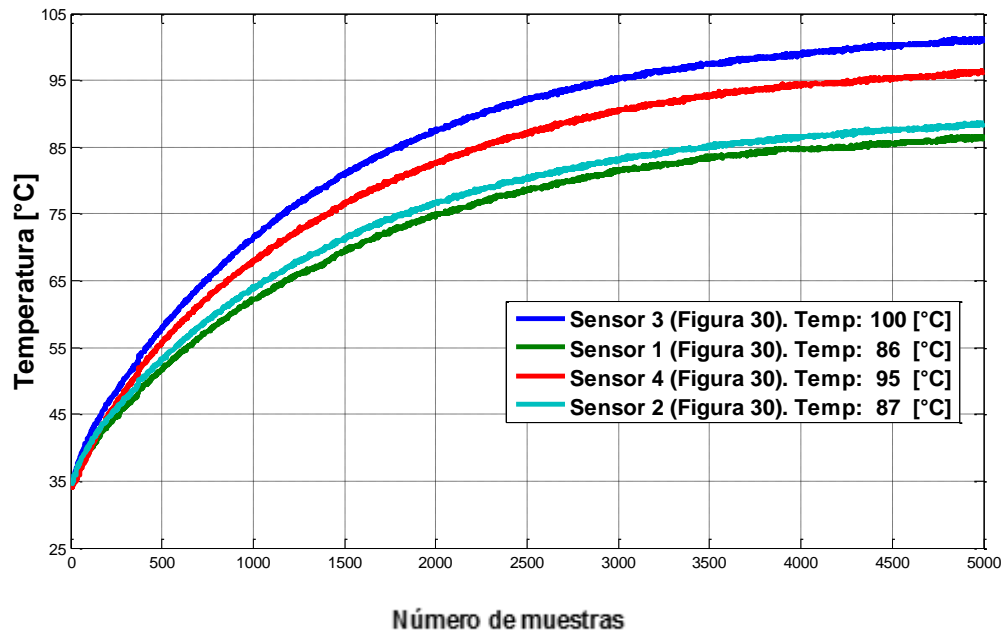


Figura 34. Curva característica de Temperatura vs Tiempo. Posición de los sensores a un radio de 3 [cm] sobre el camino óptico del haz laser, a una posición de 20 [cm] en el eje z.



Cabe resaltar que antes de realizar las caracterizaciones en ambas situaciones, se constató la exactitud de los resultados realizando una calibración con un medidor de temperatura Fluke para termocuplas tipo K.

Para la ejecución de la calibración de los sensores se requirió trabajar en un ambiente cerrado en el salón 202 del edificio de Alta Tensión.

Toma de datos:

1. Con el fin de alcanzar una temperatura alta  $120^{\circ}\text{C}$  se calentó un reóstato hueco a una tensión de alimentación igual a 90V.
2. La temperatura con la que se comenzó a tomar los datos fue de  $30\text{ [}^{\circ}\text{C]}$
3. Se empezó a tomar datos cada diez segundos con el medidor de temperatura FLUKE para termocuplas tipo K y el sensor LM35 durante una hora y media, hasta llegar a la temperatura deseada.

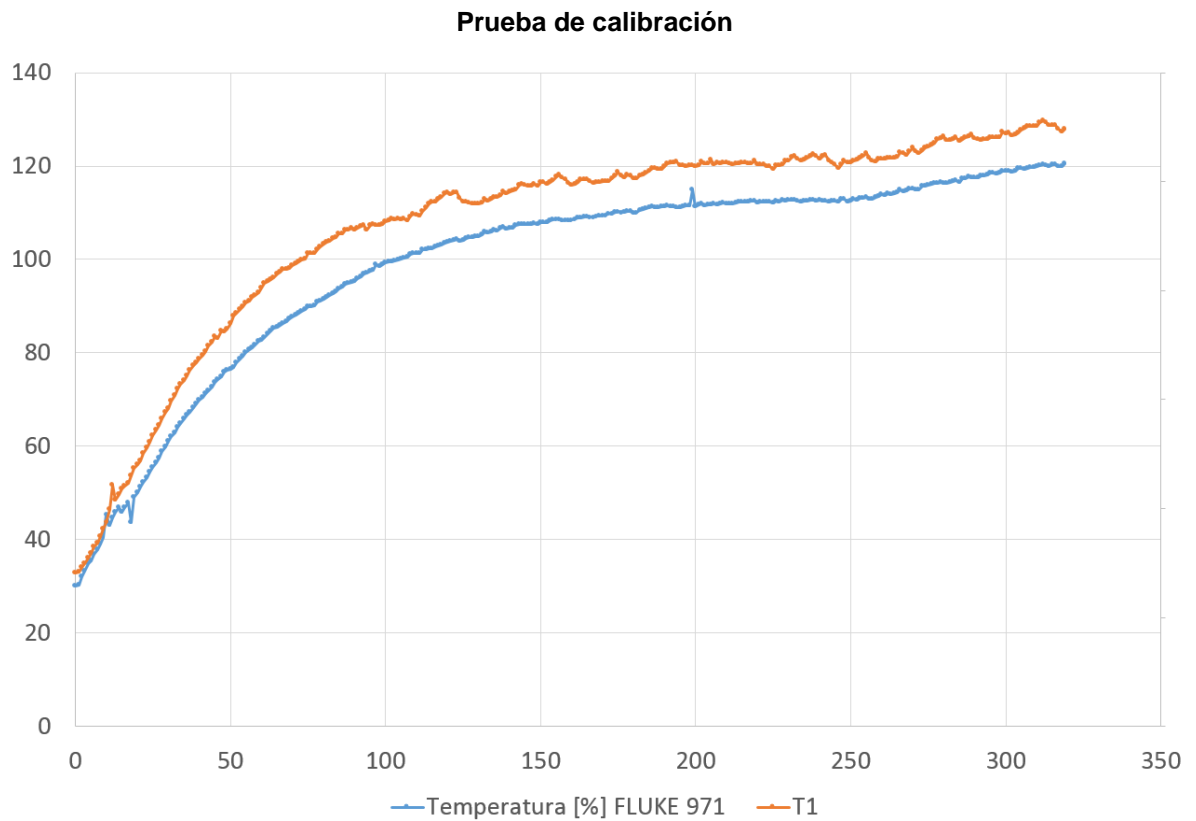
Datos adquiridos con el medidor de temperatura Fluke:

Muestras	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]	30	30.2	32	33.2	34.9	35.5	36.9	37.9	39	40.5

En este caso se muestran solo diez muestras como ejemplo ilustrativo, pero realmente fueron trescientos veinte datos que se adquirieron durante una hora y media de los cuales se utilizaron para la caracterización de cada sensor.

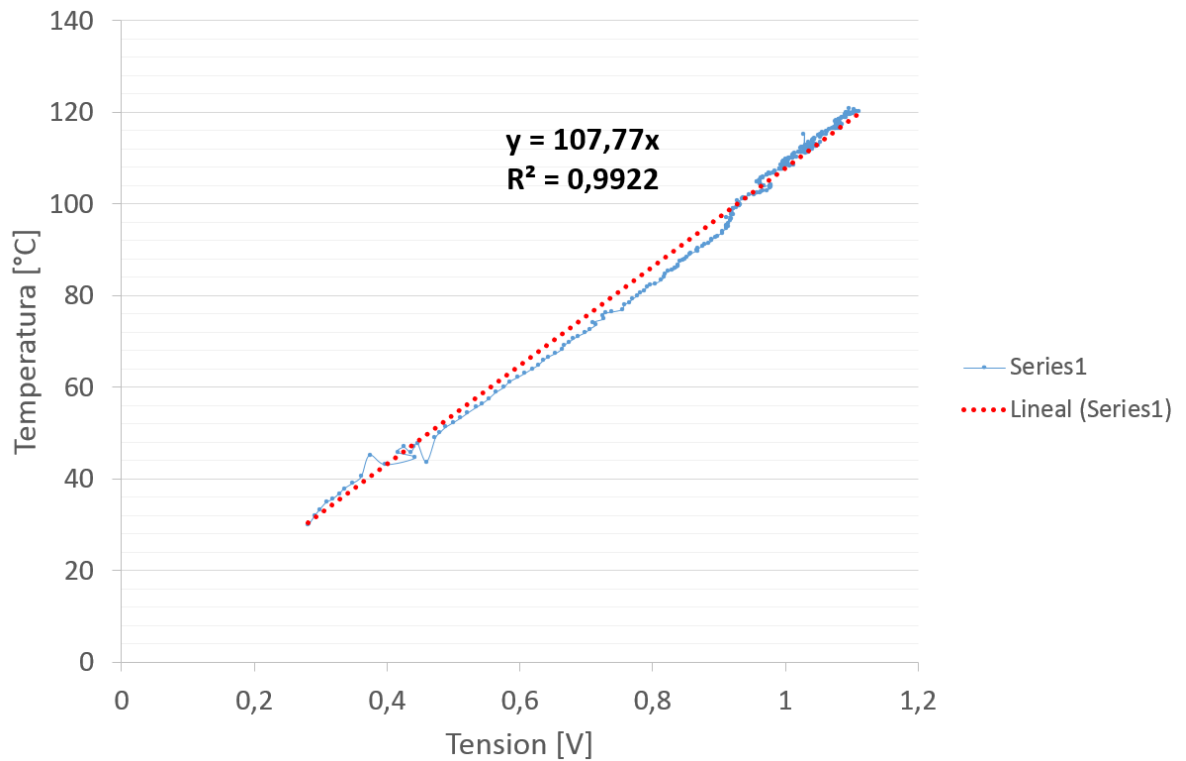
Estos datos se tomaron manualmente:

**Figura 35. Diagrama de calibración. Medidor de temperatura Fluke (naranja) - Sensor (azul).**



Luego de haber adquirido los datos se relacionaron los valores obtenidos por el medidor de temperatura junto con los datos del sensor. En la figura 36 se muestra el gráfico de temperatura que mostraba el medidor de temperatura contra la tensión que suministraba el sensor de temperatura, de esta manera se procedió a linealizar con la intención de hallar la pendiente y su desviación máxima.

**Figura 36. Gráfica del sensor T1 de temperatura contra Tensión.**

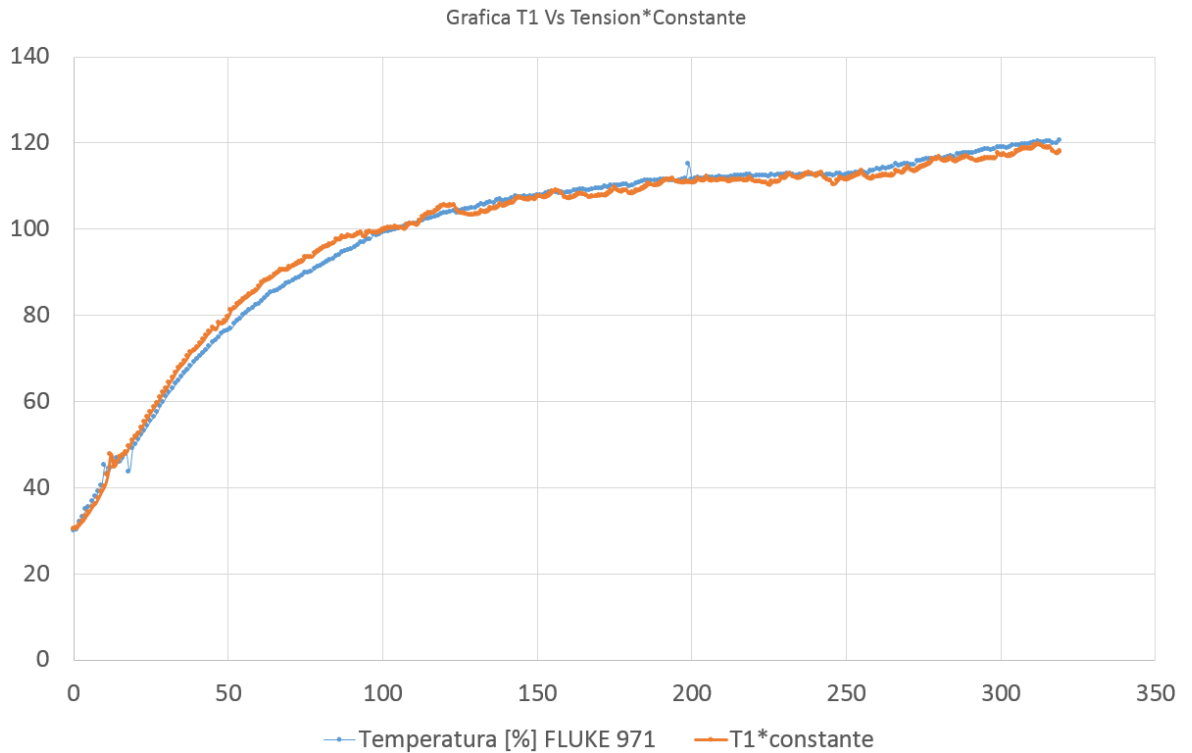


**Tabla 9. Valor de la pendiente obtenida – Valor de la desviación máxima.**

<b>Valor de la pendiente</b>	107,77
<b>Desviación máxima</b>	0,9922

Con la constante obtenida y la tensión suministrada por el sensor, se compararon con los valores del medidor de temperatura Fluke y los datos calibrados (figura 37).

**Figura 37. Datos del medidor FLUKE contra valores calibrados del sensor**  
**Calibración corregida**



De igual manera se repitió el mismo procedimiento con los tres sensores restantes, en la tabla 10 se muestran los valores de las constantes y desviación máxima respectiva.

**Tabla 10. Constantes y desviación máxima para la caracterización de los cuatro (4) sensores de temperatura.**

	Constante	Desviación
T1	107,77	5,861092
T2	117,902	6,802694
T3	112,626	7,759668
T4	114,449	6,548236

### 3.8 RETARDOS, ALGORITMO DE ADQUISICIÓN Y SINCRONIZACIÓN.

#### Retardos

Un retardo es el intervalo de tiempo que existe en el momento en el que cualquier punto asignado en una onda atraviesa dos puntos cualesquiera de un circuito de transmisión, mientras que una sincronización describe el ajuste temporal de eventos, cuando determinados fenómenos ocurran en un orden predefinido o a la vez.

**3.8.1. Retardo en los sistemas de cómputo.** Los retardos que existen de un computador a otro dependen de varios factores y el principal de ellos es la diferencia de procesadores, en el caso de Intel este tiene un número de jerarquía (i3, i5 e i7), donde el mayor significa más potencia, más núcleos y la presencia de SMT (Surface-mount technology) [32]. Aunque este sea el principal problema, el retardo también depende de cuáles serán las funciones que realizará cada computadora, en nuestro caso MATLAB™ es el programa que se utilizó para la adquisición y procesamiento de imágenes en cada uno de los computadores, por tal motivo se necesitará mantener una buena velocidad mediante un equipo de cómputo que tenga una memoria RAM mayor a 4 [GB]. De esta manera se utilizaron los equipos de cómputo que se muestran en la tabla 26 del Anexo A, los cuales cumplen con estos requisitos.

**3.8.2. Retado en el enrutamiento ARDUINO – MATLAB™.** La ejecución de una sentencia en el lenguaje Arduino está dada por el número de ciclos de reloj correspondiente a cada instrucción, conociendo la frecuencia del reloj utilizado es posible saber el tiempo que demora cada instrucción en ejecutarse. En MATLAB™ la eficiencia de un algoritmo se puede medir a través del número de operaciones (flops). Para conocer el tiempo de ejecución de un algoritmo se contó con el

comando tic y toc que permiten calcular el tiempo de la ejecución de un programa para identificar tiempos críticos y visualizar mejoras en el desempeño.

Al controlar el microcontrolador a través de MATLAB™ se tienen ciertas ventajas, pues gracias a éste software de programación podemos controlar el retardo y el periodo de cada una de las muestras adquiridas por el ordenador, de esta manera se garantiza una sincronización en todo el sistema.

El tiempo de ejecución en el enrutamiento fue de aproximadamente 20 [ms], pero este tiempo se puede modificar a gusto o conveniencia, incluso fijarlo en 0 en otro tipo de rutinas, dependiendo del periodo o el retardo al cual se le dé a cada ordenador.

**3.8.3. Retado en el enrutamiento MATLAB™ – Cámaras CMOS.** Una de las ventajas que tienen las cámaras CMOS con respecto a las CCD se evidencia en la velocidad con la que se captura la imagen, las CMOS son bastantes superiores a las CCD, debido a que muchas funciones, como la propia conversión analógico-digital son realizadas en el propio sensor.

Debido a las diferentes características de los computadores utilizados para la adquisición de imágenes en cada cámara (Ver tabla 11), la velocidad de captura en el enrutamiento de MATLAB™ – Cámaras CMOS fueron:

**Tabla 11. Retardo en el enrutamiento MATLAB – Cámaras CMOS**

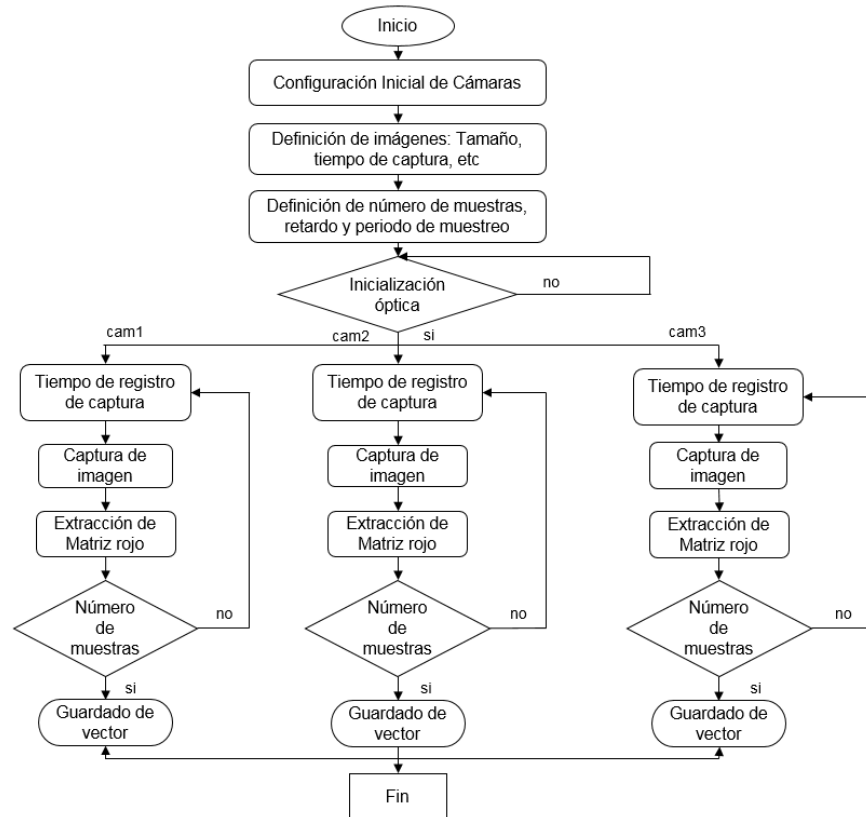
<b>Retado en el enrutamiento MATLAB™ – Cámaras CMOS.</b>	
<b>Equipo</b>	<b>Retardos [ms]</b>
Equipo 1 - cámara 1	8.1
Equipo 2 - cámara 2	21
Equipo 3 - cámara 3	7.3

**3.8.4. Estudio del algoritmo de adquisición** Se adquirieron sincrónicamente tres imágenes para cada una de las cámaras CMOS del montaje experimental (figura 12, figura 13). Para lograr la sincronía en las imágenes y asegurar un retardo máximo menor a 100 [ms] en grupos de 3000 muestras, se hizo uso de cuatros (4) computadores, tres de los cuales fueron empleados para la adquisición de las imágenes y el cuarto para la toma de datos de temperatura por medio de una tarjeta electrónica de desarrollo. Las especificaciones del equipo de cómputo utilizado en la adquisición de datos se muestran en la tabla 26 del Anexo A. En el algoritmo desarrollado se especifica la inicialización de la adquisición mediante una sincronización óptica y estableciendo los parámetros de configuración inicial de cada una de las cámaras. Por medio del temporizador del software empleado se realizaron interrupciones periódicas del algoritmo en un periodo establecido previamente (Ver Anexo B).

En la *figura 38* se muestra el diagrama de bloques del algoritmo de adquisición empleado en el montaje experimental, donde el resultado final son tres (3) vectores que registran el tiempo de captura, el tiempo de cómputo del algoritmo y el vector que contiene la información de la imagen capturada por la cámara.

Para la medición de temperatura se usó la tarjeta de desarrollo ARDUINO ATMEGA 2560 (4.8 mv/bit – 5V – 10bit – 9600 muestras por segundo). En la tabla 25 del Anexo A, se muestran sus especificaciones técnicas.

**Figura 38. Diagrama de flujo del código de adquisición.**



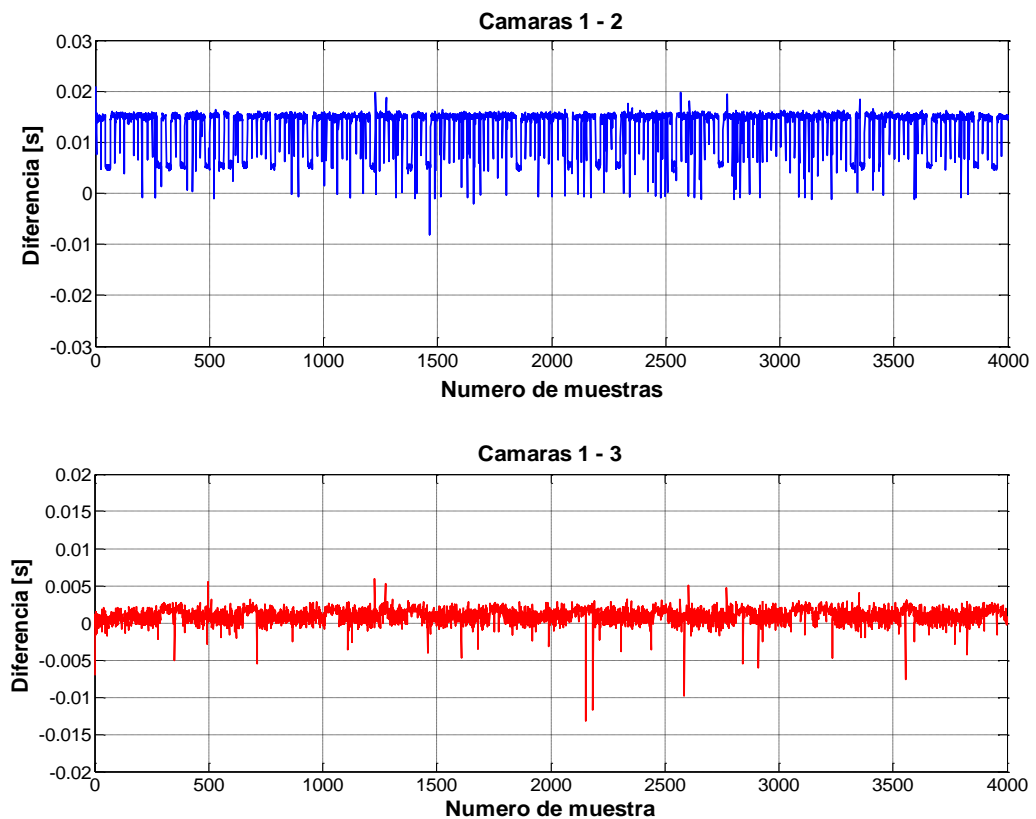
Para capturar los datos de sensado de temperatura mediante la tarjeta de desarrollo en Matlab ®, fue necesario hacer un enrutamiento entre la misma y el software de programación en la cuarta computadora. Para iniciar la captura de muestras sincronizadas ópticamente con las tres (3) cámaras CMOS y la tarjeta de desarrollo, fue necesario realizar un circuito externo con una fotorresistencia (figura 39), definiendo un umbral de intensidad de luz para iniciar la adquisición. El circuito empleado, junto con los tres (3) sensores LM35 conectados a la tarjeta de adquisición es presentado en la figura 39. El algoritmo empleado para la adquisición mediante el software es presentado en el Anexo C.

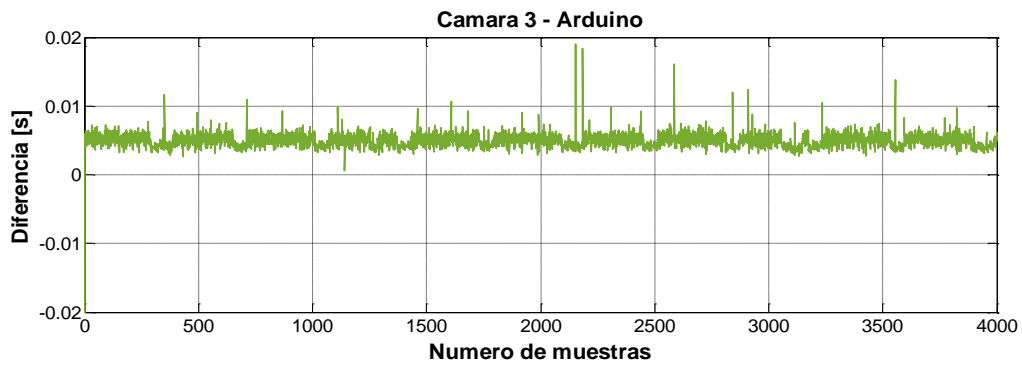
Para utilizar la fotorresistencia (LDR, light-dependent resistor) con Arduino, la opción más simple es crear un divisor de tensión y analizar con el microcontrolador las variaciones de voltaje que se producen en el circuito.



haz láser empleado en las pruebas experimentales, dichas interrupciones periódicas del temporizador generan un retardo acumulativo en cada grupo de muestras, el máximo retardo en promedio para un grupo de 4000 muestras fue de 13.3 [ms] (*figura 40*), el cual se presentó entre los computadores 1 y 2 asignados a las cámaras 1 y 2 respectivamente. A continuación se presenta la diferencia de los tiempos de captura tomando como referencia la cámara 1, donde se desea que la diferencia sea inferior a 100 [ms].

**Figura 40. Diferencias encontradas entre los tiempos de captura de los dispositivos**





La tabla 12 muestra los retardos obtenidos entre cada par de computadores para un grupo de 4000 muestras.

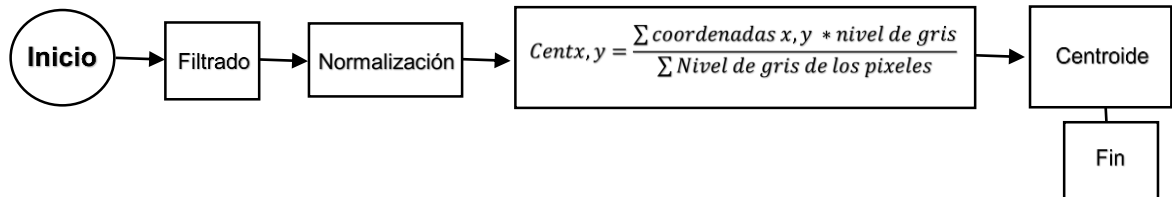
**Tabla 12. Retardo promedio entre cada par de computadores en la prueba de sincronización.**

PRUEBAS	MUESTRAS	PC1 - PC2		PC1 - PC3		PC1 - PC4		PC2 - PC3		PC2 - PC4		PC3 - PC4	
		Prom [ms]	Desv [ms]	Prom [ms]	Desv [ms]	Prom [ms]	Desv [ms]	Prom [ms]	Desv [ms]	Prom [ms]	Desv [ms]	Prom [ms]	Desv [ms]
Patrón - Ambiente	3000	13.3	3.9	0.96	1	5.9	0.72	12.4	4	7.4	3.9	5	1.1

### 3.9 TRATAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES

#### 3.9.1 Estudio del centroide

Figura 41. Diagrama de flujo del tratamiento de imágenes – Estudio del centroide.



El diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para el estudio del centroide se presenta de una manera general en la figura 41. En su inicio, se despliega un primer bloque operativo del algoritmo, donde se ejecuta un filtrado en frecuencia de la imagen capturada empleando la transformada rápida de Fourier (del inglés *Fast Fourier Transform - FFT*), en la cual se suprimen componentes frecuenciales derivados de un ruido estacionario en los sensores CMOS. En la figura 42 se observa la imagen adquirida originalmente y la filtrada después de utilizar la *FFT*, posteriormente, se normaliza la imagen con el fin de tener todas las muestras en el tiempo a la misma escala de intensidades, la amplitud máxima de dichas intensidades se le asigna el valor de 1 y a la mínima de 0, de esta forma se cuenta con todas las muestras dentro del mismo rango.

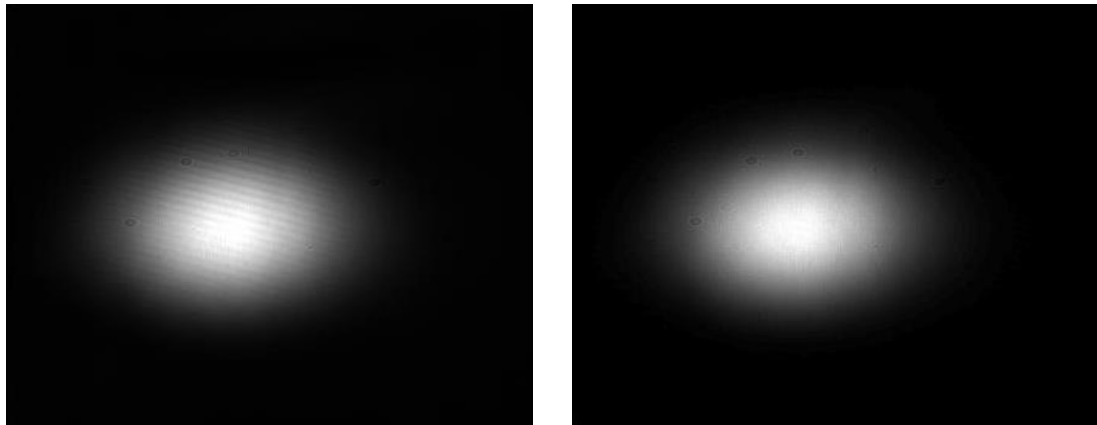
En el siguiente bloque operativo se define el centro de masa ponderado por el nivel de gris, o centroide gris, como el punto del objeto donde hay igual masa de gris arriba, abajo, a la izquierda y a la derecha de dicho punto. Este punto se desplaza en el objeto en función de la distribución de los niveles de gris e indica la dispersión del brillo en el objeto. El centroide gris de un objeto binario es igual al centro de masas.

$$Centx = \frac{\sum \text{coordenadas } x * \text{nivel de gris}}{\sum \text{Nivel de gris de los pixeles}}$$

$$Centy = \frac{\sum \text{coordenadas } y * \text{nivel de gris}}{\sum \text{Nivel de gris de los pixeles}}$$

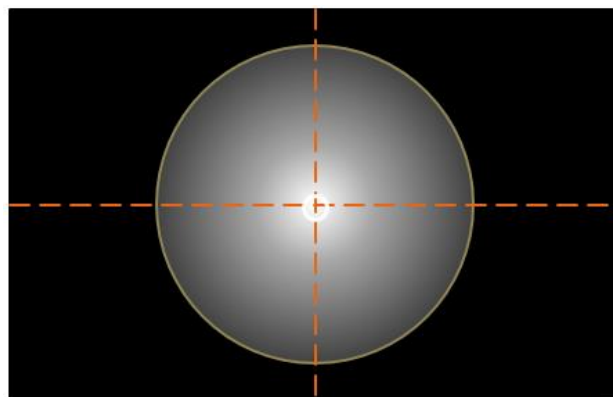
Finalmente se determina el centroide a partir del centro de masa.

**Figura 42. Izq. imagen original captura por el sensor CMOS. Der. Imagen filtrada empleado la FFT.**



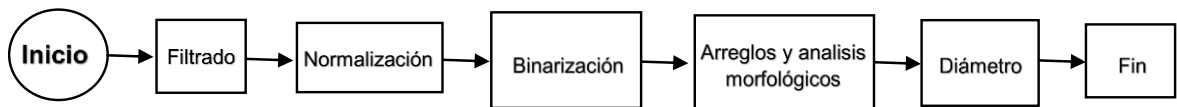
En la figura 43 se indica la dispersión del brillo en el objeto (centro de masas).

**Figura 43. Dispersión del brillo en el objeto (centro de masas)**



**3.9.2. Estudio del diámetro.** El diagrama de flujo desarrollado para el estudio del diámetro se presenta de una manera general en la figura 44

**Figura 44. Diagrama de flujo del tratamiento de imágenes – Estudio del diámetro.**



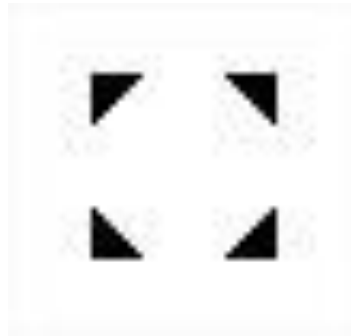
**Figura 45. Imagen binarizada a). Binarización al 13.53% de la intensidad máxima b). Al 50%**



Aprovechando los dos primeros pasos del diagrama de la figura 41 se procedió hacer la binarización de las muestras, en el que se establece un umbral de  $\frac{1}{e^2}$ , y los valores que superen dicho umbral adoptan el valor de 1, de lo contrario se les asigna el valor de 0, dicho valor de umbral también se puede extraer del histograma de la imagen, el cual da un valor aproximado de 0.1353. La figura 45 muestra un ejemplo de binarización con diferentes valores de umbral.

Posteriormente se aplican técnicas de morfología a las imágenes previamente binarizadas para analizar y modificar elementos en la imagen, en este caso se utilizó la técnica de erosión y dilatación empleando como elemento estructurante “disk” el cual fue generado por el comando strel de Matlab ®, la función de la erosión fue mejorar los bordes del spot y eliminar puntos libres, y la de la dilatación de recuperar el área original. Finalmente se identifica la región de la imagen para determinar el diámetro del spot.

**Figura 46. Elemento estructurante, disk.**



### **3.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Una vez adquiridas las muestras de los montajes experimentales en cada uno de los casos de estudio (ver Figuras 11, 12 y 13), se procedió a verificar la sincronía de las muestras, con el fin de determinar que el retardo de captura se encuentre en un rango inferior a 100 ms (hipótesis de turbulencia congelada), en la tabla 13, se muestran los retardos promedios en cada una de las pruebas tomadas, comparando los tiempo de captura entre cada uno de los dispositivos de adquisición.

**Tabla 13. Tiempos de sincronismo para cada prueba (Resaltando el mejor y peor tiempo en cada uno de los montajes experimentales)**

Pruebas		Muestras	PC1 – PC2		PC1 – PC3		PC1 – PC4		PC2 – PC3		PC2 – PC4		PC3 – PC4	
			Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv	Prom	Desv
			[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
Patrón - Ambiente		3000	13.3	3.9	0.96	1	5.9	0.72	12.4	4	7.4	3.9	5	1.1
Turbulador	Prueba 1	3000	4.4	3.1	1.3	1.2	6.2	0.87	3.2	3.3	1.7	3.1	4.9	1.4
	Prueba 2	3000	0.85	3.3	0.62	1.1	5.3	0.75	0.23	3.4	6.2	3.3	5.9	1.3
	Prueba 3	3000	0.34	4.5	12.8	1.1	5	0.77	12.4	4.6	4.6	4.5	7.8	1.2
	Prueba 4	3000	3.5	3.7	7.2	1	5.8	0.84	3.7	3.8	2.3	3.7	1.3	1.1
Paralelepípedo	Prueba 1	3000	47.2	28.8	36.6	28.5	41.5	28.5	10.6	4.8	5.7	4.6	5	1.5
	Prueba 2	3000	26.3	14.4	17.9	14.1	19.5	14.1	8.4	4.1	6.9	4.1	1.6	1.1
	Prueba 3	3000	25.3	14.7	24.9	14.7	14.5	14.6	0.42	3.3	10.8	3.2	10.4	1
	Prueba 4	3000	53.3	28.8	40.1	28.5	38.5	28.5	13.3	4.9	14.9	4.7	1.6	1.4

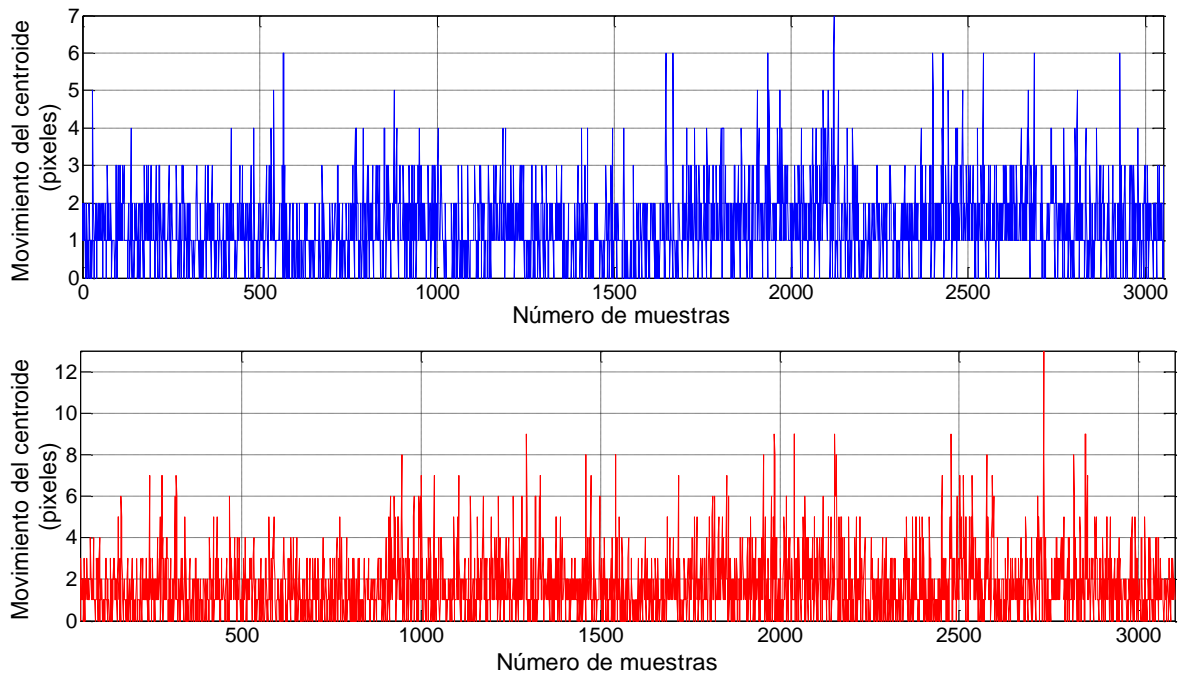
El valor mínimo de los promedios mostrados en la tabla 13 fue de 0.23 ms y se presentó entre los computadores 2 y 3 en la segunda prueba hecha en el turbulador. En cambio el valor máximo de los promedios fue de 53,3 ms entre los computadores 1 y 2 en la cuarta prueba hecha en el paralelepípedo de vidrio, este tiempo que es mucho más grande que los presentados en las demás pruebas es debido al cambio del computador 2 (cambio en el procesador de CORE™ i7 a CORE™ i5) para todas las pruebas hechas en el paralelepípedo de vidrio ( tabla 26 del Anexo A).

Con la intención de obtener imágenes de mayor calidad a bajas alturas y a ciertas distancias horizontales, se desarrolló una técnica capaz de corregir los efectos causados por la cavidad resonante propia del haz láser (bando: desviación más traslación), tratando en lo posible de adquirir sólo el efecto de la temperatura (sobre la turbulencia que se estima que es de tipo aleatorio), el cual afecta la formación precisa de imágenes. El bando es un efecto que debe ser analizado para poderlo discernir de los resultados causados por la turbulencia atmosférica en cada una de las situaciones en las que se experimentó (ambiente, turbulador, paralelepípedo). Por lo que a continuación se enseña el estudio de la posición del centroide para evidenciar el efecto de la temperatura presente en un medio turbulento modelado por dos diferentes sistemas de variación de dicha variable física. Esa posición se evaluó en un eje coordenado de dos dimensiones, y se midió el desplazamiento percibido en pixeles y micrómetros del centroide debido exclusivamente a la turbulencia.

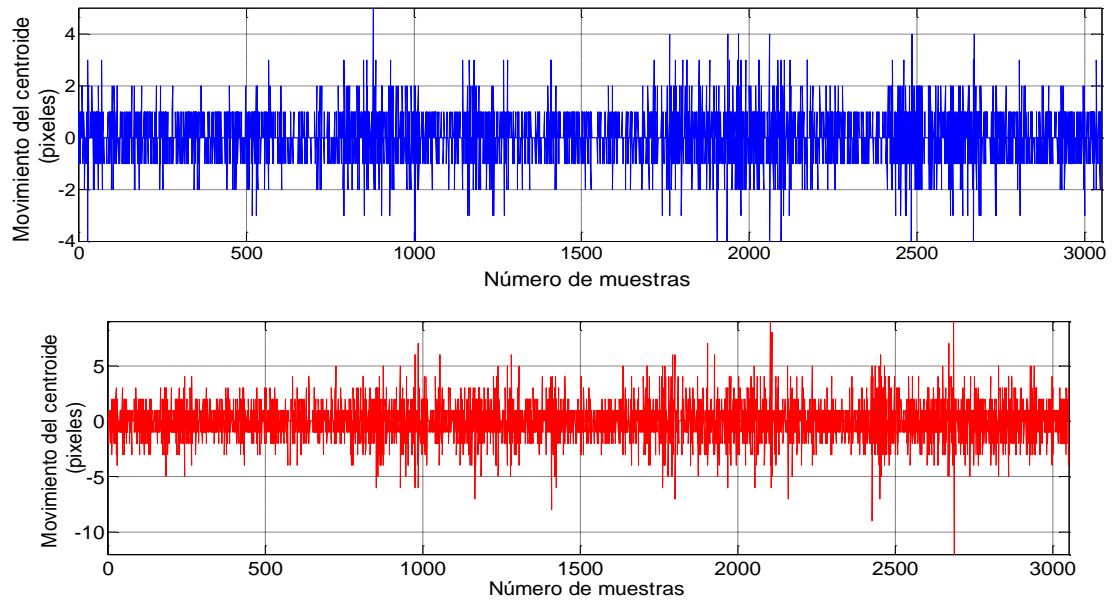
**3.10.1 Análisis de centroides y diámetro en el ambiente del Laboratorio.** En la figura 47 correspondiente a la prueba ambiente (patrón), se puede apreciar que el desplazamiento del centroide proyectado por el bando a partir de las cámaras 1 y 2, es similar al movimiento visto en la cámara 3, debido a que la turbulencia es mínima en las condiciones normales del laboratorio. En ésta, el sensor CMOS3 capturó las imágenes, pero con las imágenes de CMOS1 y CMOS2, se estimó el

centro de masa teórico en la distancia lejana (ideal). Aunque encontrando el radio se pudo validar el modelo, esta experiencia no generó una reconstrucción completa de los píxeles en el sensor lejano. Por lo tanto, se estudió cada eje del plano de captura dentro de las imágenes capturadas (figura 48, figura 49).

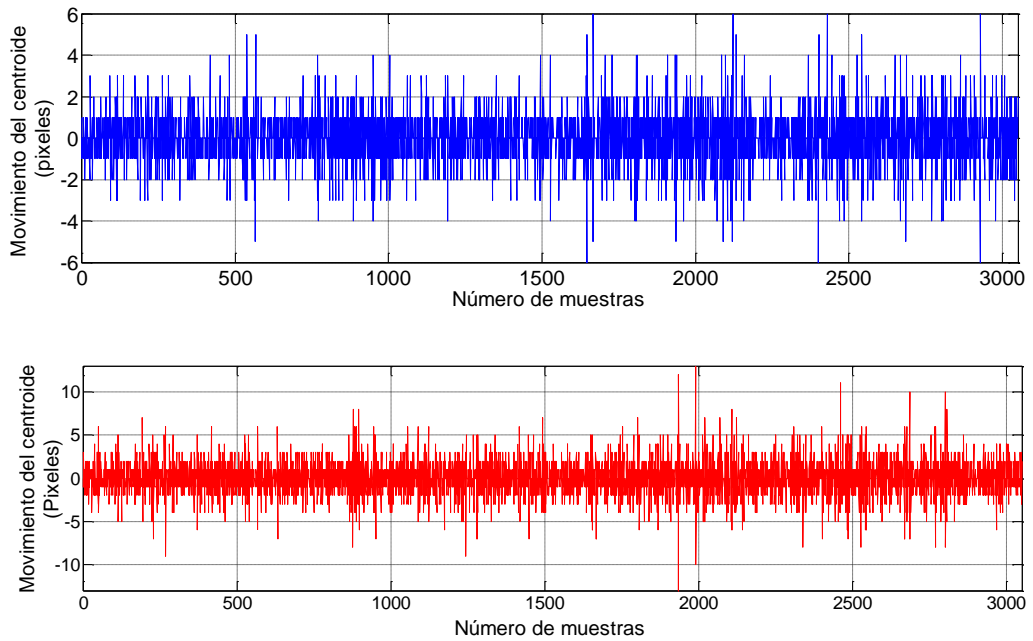
**Figura 47. Posición del centroide en CMOS3 – Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



**Figura 48. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**

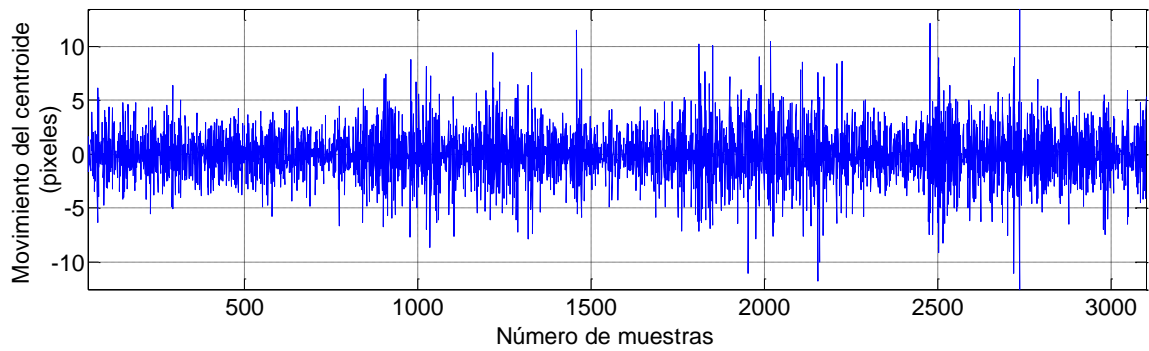


**Figura 49. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**

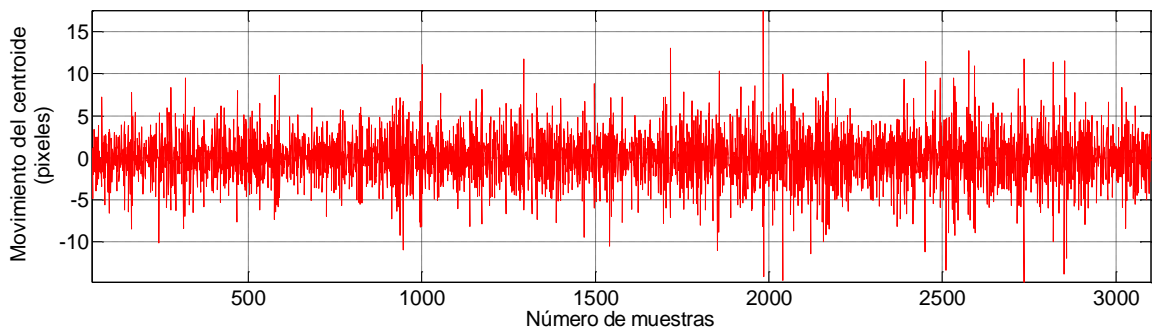


Luego se hizo una sustracción controlada en cada uno de los ejes y se encontró así el efecto de la atmósfera sobre el desplazamiento de los centros de masa debido a la evolución temporal. Los resultados son mostrados en la figura 50 y figura 51

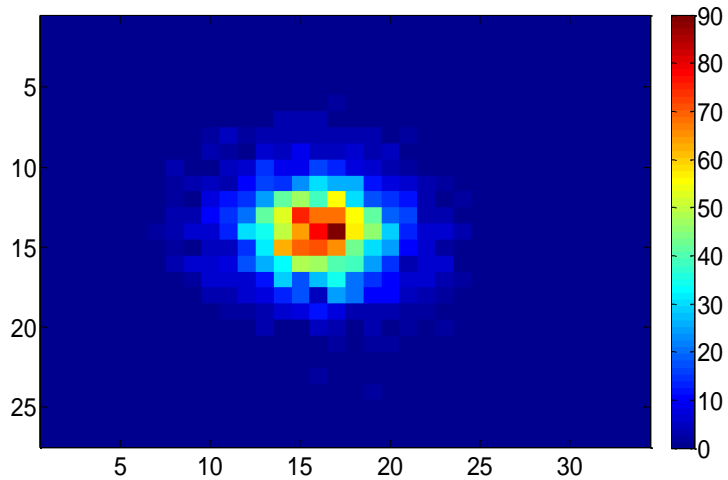
**Figura 50. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera.**



**Figura 51. Movimiento del centroide en el Eje Y. Sin Bando – Sólo Atmósfera.**



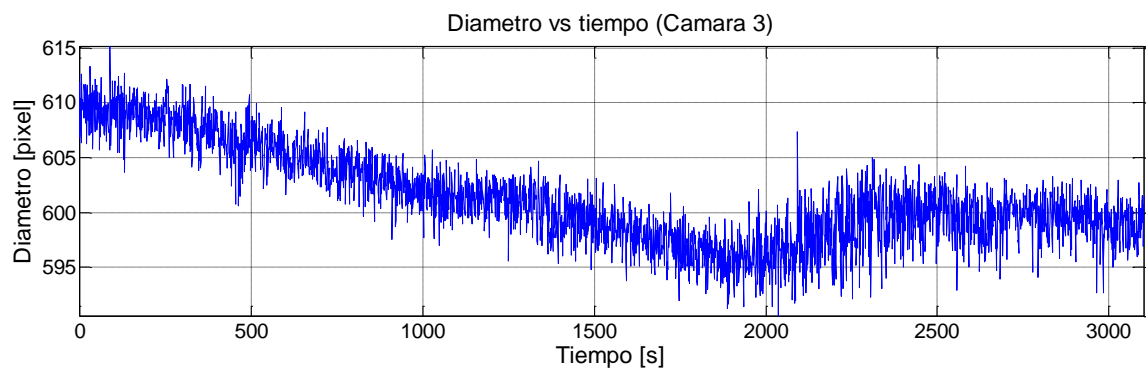
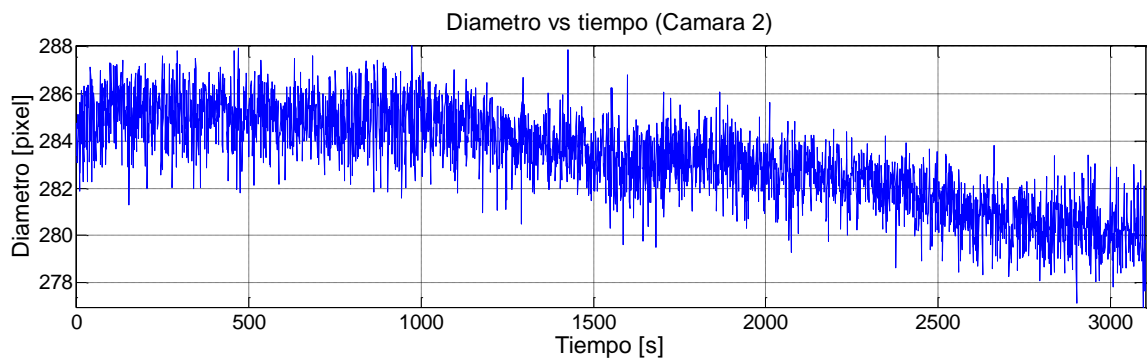
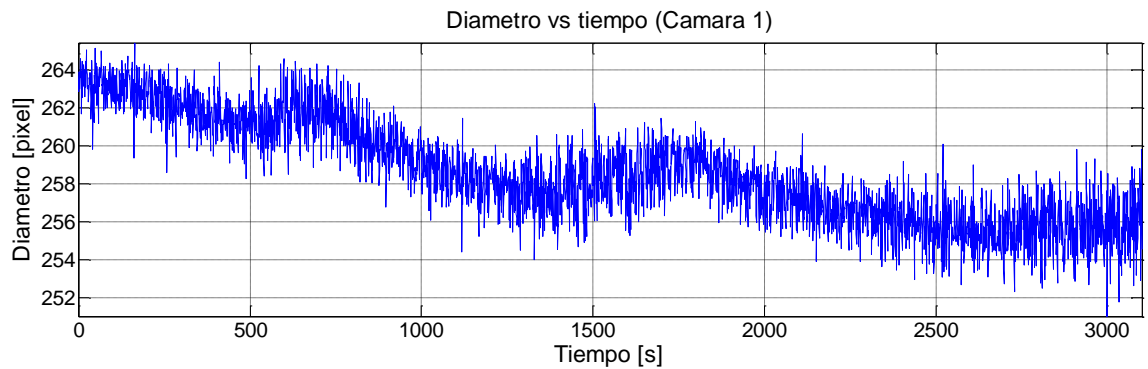
**Figura 52. Distribución 2D de los centros de masa (solo efectos de la atmósfera)**



Los valores de los pixeles del centro de masa fueron repartidos en 34 diferentes posiciones en el eje X y 27 en el eje Y. La distribución encontrada en cada eje son similares, la mayor parte de los puntos se encontraron alrededor de los puntos coordenados (17,14) con una escala de 90 repeticiones máximo en algunos puntos de la imagen (cercanos al centro del desplazamiento).

Por otro lado, el diámetro también se halló con el fin de buscar cambios en su valor y para verificar si éste cambia a lo largo del tiempo. En la figura 53 se logra observar las evoluciones de los diámetros durante el tiempo en cada una de las cámaras (CMOS1, CMOS2, CMOS3).

**Figura 53. Cálculo del diámetro a lo largo del tiempo a partir de datos experimentales. A) Cámara 1, B) Cámara 2, C) Cámara 3.**

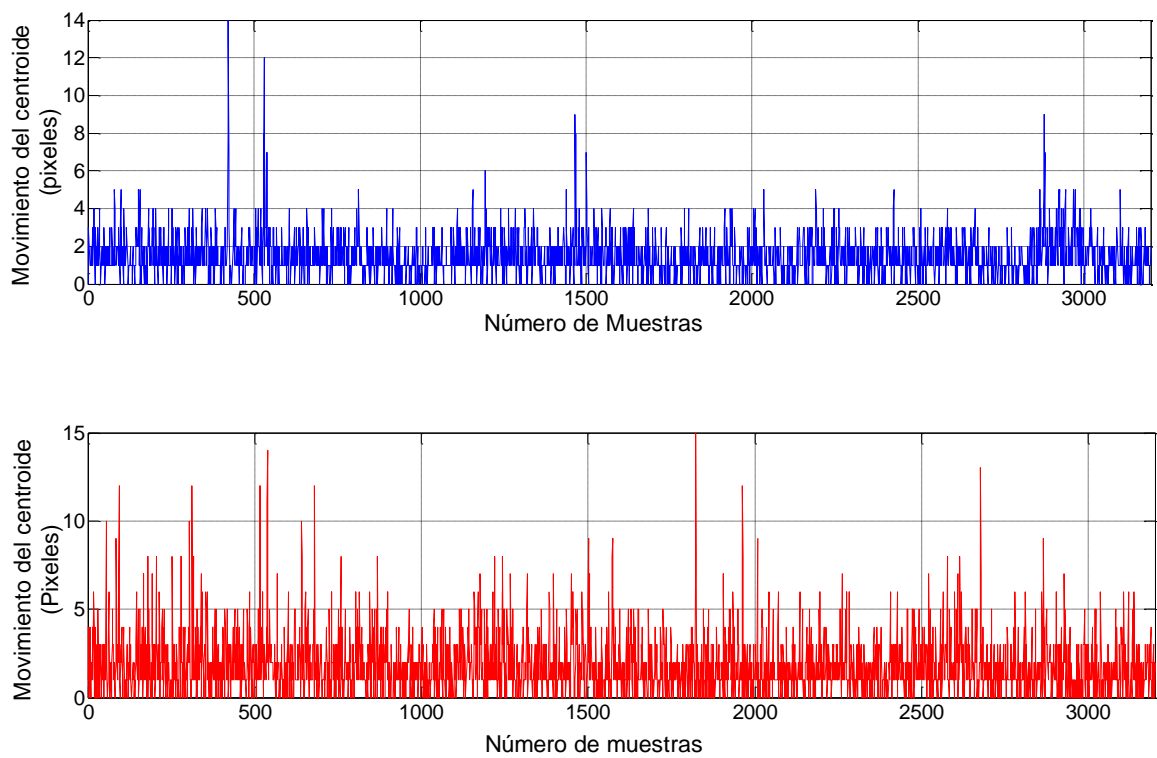


Se encontró que el diámetro tiene un comportamiento similar a los centroides porque tiene pocos cambios entre las muestras de tiempo adyacentes (menos de

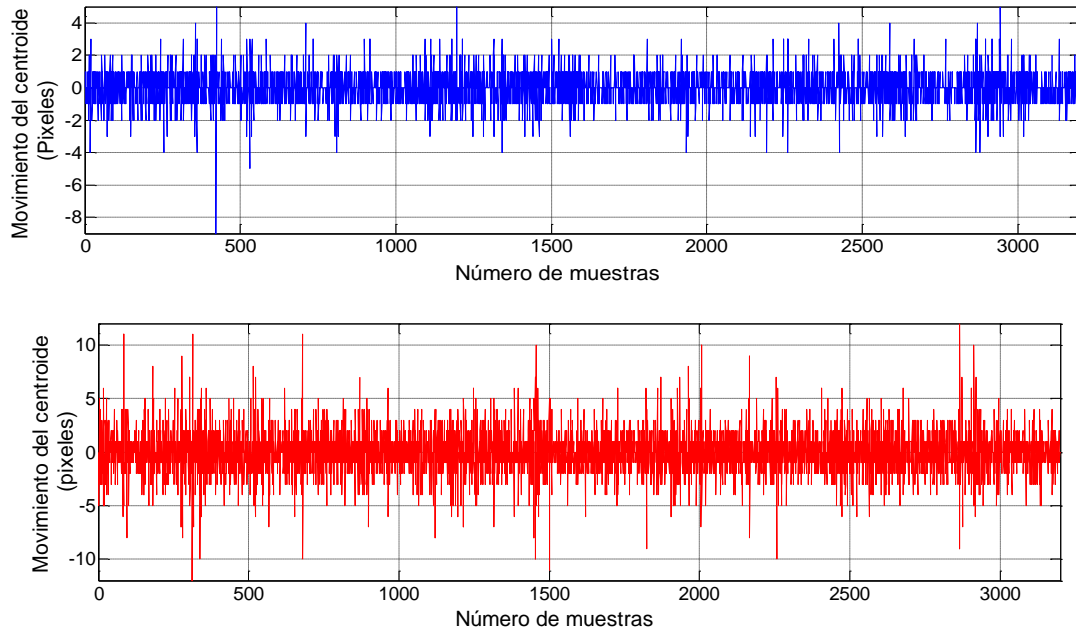
25 píxeles). Sin embargo, aquí comenzamos a investigar cómo podemos encontrar relaciones entre el efecto de diámetro y turbulencia.

### 3.10.2 Análisis de centroides y diámetro en el turbulador – Temperatura: 105 °C

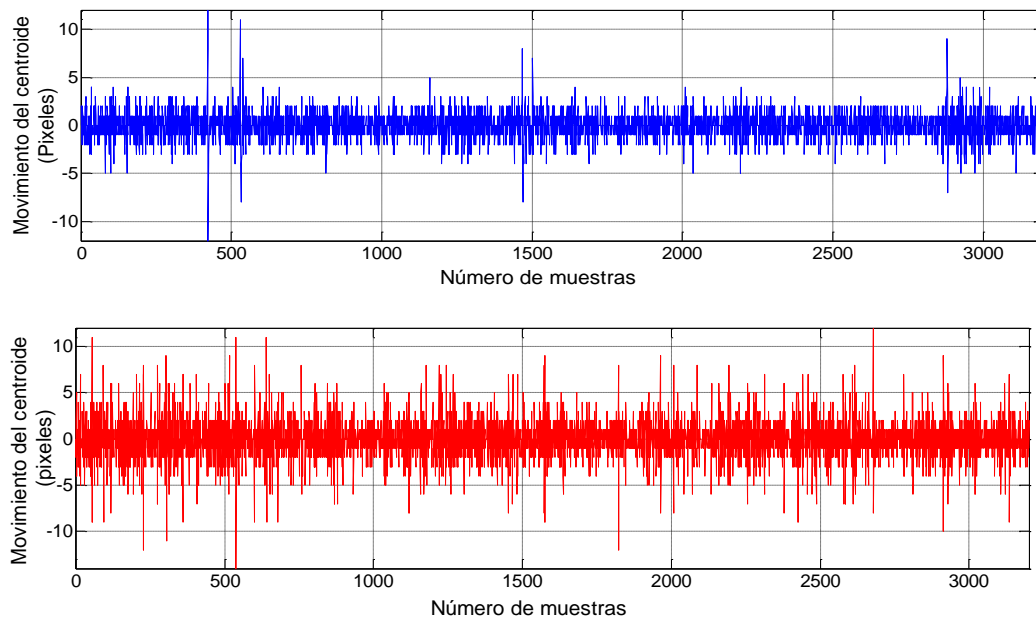
**Figura 54. Posición del centroide en CMOS3 – Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



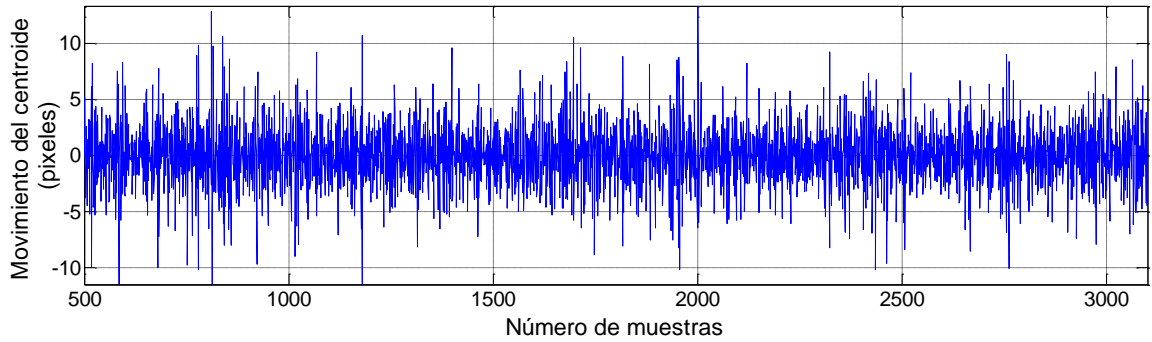
**Figura 55. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



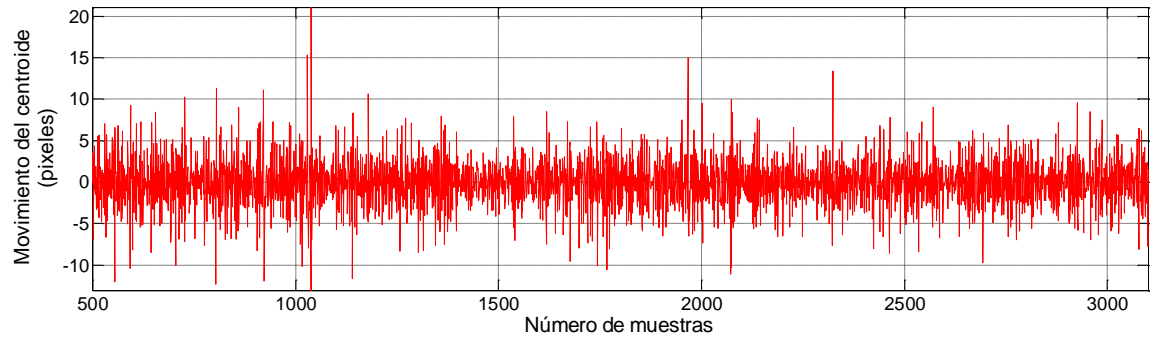
**Figura 56. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



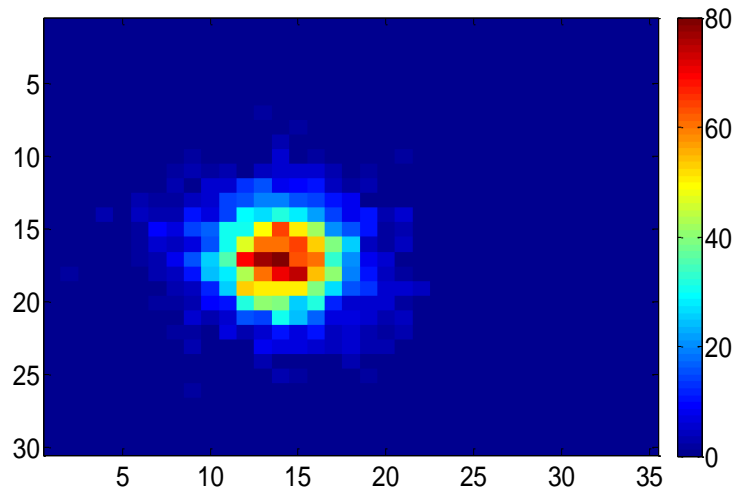
**Figura 57. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera.**



**Figura 58. Movimiento del centroide en el Eje Y. Sin bandeo – Sólo atmósfera.**



**Figura 59. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)**



Se hicieron otras pruebas variando la temperatura, en este caso se estabilizo a 105 °C. Para generarla se ha controlado con tensión un reóstato hueco (núcleo de cerámica), el cual incrementa su temperatura proporcional al voltaje inyectado, el haz láser se propaga a través del diámetro interno del reóstato donde la temperatura es más alta. En el exterior se utiliza un cilindro más grande para protegerlo de los cambios de temperatura o de otras variables físicas no controladas hasta ahora (figura 14).

Similar a las figuras 47 - 52 se evaluaron los datos que verifican su comportamiento y el efecto de la temperatura. Para esta prueba la distancia que hay desde la apertura del láser al turbulador es de 248 [cm] y del láser a la cámara CMOS3 de 397 cm. Los resultados son mostrados en las figuras 54 - 59, donde se evidencia que el centroide tuvo un movimiento similar a las pruebas hechas anteriormente en el ambiente (prueba patrón). Inicialmente, los resultados encontrados no eran los esperados ya que en los modelos encontrados, los efectos dados por la turbulencia dependen estrictamente de la temperatura [33]. Así, los resultados de cada una de las pruebas hechas en el turbulador a 105°C se pudieron haber dados por muchos motivos, a continuación se muestran las posibles causas de este fenómeno.

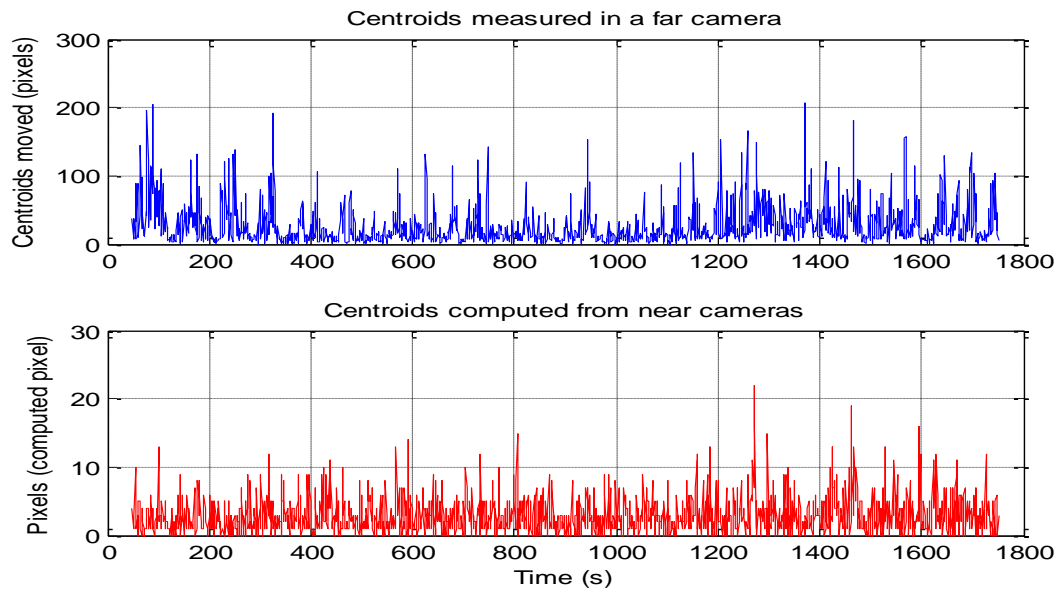
1) La forma en la que se expone la temperatura con el medio y la generación de un gradiente de temperatura uniforme.

Para explicar un poco mejor este fenómeno, en una prueba previa [11], la temperatura que se irradiaba al láser era de manera localizada espacialmente (por medio de un cautín a 200°C), el cual estaba expuesto al aire y a otros fenómenos que podían intervenir en el medio (figura 60), los resultados presentados en la figura 61 y figura 60 son similares a los presentados anteriormente, pero esta vez la temperatura que se irradia sobre el haz láser está expuesta sobre el ambiente natural del laboratorio, a continuación se muestran los resultados de esta prueba.

**Figura 60. Temperatura irradiada sobre el haz láser por una fuente puntual de temperatura (aquí suministrada por un cautín).**

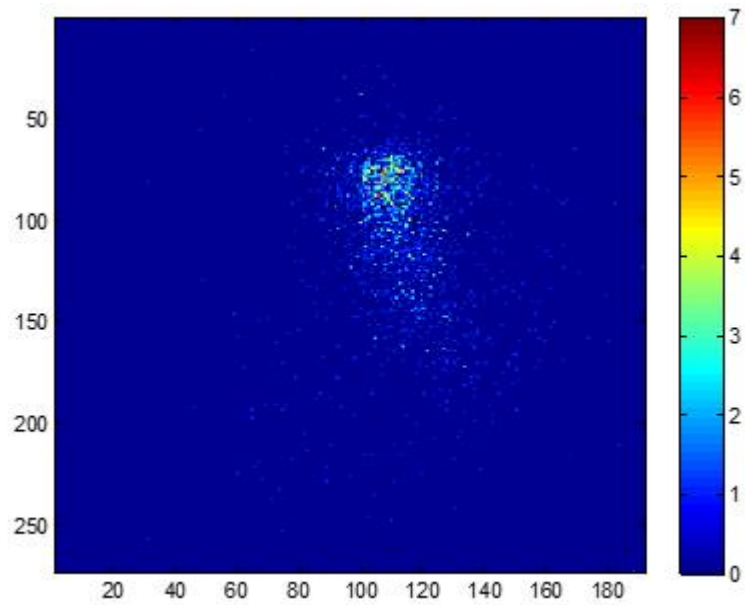


**Figura 61. Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado (abajo).**



En la figura 61 se facilita observar la diferencia en el desplazamiento calculado (23 píxeles) en comparación con el medido (10 veces más grande). Estos efectos son mostrados de forma general en la figura 62.

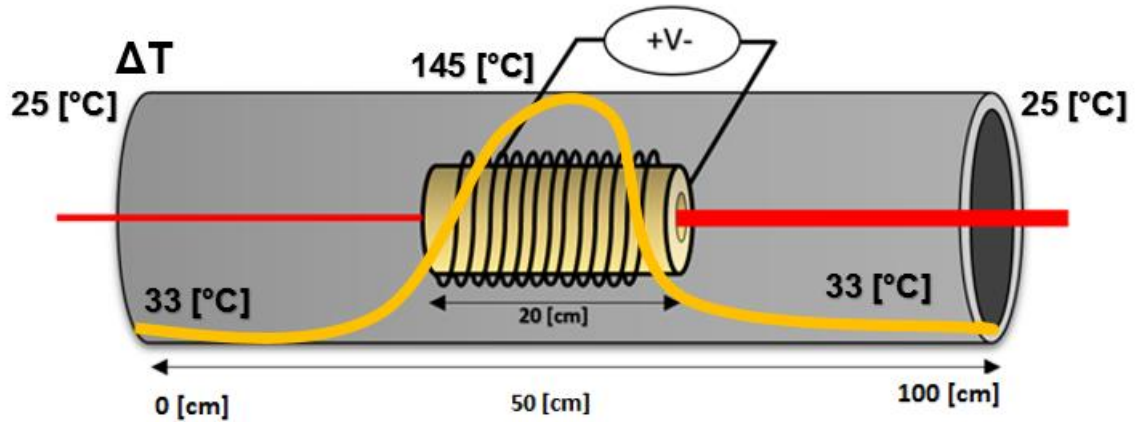
**Figura 62. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)**



En la figura 62 es mostrada la dispersión en dos dimensiones dada por los efectos de la temperatura. Los efectos observados fueron percibidos en el número de píxeles que hacían parte de tal dispersión.

Al estar el reóstato hueco rodeado por un cilindro metálico más grande, el láser no será afectado por otros fenómenos físicos externos a la temperatura que generen una mayor turbulencia como ocurre en el caudín, garantizando así una temperatura uniforme dentro del dispositivo, con esto se asegura que el gradiente de temperatura sea muy suave (no haya cambios abruptos de temperatura) entre el ambiente, los extremos del turbulador y el centro del mismo (*figura 63*), generando así una menor turbulencia en el interior del dispositivo.

Figura 63. Gradientes de temperatura presentes en el turbulador

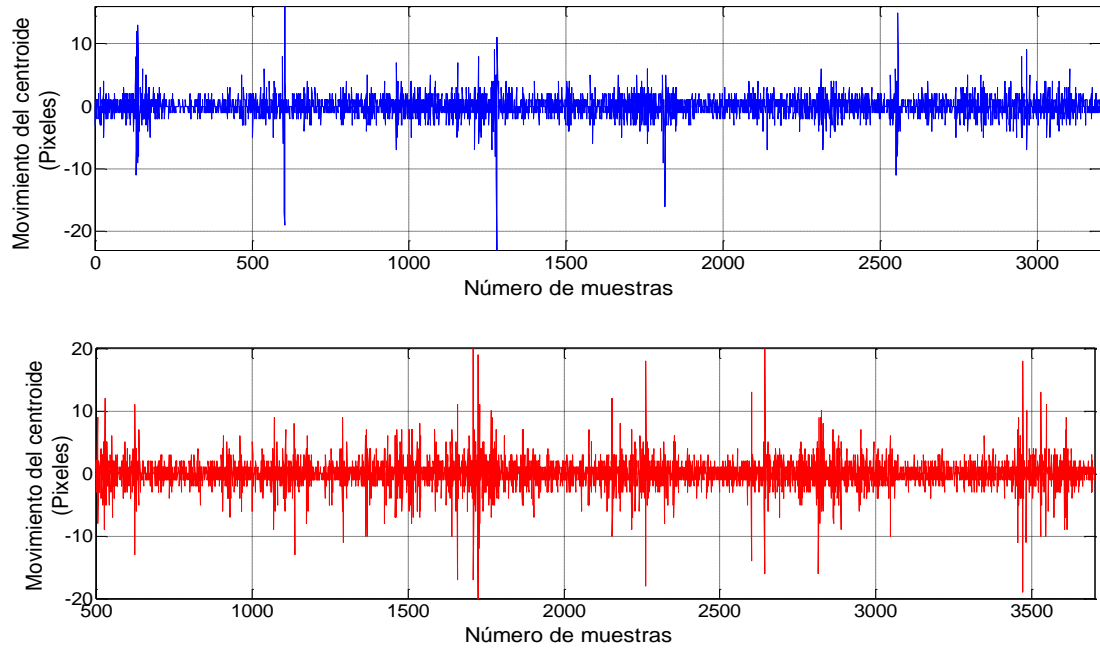


La escala externa de la energía turbulenta representa el tamaño de los mayores torbellinos turbulentos, mientras que en la escala interna la energía se transmite a movimientos de menores escalas, al ser estos parámetros pequeños dentro del turbulador no se genera de igual manera una gran turbulencia

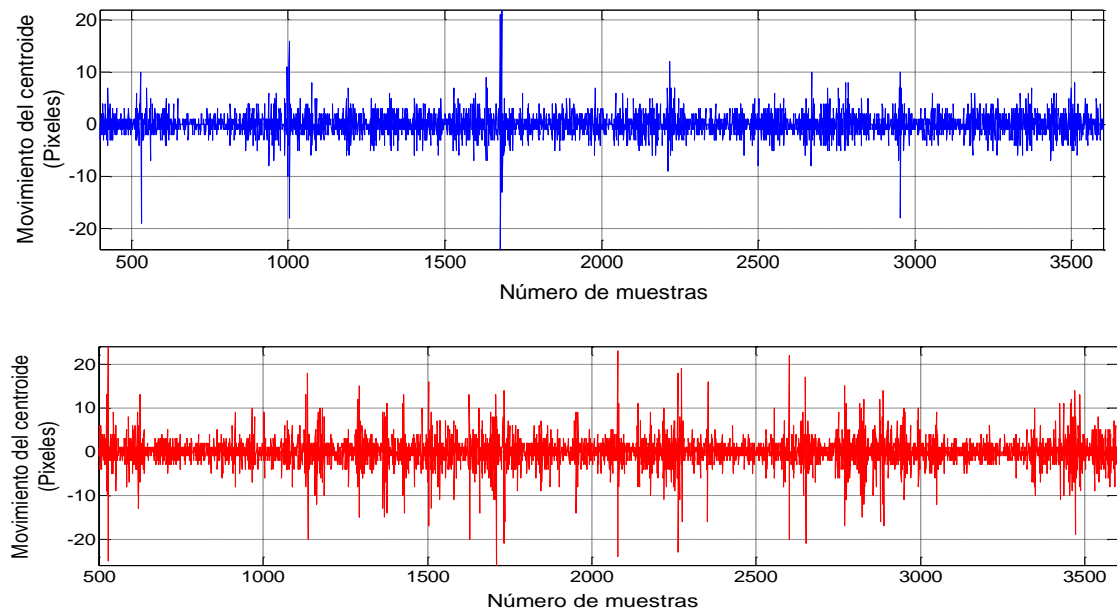
2) La distancia de propagación desde el medio turbulento hacia el sensor CMOS3.

En los resultados mostrados en las figuras 47 – 52, la distancia de la salida del turbulador a la cámara CMOS3 era de 49 cm, esta distancia se puede considerar corta para que la CMOS3 pueda diferenciar los desplazamientos asociados a los cambios de la temperatura o generar convección, por tal motivo se hicieron pruebas en el laboratorio acercando el turbulador a una distancia de 144 cm con respecto a la salida del láser, de esta manera la distancia de la salida del turbulador a la cámara CMOS3 se incrementó a 153 [cm], los resultados obtenidos de ésta prueba se muestran seguidamente.

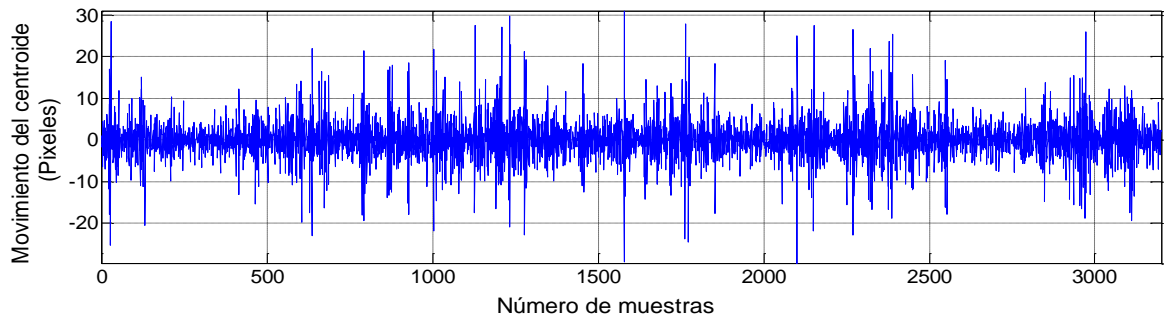
**Figura 64. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



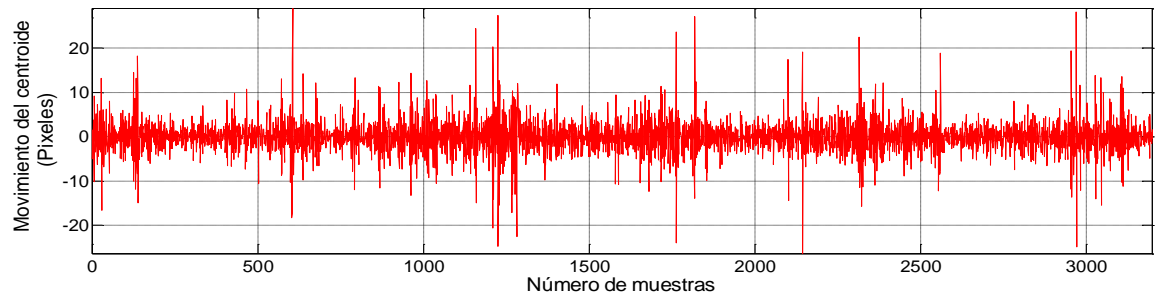
**Figura 65. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



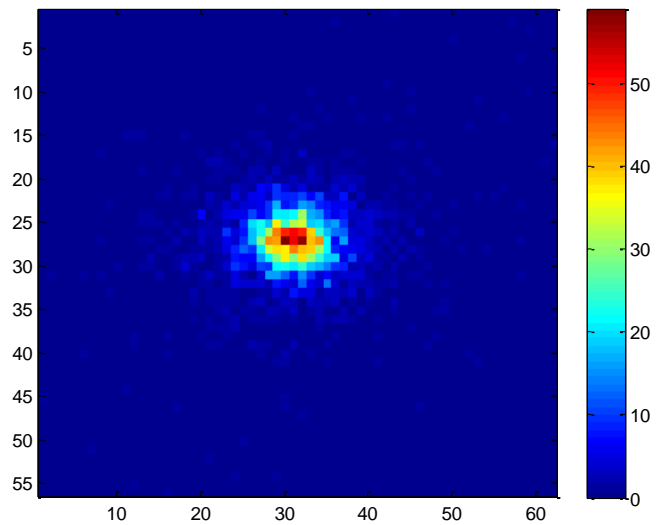
**Figura 66. Movimiento del centroide en el Eje Y. Sin bandeo – Sólo atmósfera**



**Figura 67. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera.**



**Figura 68. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)**



En la pruebas 64 – 68 no se evidenció un movimiento de traslación notable en el centroide en el eje X o el eje Y, pues los resultados son muy similares a las pruebas hechas en el ambiente natural del laboratorio, por lo que se descarta que la distancia del turbulador a la cámara CMOS3 no pueda diferenciar los movimientos de la atmósfera.

### 3) Generación de gradientes no uniformes.

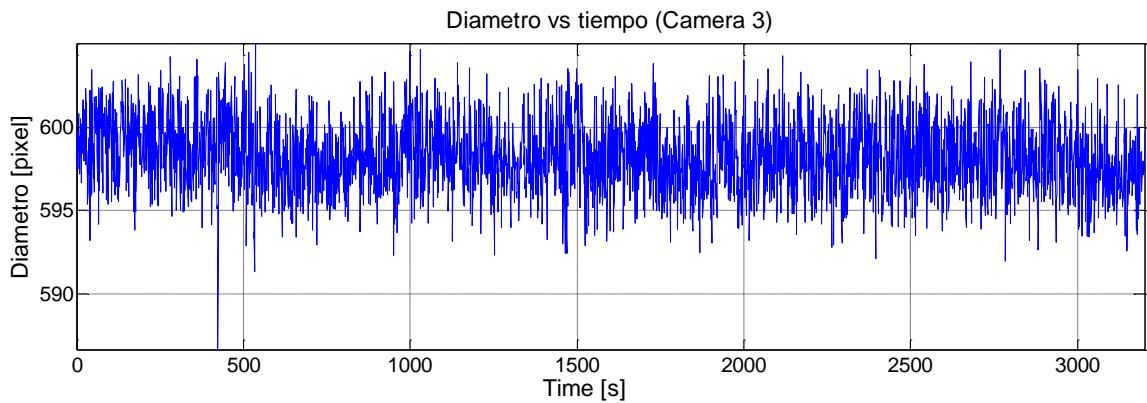
Para ver el comportamiento que tiene el centroide frente a gradientes de temperaturas no uniformes, se hicieron pruebas en el laboratorio sobre el paralelepípedo de vidrio, que debido a su geometría y a su generación de temperatura crean gradientes no uniformes en el interior del dispositivo (Mirar caracterización – sección 2.2.1.3). En la sección 2.5.3 se mostraron las pruebas realizadas sobre este sistema.

### **Prueba Turbulador temperatura 105°C - Diámetro:**

Por otro lado, el diámetro también se halló en el Turbulador con el fin de buscar cambios en su valor y para verificar si ésta cambia a lo largo del tiempo en la

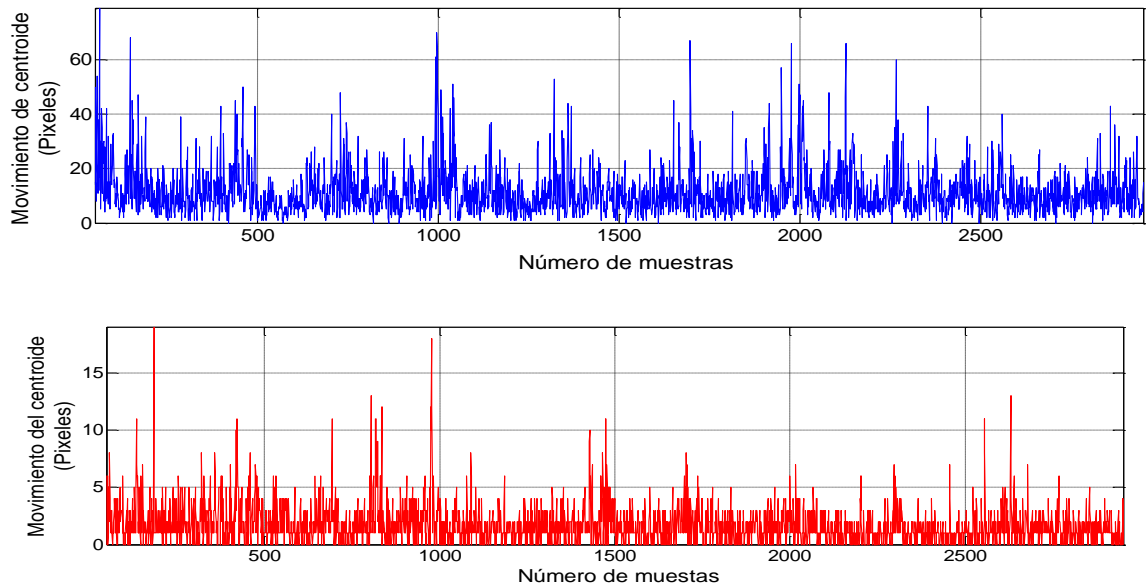
cámara CMOS3. En la *figura 69* se logra ver la evolución del diámetro durante el tiempo.

**Figura 69. Cálculo del diámetro a lo largo del tiempo a partir de datos experimentales en la Cámara 3.**

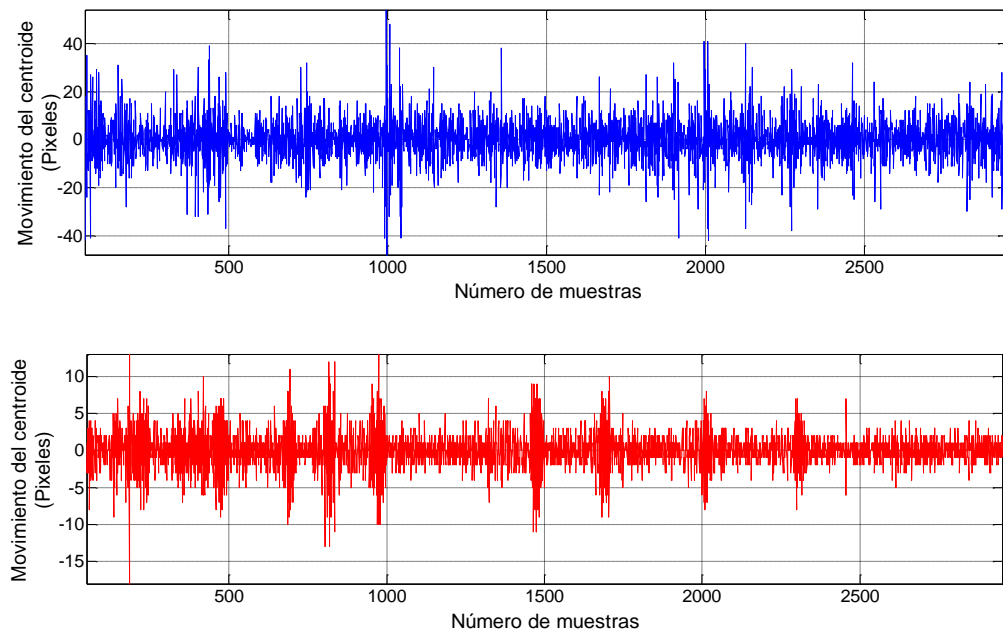


**3.10.3 Análisis de centroides y diámetro en el Paralelepípedo de vidrio – Temperatura: 105 °C** Las pruebas realizadas en el paralelepípedo de vidrio lograron evidenciar un notable movimiento en el centroide, radialmente (*figura 70*) la diferencia en el movimiento calculado fue de 19 píxeles desplazados en comparación con el medido que fue de 79 píxeles. En el eje X el movimiento del centroide medido fue de 54 píxeles y el del calculado fue de 13 píxeles. En el eje Y el movimiento del centroide medido fue de 79 píxeles y en el calculado de 16 píxeles, todas estas anteriores pruebas fueron con el efecto del bandeado y la temperatura.

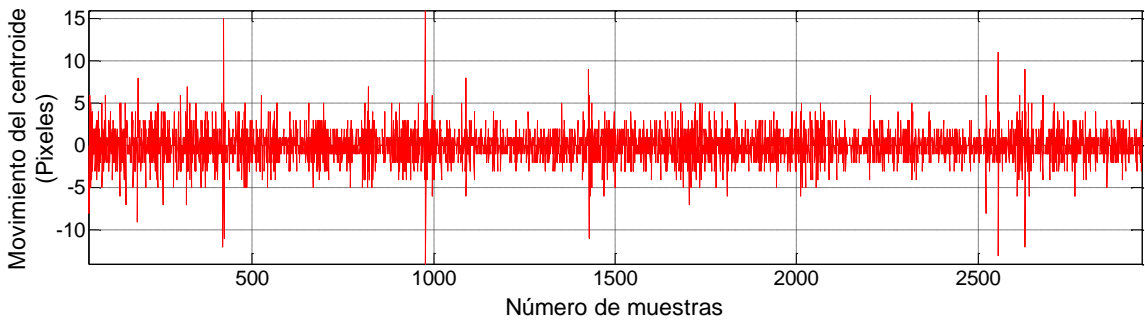
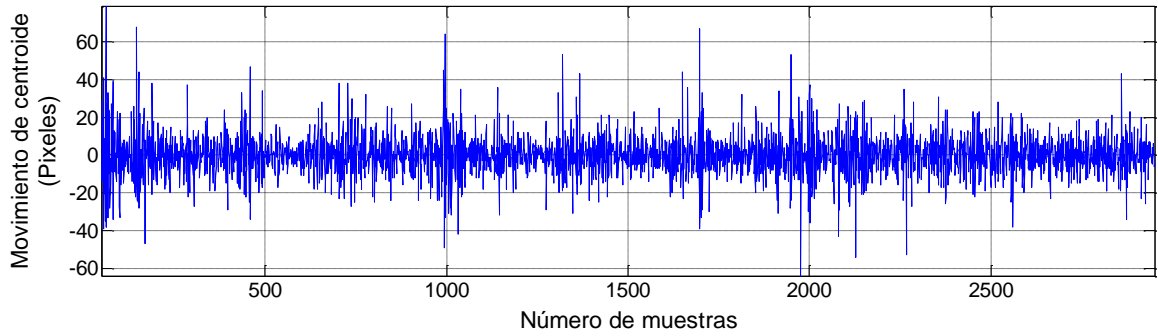
**Figura 70. Posición del centroide en CMOS3 – Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



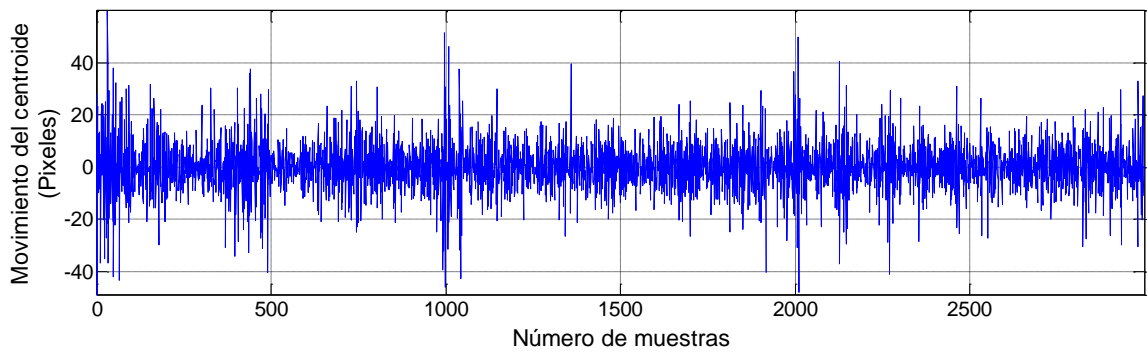
**Figura 71. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



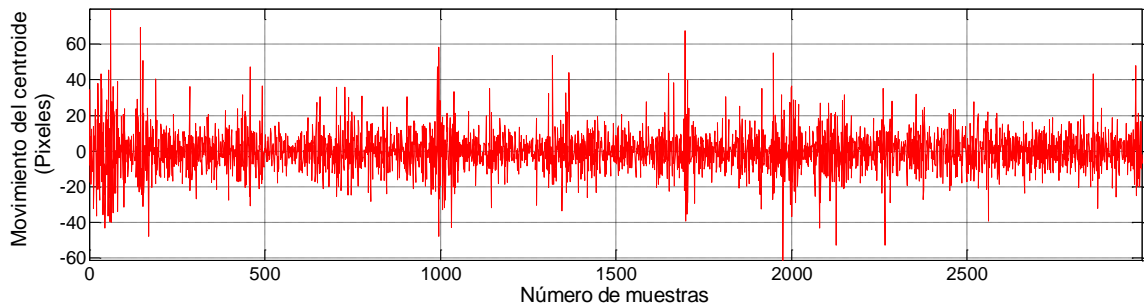
**Figura 72. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



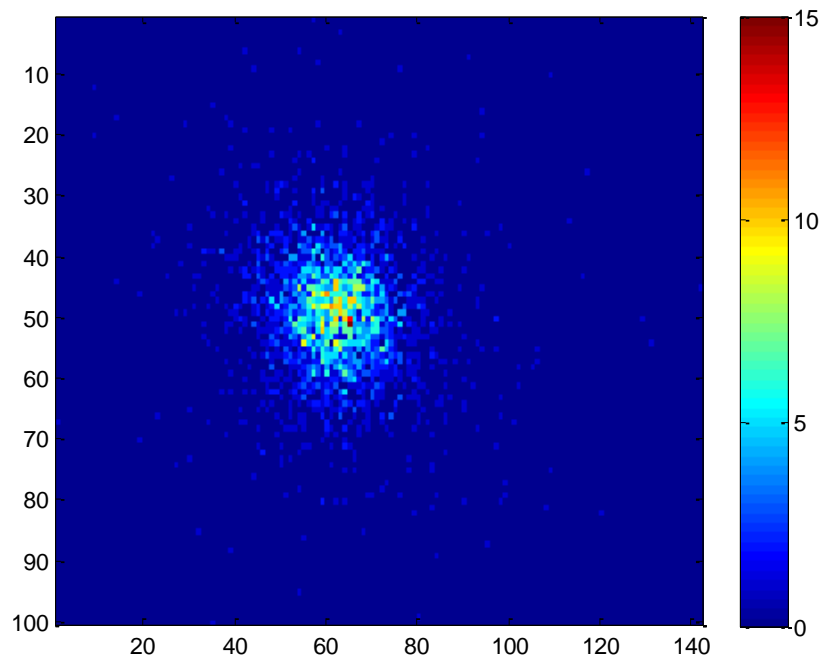
**Figura 73. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera.**



**Figura 74. Movimiento del centroide en el Eje Y. Sin bandeo – Sólo atmósfera.**



**Figura 75. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)**

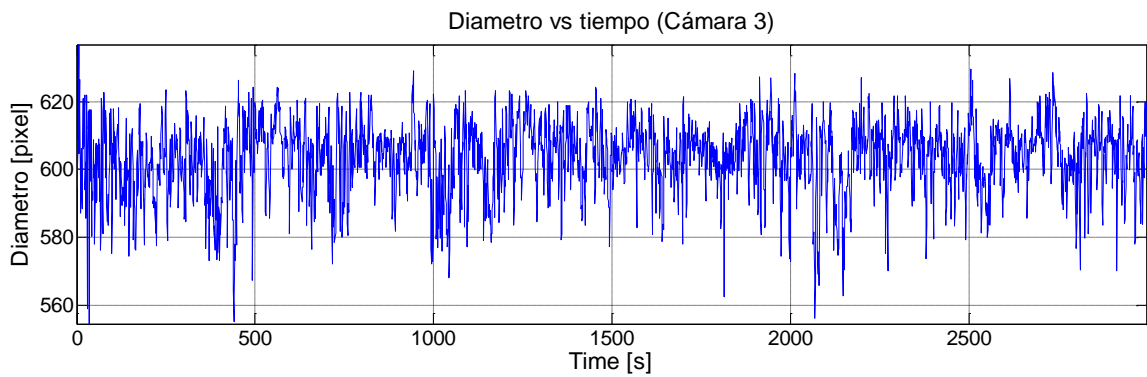


Ahora sustrayendo el efecto del bandeo, el movimiento del centroide medido en el eje X fue de 60 píxeles y en el eje Y de 80 píxeles (*figura 73 y figura 74*).

Los valores de los píxeles del centro de masa fueron repartidos en 140 diferentes posiciones en el eje X y 100 en el eje Y. La distribución fue similar a la encontrada en cada eje, la mayor parte de los puntos se encontraron alrededor de los puntos coordinados (65,51) con una escala de 15 repeticiones máximo en algunos puntos de la imagen (cercanos al centro del movimiento).

El diámetro en la cámara CMOS3 es mostrado en la *figura 76*.

**Figura 76. Cálculo del diámetro a lo largo del tiempo a partir de datos experimentales en la Cámara 3.**



**Tabla 14. Movimiento máximo del centroide para todas las pruebas realizadas en cada situación.**

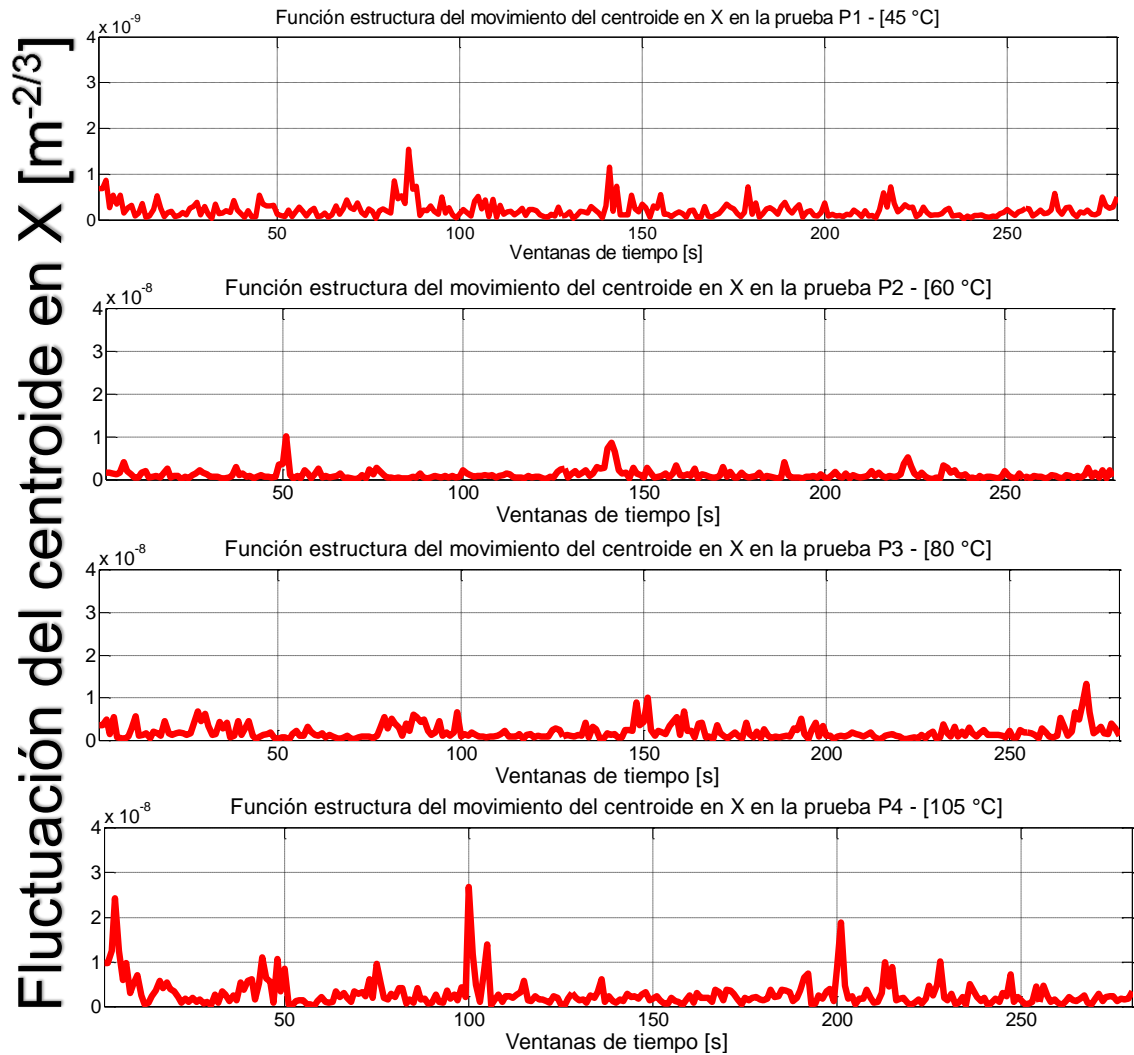
Pruebas		Movimiento del centroide (Píxeles)							
		Radialmente		Eje X		Eje Y		Eje X (Sin bandeo)	Eje Y (Sin bandeo)
		Medido	Calculado	Medido	Calculado	Medido	Calculado		
Patrón - Ambiente		7	13	5	9	6	13	14	18
urbulador	Prueba 1	8	10	5	8	7	14	11	13
	Prueba 2	14	7	6	6	13	7	10	14
	Prueba 3	14	15	5	12	12	12	13	21
	Prueba 4	15	15	7	9	14	9	12	15
Paralelepípedo	Prueba 1	17	5	13	5	12	9	14	16
	Prueba 2	49	10	40	8	43	11	43	43
	Prueba 3	48	11	33	9	38	17	34	39
	Prueba 4	79	19	54	13	74	16	60	80
Cautín	Prueba 1	23	205	-	-	-	-	-	-
Turbulador: distancia de propagación: 153 [cm]		22	25	16	18	16	18	23	31

**3.10.4 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 [31],

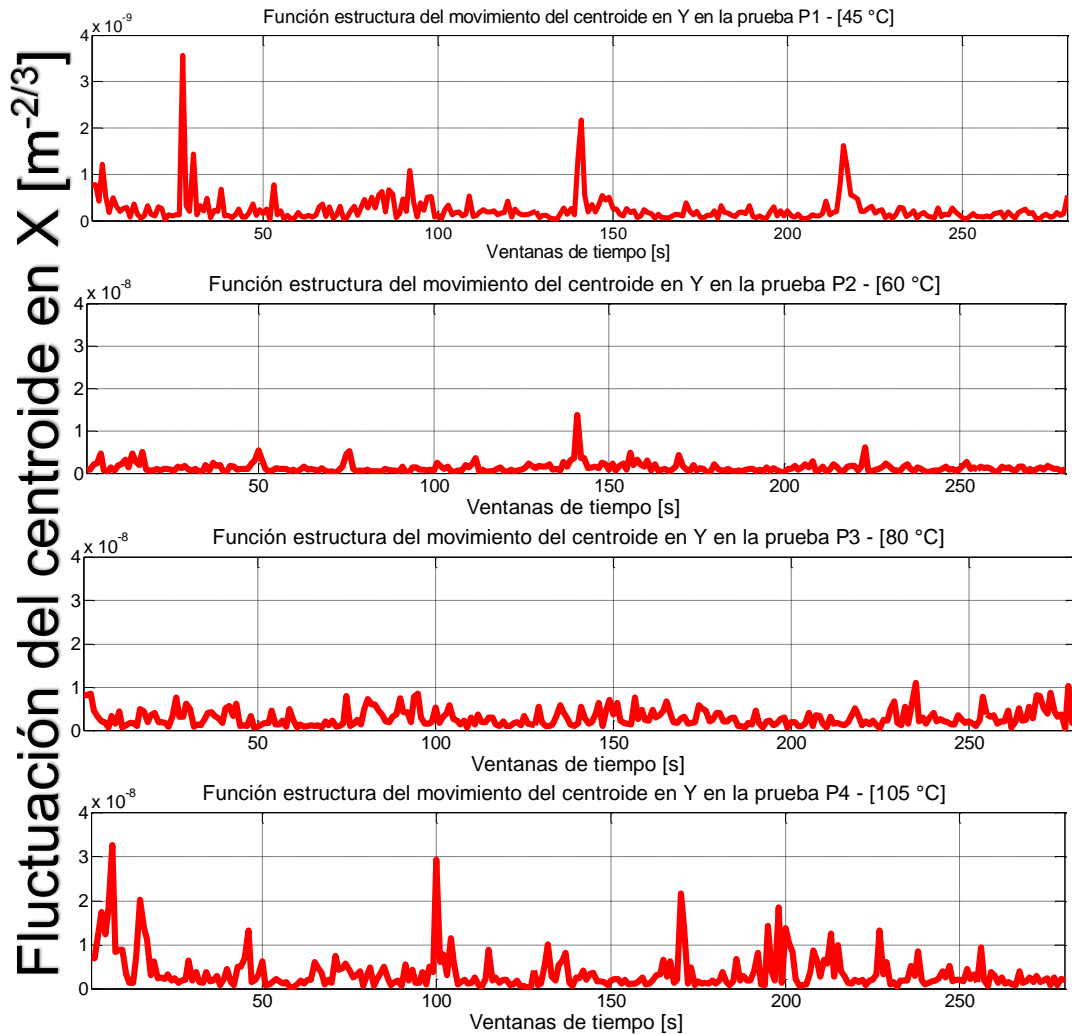
$$D_x(k_i) = \langle [x(k_i) - (\overline{x_0})]^2 \rangle$$

Para analizar las fluctuaciones de los centroides y diámetros, se realizaron las funciones estructuras respectivas en las pruebas hechas en el paralelepípedo (figura 77, figura 78 y figura 79) y en el turbulador sobre la cámara CMOS 3 sin bandeo. Cada una de estas gráficas poseen ventanas de 10 segundos, es decir, cada prueba tiene 2800 muestras, por lo tanto, se obtuvieron 280 fluctuaciones locales.

Figura 77. Función estructura del movimiento del centroide en X en las pruebas p1, p2, p3 y p4 del paralelepípedo de vidrio.



**Figura 78. Función estructura del movimiento del centroide en Y en las pruebas p1, p2, p3 y p4 del paralelepípedo de vidrio.**



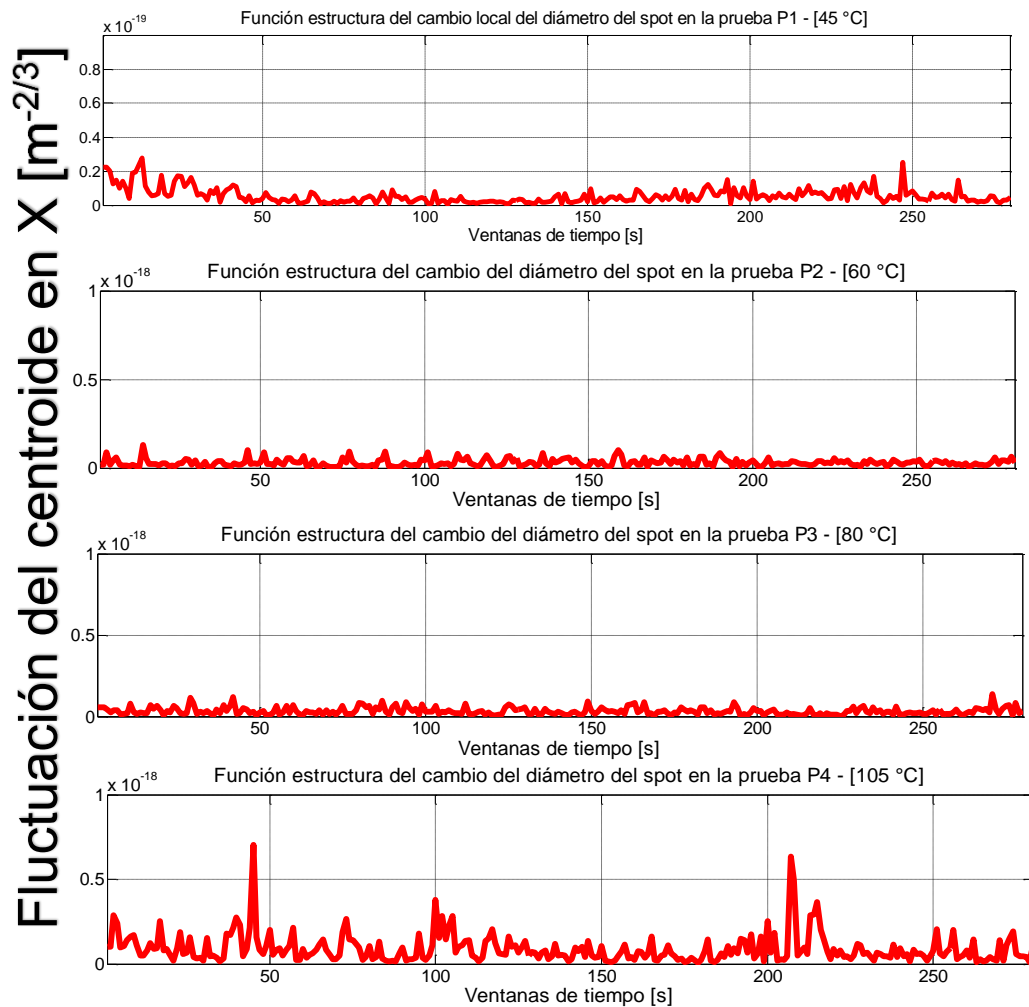
**Tabla 15. Fluctuación promedio global de los centroides en X – Paralelepípedo.**

Pruebas Centroide X	Fluctuación Promedio global [m <sup>-2/3</sup> ]
P1 – [45 °C]	2.2066e-10
P2 – [60 °C]	1.1428e-9
P3 – [80 °C]	1.9586e-9
P4 – [105 °C]	2.8566e-9

Tabla 16. Fluctuación promedio global de los centroides en Y – Paralelepípedo.

Pruebas Centroide Y	Fluctuación Promedio global [m <sup>-2/3</sup> ]
P1 – [45 °C]	2.4321e-10
P2 – [60 °C]	1.3099e-9
P3 – [80 °C]	2.8736e-9
P4 – [105 °C]	3.6986e-9

Figura 79. Función estructura del cambio del diámetro en las pruebas p1, p2, p3 y p4 del paralelepípedo de vidrio.



**Tabla 17. Fluctuación promedio global del diámetro del spot – Paralelepípedo.**

<b>Pruebas diámetro</b>	<b>Fluctuación Promedio global [m<sup>-2/3</sup>]</b>
<b>P1 – [45 °C]</b>	5.5829e-21
<b>P2 – [60 °C]</b>	3.0537e-20
<b>P3 – [80 °C]</b>	3.2677e-20
<b>P4 – [105 °C]</b>	9.0245e-20

A partir de la información obtenida del análisis de la función estructura de las pruebas realizadas en el paralelepípedo de vidrio, se observó que las fluctuaciones globales incrementan a mayores niveles de temperatura.

Las fluctuaciones globales del centroide en el eje Y son mayores que las del eje X, debido a la diferencia de temperatura relativa que existe a diferentes alturas en el paralelepípedo. Por otro lado, el diámetro es el parámetro más afectado por la temperatura, siendo el que presentó mayores cambios al incremento de la misma.

**Figura 80. Función estructura del movimiento del centroide en X en las pruebas p1, p2, p3 y p4 del turbulador.**

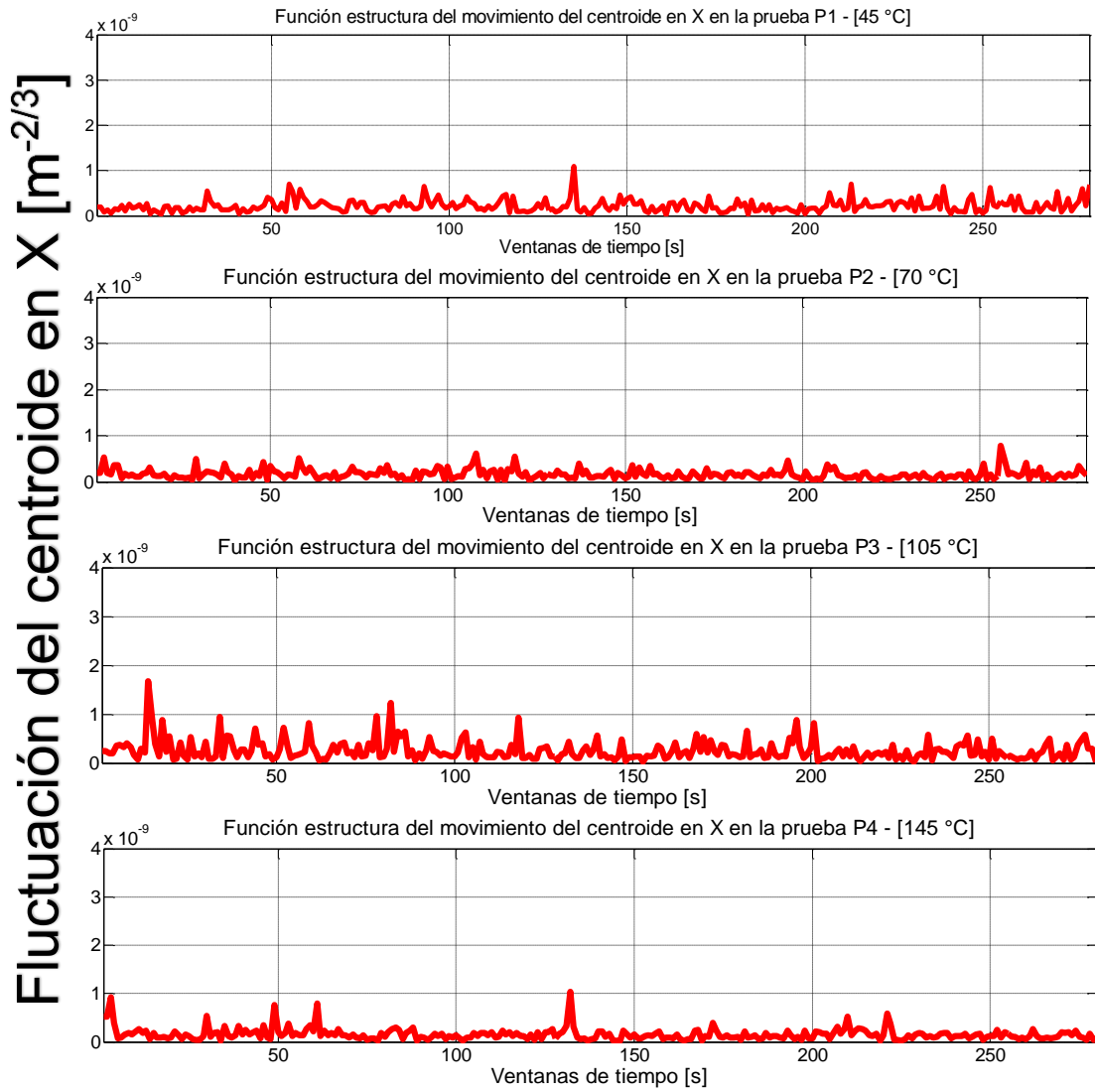


Figura 81. Función estructura del movimiento del centroide en Y en las pruebas p1, p2, p3 y p4 del turbulador.

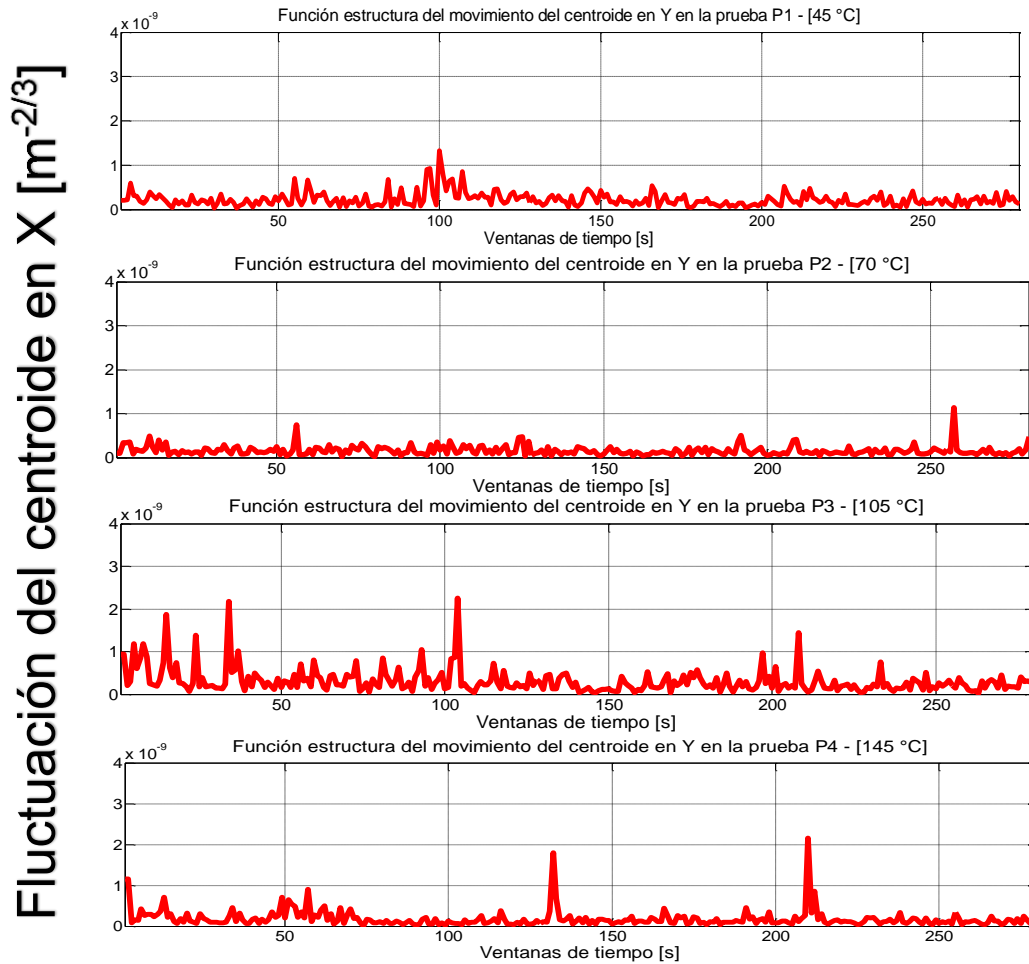


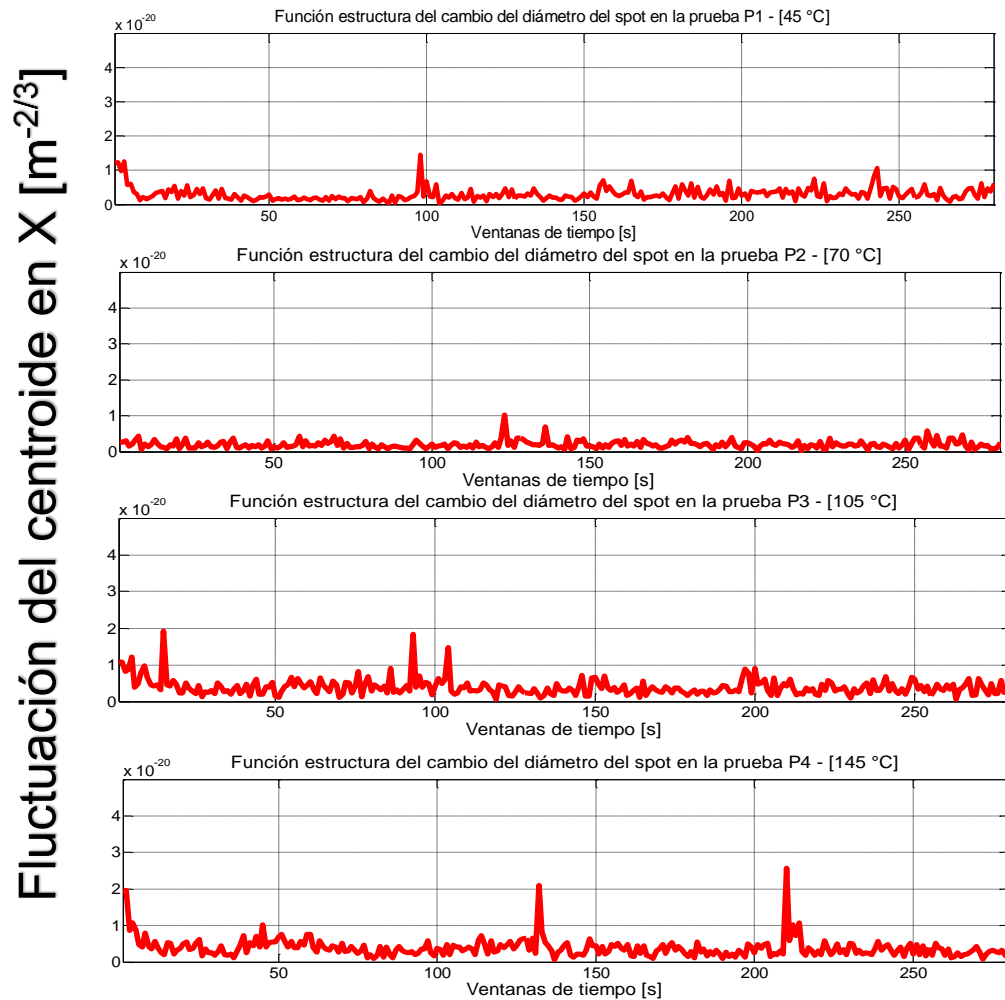
Tabla 18. Fluctuación promedio global de los centroides en X – Turbulador.

Pruebas Centroide X	Fluctuación Promedio global [m <sup>-2/3</sup> ]
P1 – [45 °C]	2.2079e-10
P2 – [70 °C]	1.6591e-10
P3 – [105 °C]	2.5580e-10
P4 – [145 °C]	1.5611e-10

Tabla 19. Fluctuación promedio global de los centroides en Y – Turbulador.

Pruebas Centroide Y	Fluctuación Promedio global [m <sup>-2/3</sup> ]
P1 – [45 °C]	2.2391e-10
P2 – [70 °C]	1.5863e-10
P3 – [105 °C]	3.1142e-10
P4 – [145 °C]	1.8231e-10

Figura 82. Función estructura del cambio del diámetro en las pruebas p1, p2, p3 y p4 del turbulador.

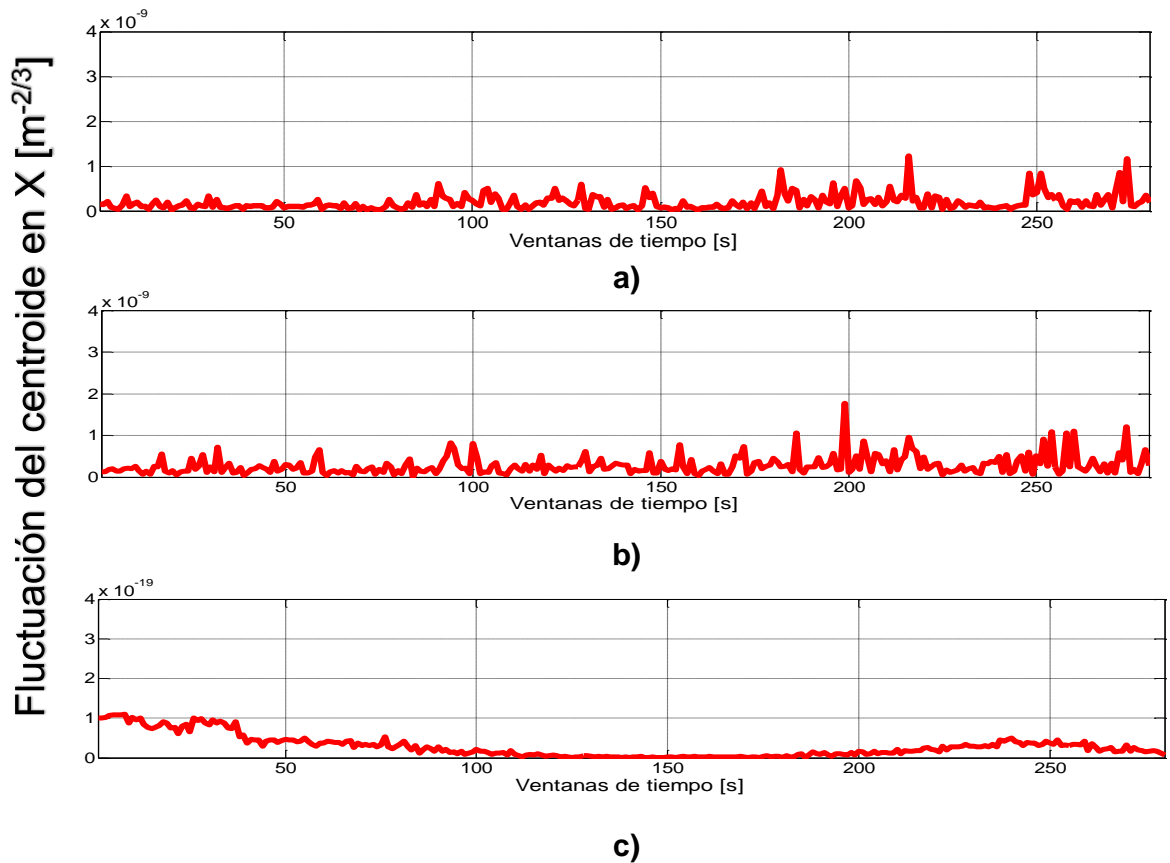


**Tabla 20. Fluctuación promedio global del diámetro del spot – Turbulador.**

<b>Pruebas diámetro</b>	<b>Fluctuación Promedio global [m<sup>-2/3</sup>]</b>
<b>P1 – [45 °C]</b>	3.0165e-21
<b>P2 – [70 °C]</b>	1.9929e-21
<b>P3 – [105 °C]</b>	3.9455e-21
<b>P4 – [145 °C]</b>	3.9086e-21

A partir de la información obtenida del análisis de la función estructura de las pruebas realizadas en el turbulador, se observó que las fluctuaciones globales para la primera y tercera prueba aumentan, mientras que para la segunda prueba y cuarta estas disminuyen, estos resultados son debidos a la forma en la que se expone la temperatura con el medio y la generación de un gradiente de temperatura uniforme (ver capítulo 2.5.2, primer ítem).

**Figura 83. Función estructura del movimiento del centroide a) en X b) en Y c) y diámetro en la prueba ambiente.**



**Tabla 21. Fluctuación promedio global del centroide en X, en Y y el diámetro – Prueba ambiente.**

Pruebas	Fluctuación Promedio global [m <sup>-2/3</sup> ]
Centroide en X	1.9011e-10
Centroide en Y	2.7546e-10
Diámetro	2.8315e-20

#### 4. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- En el presente trabajo de grado, se realizó el estudio del efecto de la desviación natural que tiene un láser por su fabricación (oscilación intracavidad), de ésta manera se obtuvo sólo el efecto de la turbulencia atmosférica (cuando se varia la temperatura) a través de dos prototipos de laboratorio.
- Se estableció una metodología para la creación de escenarios que consideren, por ahora, condiciones de temperatura variable. De esta manera, fue posible afectar el ambiente en el que opera un turbulador y un paralelepípedo de vidrio (sin afectar el índice de refracción del vidrio debido a los orificios que tiene para dejar pasar el haz láser), mediante el uso de fuentes de tensiones, bombillas, resistencias, capacitores y demás diseños de ingeniería electrónica que ayudaron a controlar ésta variable física.
- Se utilizó el sensor de temperatura LM35 por su baja corriente de alimentación que produce un efecto de auto-calentamiento muy reducido, casi despreciable. Esta característica del sensor fue indispensable para esta proyecto, debido a que esta condición hace que no se genere una nueva turbulencia que afecte la exactitud de las medidas en el entorno, pues en muchos sensores de temperatura la disipación de potencia generada por la corriente de excitación genera un calentamiento que incrementa adicionalmente su temperatura, que no es posible de detectar cuando se hace la medición.
- Se realizaron pruebas de calibración con los cuales se pudo afirmar que el sensor registraba medidas confiables de temperatura.

- El efecto del bandeo correspondiente a una temperatura ambiente natural del laboratorio, presenta un desplazamiento del centroide proyectado a partir de las cámaras 1 y 2 similar al visto en la cámara 3, esto debido a que la turbulencia es mucho menor, casi despreciable. Sin embargo, se realizó el mismo procedimiento sobre dos sistemas de control y regulación de temperatura, al realizar 4 pruebas de diferentes temperatura sobre el primer sistema (turbulador) se observó que el desplazamiento del centroide en las 3 cámaras eran muy similares, esto que no era algo de esperarse, se debió a la forma en la que se expone la temperatura con el medio y la generación de un gradiente de temperatura uniforme, en una prueba previa con una variación local espacial, casi puntual, se constató este hecho, puesto que al estar el reóstato hueco con un diámetro interno pequeño y dentro de un material cerámico, la propagación del haz láser no fue afectada por otros fenómenos físicos externos diferentes a la temperatura que hubiesen podido generar una mayor turbulencia tal como ocurre en la variación local (fuente puntual de calor y no controlada espacialmente), garantizando así una temperatura uniforme dentro del dispositivo, y un gradiente de temperatura suave con el ambiente, los extremos del turbulador y el centro del mismo. Caso contrario ocurrió en el paralelepípedo de vidrio, que debido a su geometría y a su forma de generación de temperatura, crean gradientes no uniformes en el interior del dispositivo, por lo tanto sobre este sistema se observó un movimiento en el centroide notable en comparación al turbulador.
- La evolución temporal del diámetro en la cámara CMOS3 se mantuvo en un rango de 595 a 620 pixeles para las tres situaciones sobre las cuales se llevó a cabo el experimento, a una distancia de 396 cm sobre la apertura del láser.
- La posición del centroide presenta mayores fluctuaciones en su eje coordenado Y que en su contraparte X, debido al gradiente positivo de temperatura que existe con la altura en el turbulador. En la caracterización del

mismo, se observó mayor concentración de temperatura en la parte superior del turbulador, generando un gradiente que incrementa la turbulencia.

- Se garantizó que todas las muestras adquiridas estuvieran sincronizadas adecuadamente para los experimentos realizados, según la hipótesis de turbulencia congelada (100 [ms]).
- Utilizando la función estructura se observó que las fluctuaciones del centroide y diámetro incrementan a mayores niveles de temperatura en el paralelepípedo de vidrio. Mientras que en el turbulador se observó que estas fluctuaciones se presentaban con mayor intensidad en la primera y tercera prueba, en cambio en la segunda y cuarta disminuían de manera considerable con respecto a las pruebas mencionadas anteriormente. Esto demuestra que el haz láser al no estar sometido a gradientes de temperatura no uniformes y al no estar expuesto a otras variables físicas debido a que éste es propagado sobre un cilindro que lo aísla de cualquier otra variable externa, situación que influye en gran medida sobre las fluctuaciones del centroide y diámetro respectivamente.
- El diámetro del haz láser es el parámetro más afectado por la temperatura en el paralelepípedo de vidrio, donde se estableció que a mayor temperatura mayores son sus fluctuaciones, lo cual se demostró en las pruebas experimentales respectivas.

### **Trabajos Futuros**

- Analizar en conjunto todas las variables físicas que afectan directamente la turbulencia atmosférica (velocidad del aire, presión), de manera que se pueda establecer el grado de la influencia de la temperatura respecto a las demás y en conjunción con ellas.

- Medir el ángulo de desviación para poder acercarse a la medición de la constante  $C_n^2$  y con este parámetro poder dar una medida del índice de refracción debido a la turbulencia.
- Utilizar la técnica de Telescopía de Fourier de Tiempo Promedio para poder verificar los efectos de la temperatura en la proyección de franjas a partir de un interferómetro de Young.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Failache, H., Lezama, A., Barreiro, S., Valente, P., Lenci, L., Villalba, S. [PEDECIBA25]. (2012, Junio 5). Montevideo, Uruguay. ¿Qué es el láser? [Archivo de video]. Recuperado y consultado el 25/07/2015 de <https://www.youtube.com/watch?v=6cOsR5CfHiM>.
- [2] Fernández, B. (Ed.). Varillas, R. (Ed.). Hernández, C. (Ed.). Pérez, J. (Ed.). Romero, C. (Ed.). (2010). El láser, la luz de nuestro tiempo. Madrid, España: Departamento de ingeniería mecánica, Universidad de Salamanca.
- [3] SPECTRA – PHYSICS. (1996, Mayo) High Power Helium – Neon Lasers. Mountain View, CA.
- [4] Fernández, V. (2000). Formación de imágenes en óptica adaptativa. (Tesis Doctoral). Cantabria, España: Universidad de Cantabria. Departamento de Física Aplicada.
- [5] Pasachoff, J. M., Scheneider, G., Golub, L. (2003). Explanation of the Black-Drop Effect at Transits of Mercury and the Forthcoming Transit of Venus. American Astronomical Society Meeting 203, #01.04; Bulletin of the American Astronomical, Vol. 35, p.1202
- [6] Licchelli, D. (2005). The transit of Venus and the Black Drop Effect. Mem. S.A.It. Suppl. Vol. 6, 17

- [7] LINCOLN LASER COMPANY. (2011). HANDBOOK OF OPTICAL AND LASER SCANNING. Recuperado de <http://www.lincolnlaser.com/files/Lincoln-Laser-PolygonsTech-Paper-2-17-2015.pdf>
- [8] Michael T. S. Ewe, George T. C. Chiu, Jim Grice, Jan P. Allebach, C. S. Chan, Wayne Foote. (2002). Banding Reduction in Electrophotographic Processes Using a Piezoelectric Actuated Laser Beam Deflection Device, *Rev Journal of Imaging Science and Technology*, 46: 433-442
- [9] R. Loce, W. Lama and M. Maltz, Modeling Vibration-Induced half-tone banding in a Xerographic Laser Printer. Arlington VA. *J. Electronic Imaging* 4 (1), 48–61 (1995).
- [10] P. Burns, M. Rabbani and L. Ray, Analysis of Image Noise Due to Position Errors, *Appl. Opt.* 25 (13) 2158–2168 (1986)
- [11] O. J. Tijero Rojas, Y.A. Galeano Traslaviña, Y Torres Moreno. "Método para medir los efectos de la turbulencia," in ENO-CANCOA 2015, Cali, Colombia, 2015.
- [12] H. C. Andrews and B. R. Hunt. *Digital Image Restoration*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1977.
- [13] A. Prokes. Modeling of Atmospheric Turbulence Effect on Terrestrial FSO Link. *Radioengineering* [online]. Společnost pro radioelektronické inženýrství, 2009, 18(1), 42-47
- [14] Tomohiro Shirai, Aristide Dogariu, and Emil Wolf. Mode analysis of spreading of partially coherent beams propagating through atmospheric turbulence. *J. Opt. Soc. Am. A*, 20(6):1094–1102, 2003.

- [15] Michael C. Roggemann and Byron Welsh. Imaging Through Turbulence. CRC Press, 1996.
- [16] Federico Dios, Juan Antonio Rubio, Alejandro Rodríguez, and Adolfo Comeron. Scintillation and beam-wander analysis in an optical group station-satellite uplink. *Applied Optics*, 43(19):3866–3873, Jul 2004.
- [17] Schmidt, J.D. (2010). Numerical Simulation of Optical Wave Propagation whit examples in MATLAB. Bellingham, Washington USA: SPIE PRESS.
- [18] A. N. Kolmogorov, “The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid for very large Reynold numbers” C. R. (Doki) Acad Sci. U.S.S.R 30, pp. 301-305 (1941).
- [19] PALLÁS, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Segunda Edición. Barcelona. Marcombo, 1994.
- [20] Eo Edmund optics. (2012). Barrington, USA. EO-1312M ½" CMOS Monochrome USB Harsh Environment Camera [Citado el 23 de Marzo del 2012] Disponibles en < <http://www.edmundoptics.com/cameras/usb-cameras/eo-usb-2-0-cmos-machine-vision-cameras/62061/> >.
- [21] Top Fotografias. (2012). Sensor CMOS. [Citado el 23 de Marzo del 2012] Disponible en <<http://www.topfotografia.net/Fotografia/teoria-de-la-fotografia/sensor-cmos/sensor-cmos.html>>.
- [22] E.O. Worldwide, EO1312 1/1.8" CMOS Color Lite Edition USB Camera. Barrington, USA, 2014.

- [23] ANDRICKSON, José. CHACÓN, Rafael. Instrumentación Electrónica. Universidad Nacional Experimental del Táchira, 2005.
- [24] TEXAS INSTRUMENTS. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensor. Dalla, Texas, 2016.
- [25] ARDUINO. ATMEGA 2560. San José, CA, USA, 2014.
- [26] Matlab, «MathWorks,» Matlab Family Products, 1994. [En línea]. Available: <http://www.mathworks.com/help/images/ref/strel-class.html#bu7pnvx-1>. [Último acceso: 17 abril 2016].
- [27] U. Manual, “uEye ActiveX Control,” vol. 49, no. February, 2008.
- [28] González, R.C., Wintz, P. (1996). Procesamiento digital de imágenes. Addison-Wesley.
- [29] Alegre, E., Sánchez, L., Fernández, R. Á., Mostaza, J. C. (2003). Procesamiento Digital de Imagen: fundamentos y prácticas con Matlab. Universidad de León. ISBN 84-9773-052-6.
- [30] Rafael C. González, Richard E. Woods, Steven L. Eddins (2009). Digital image processing using Matlab. González, Woods, & Eddins.
- [31] G. Funes, Trabajo de grado: Determinación de la constante de estructura del aire turbulento mediante interferometría Young, Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional de la Plata, 2011.

- [32] Intel ®. Santa Clara, USA. Familia de procesadores Intel ®. [Buscado el 23 de Mayo del 2016] Disponible en <http://www.intel.com/content/www/us/en/homepage.html>>.
- [33] T. Stewart, General Theory of Light Propagation and Imaging Through the Atmosphere, Volume 196. Scotland, UK: Springer Series in Optical Sciences, pp 48-50, 2016
- [34] Hamish, J. (2011). Physics World reveals its top 10 breakthroughs for 2011. Physics World, Vol. 19, No. 12.
- [35] Torres, Y. (2012). Uso de la telescopía de Fourier de tiempo promedio para caracterizar la turbulencia horizontal a baja altura. (Proyecto en curso, financiado por Colciencias y la UIS). Colombia: Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales, Universidad industrial de Santander.

## BIBLIOGRAFÍA

A. N. Kolmogorov, "The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid for very large Reynold numbers" C. R. (Doki) Acad Sci. U.S.S.R 30, pp. 301-305 1941.

A. Prokes. Modeling of Atmospheric Turbulence Effect on Terrestrial FSO Link. Radioengineering [online]. Společnost pro radioelektronické inženýrství, 2009, 18(1), 42-47

ALEGRE, E., Sánchez, L., Fernández, R. Á., Mostaza, J. C. Procesamiento Digital de Imagen: fundamentos y prácticas con Matlab. Universidad de León. 2003 ISBN 84-9773-052-6.

ANDRICKSON, José. CHACÓN, Rafael. Instrumentación Electrónica. Universidad Nacional Experimental del Táchira, 2005.

ARDUINO. ATMEGA 2560. San José, CA, USA, 2014.

E.O. Worldwide, EO1312 1/1.8" CMOS Color Lite Edition USB Camera. Barrington, USA, 2014.

EO Edmund optics. Barrington, USA. EO-1312M 1/2" CMOS Monochrome USB Harsh Environment Camera 2012 [Citado el 23 de Marzo del 2012] Disponibles en <<http://www.edmundoptics.com/cameras/usb-cameras/eo-usb-2-0-cmos-machine-vision-cameras/62061/>>.

FAILACHE, H., LEZAMA, A., BARREIRO, S., VALENTE, P., LENCI, L., VILLALBA, S. [PEDECIBA25]. (). Montevideo, Uruguay. ¿Qué es el láser? 2012, Junio 5 [Archivo de video]. Recuperado y consultado el 25/07/2015 de <https://www.youtube.com/watch?v=6cOsR5CfHiM>.

FEDERICO Dios, Juan Antonio Rubio, Alejandro Rodríguez, and Adolfo Comeron. Scintillation and beam-wander analysis in an optical group station-satellite uplink. *Applied Optics*, 43(19):3866–3873, Jul 2004.

FERNÁNDEZ, B. (Ed.). Varillas, R. (Ed.). Hernández, C. (Ed.). Pérez, J. (Ed.). Romero, C. (Ed.). (). *El láser, la luz de nuestro tiempo*. Madrid, España: Departamento de ingeniería mecánica, Universidad de Salamanca. 2010

FERNÁNDEZ, V. *Formación de imágenes en óptica adaptativa*. (Tesis Doctoral). Cantabria, España: Universidad de Cantabria. Departamento de Física Aplicada. 2000

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

GONZÁLEZ, R.C., Wintz, P. *Procesamiento digital de imágenes*. Addison-Wesley. 1996

Hamish, J. (2011). *Physics World reveals its top 10 breakthroughs for 2011*. *Physics World*, Vol. 19, No. 12.

H. C. Andrews and B. R. Hunt. *Digital Image Restoration*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1977.

Intel ®. Santa Clara, USA. Familia de procesadores Intel ®. [Buscado el 23 de Mayo del 2016] Disponible en <http://www.intel.com/content/www/us/en/homepage.html>>.

Licchelli, D. The transit of Venus and the Black Drop Effect. Mem. S.A.It. Suppl. Vol. 6, 17 2005

LINCOLN LASER COMPANY. HANDBOOK OF OPTICAL AND LASER SCANNING. 2011 Recuperado de <http://www.lincolnlaser.com/files/Lincoln-Laser-PolygonsTech-Paper-2-17-2015.pdf>

MATLAB, «MathWorks,» Matlab Family Products, 1994. [En línea]. Available: <http://www.mathworks.com/help/images/ref/strel-class.html#bu7pnvx-1>. [Último acceso: 17 abril 2016].

MICHAEL C. Roggemann and Byron Welsh. Imaging Through Turbulence. CRC Press, 1996.

MICHAEL T. S. EWE, GEORGE T. C. CHIU, JIM GRICE, JAN P. ALLEBACH, C. S. CHAN, WAYNE FOOTE. Banding Reduction in Electrophotographic Processes Using a Piezoelectric Actuated Laser Beam Deflection Device, Rev Journal of Imaging Science and Technology, 46: 433-442 2002

O. J. Tíjaro Rojas, Y.A. Galeano Traslaviña, Y Torres Moreno. "Método para medir los efectos de la turbulencia," in ENO-CANCOA 2015, Cali, Colombia, 2015.

P. Burns, M. Rabbani and L. Ray, Analysis of Image Noise Due to Position Errors, Appl. Opt. 25 (13) 2158–2168 1986

PALLÁS, Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. Segunda Edición. Barcelona. Marcombo, 1994.

Pasachoff, J. M., Scheneider, G., Golub, L. (). Explanation of the Black-Drop Effect at Transits of Mercury and the Forthcoming Transit of Venus. American Astronomical Society Meeting 203, #01.04; Bulletin of the American Astronomical, Vol. 35, p.1202 2003

R. Loce, W. Lama and M. Maltz, Modeling Vibration-Induced half-tone banding in a Xerographic Laser Printer. Arlington VA. J. Electronic Imaging 4 (1), 48–61 1995

Rafael C. González, Richard E. Woods, Steven L. Eddins Digital image processing using Matlab. González, Woods, & Eddins. 2009

SCHMIDT, J.D. Numerical Simulation of Optical Wave Propagation whit examples in MATLAB. Bellingham, Washington USA: SPIE PRESS. 2010

SPECTRA – PHYSICS. High Power Helium – Neon Lasers. Mountain View, CA. 1996, Mayo

T. Stewart, General Theory of Light Propagation and Imaging Through the Atmosphere, Volume 196. Scotland, UK: Springer Series in Optical Sciences, pp 48-50, 2016

TEXAS INSTRUMENTS. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensor. Dalla, Texas, 2016.

Tomohiro Shirai, Aristide Dogariu, and Emil Wolf. Mode analysis of spreading of partially coherent beams propagating through atmorspheric turbulence. J. Opt. Soc. Am. A, 20(6):1094–1102, 2003.

Top Fotografias. Sensor CMOS 2012. [Citado el 23 de Marzo del 2012] Disponible en <http://www.topfotografia.net/Fotografia/teoria-de-la-fotografia/sensor-cmos/sensor-cmos.html>.

U. Manual, "uEye ActiveX Control," vol. 49, no. February, 2008.

## ANEXOS

### ANEXO A. DISPOSITIVOS Y SOFTWARE UTILIZADOS

*Tabla 22. Especificaciones del Láser Modelo 127. Tomado de la referencia [3].*

Especificaciones del Láser	Características
<b>Número del modelo: 127 – 35</b>	
<b>Características Ópticas</b>	
Potencia de salida	35 [mW]
Longitud de Onda	632.8 [nm]
Diámetro del haz	1.25 ± 0.10 [mm]
Divergencia del haz	0.66 ± 0.05 [mrad]
Ubicación de la cintura del haz	Superficie exterior del espejo de salida
<b>Parámetros de salidas</b>	
Potencia en el arranque	> 75 %
Potencia 20 minutos después de la puesta en marcha	> 95 %
<b>Ambiente</b>	
<b>Operando</b>	
Temperatura	10° a 50°C [50° a 122°F]
Humedad relativa	10% a 90%
<b>Sin Operar</b>	
Temperatura	-20° a 60°C [-4° a 140°F]
Humedad relativa	5% a 90%

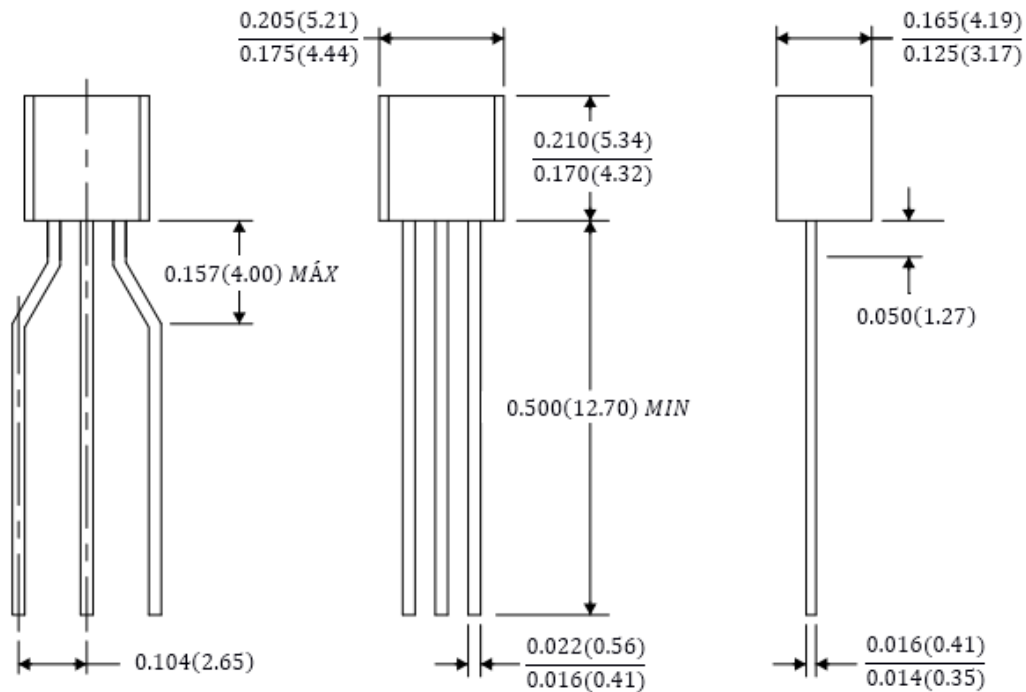
Tabla 23. Propiedades del sensor CMOS EO-1312. Tomado de la referencia [22].

<b>Características del sensor CMOS</b>	
Número del modelo	EO1312C
Píxeles [H x V]	1280 x 1024
Tamaño del píxel, H x V [ $\mu\text{m}$ ]	5.3 x 5.3
Profundidad del píxel	8bit
Cuadros por segundos [fps]	25
Salida de video	USB 2.0
Dimensiones [mm]	44 x 44 x 25.4
Resolución (Megapíxeles)	1.3

Tabla 24. Características del LM35. Tomado de la referencia [24].

<b>Características de LM35</b>	
Calibrado directamente en grados Celsius (Centígrados)	
Factor de Escala Lineal	+ 10 [mV/°C]
Precisión Garantizada	0.5 [°C]
Rango total de medida	-55 [°C] A 150 [°C]
Rango de operación	4 [V] a 30 [V]
Corriente de drenaje	Menor que 60 [ $\mu\text{A}$ ]
Bajo recalentamiento	0.08 [°C]
Baja impedancia de salida	0.1 [ $\Omega$ ] por 1 [mA] de carga

Figura 84. Dimensiones sensor de temperatura LM35. Tomado de la referencia [24].



#### Arduino Mega 2560:

El Arduino Mega 2560 es una placa electrónica (Ver figura 85 del anexo AANEXO ) que proporciona pines digitales y analógicos (de entrada y salida) que pueden interactuar con diversas tarjetas de expansión (circuitos), en la tabla 25 del Anexo AANEXO se muestran las características y especificaciones de ésta tarjeta de desarrollo.

En la práctica se utilizó esta placa de desarrollo por la facilidad que tienen éstas para medir valores ambientales al recibir información de una variedad de sensores y afectar sus alrededores controlando luces, motores y otros actuadores. El entorno de programación es sumamente amigable y posee su propio lenguaje de alto nivel llamado *Processing*<sup>TM</sup>, cosa que no limita a que Arduino pueda programarse en cualquier tipo de lenguaje.

Tabla 25. Especificaciones Técnicas Arduino Mega 2560. Tomado de la referencia [25].

Especificaciones técnicas	
Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de operación	5V
Pines digitales	54 (de los cuales 15 proporcionan salidas PWM)
Pines de entrada analógica	16
Memoria flash	256 KB de los cuales 8 KB son usados para el arranque
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad del reloj	16 MHz

Arduino posee librerías para muchos componentes externos que se le quiera acoplar (placas extras con funcionalidades específicas: Ethernet, GSM, Control de Relés, Wi-fi), en las que se encuentra gran información en videos tutoriales en varios idiomas, lo que hace fácil su aprendizaje.

Figura 85. Tarjeta de desarrollo para controlador Arduino (ATMEGA 2560).



### Equipos de cómputo:

A continuación se muestran las principales características de los computadores y los software de adquisición utilizados en la práctica.

Tabla 26. Especificaciones Técnicas de los equipos de cómputo.

Parámetros de los equipos de cómputo	Características
<b>Equipo 1: Cámara 1</b>	
<b>Marca</b>	Lenovo
<b>Sistema Operativo</b>	Windows 8
<b>Edición de Windows</b>	Windows 8.1 Pro
<b>Procesador</b>	Intel® Core(TM) i5-4200U CPU @ 2.30GHz
<b>Memoria Instalada (RAM)</b>	8 GB
<b>Tipo de sistema</b>	Sistema operativo de 64 bits
<b>Software de adquisición</b>	uEye ActiveX Control [27]
<b>Equipo 2: Cámara 2</b>	
<b>Marca</b>	Asus
<b>Sistema Operativo</b>	Windows 8
<b>Edición de Windows</b>	Windows 8.1 Single Language
<b>Procesador</b>	Intel® Core(TM) i7-4710HQ CPU @ 2.50GHz
<b>Memoria Instalada (RAM)</b>	8 GB
<b>Tipo de sistema</b>	Sistema operativo de 64 bits
<b>Software de adquisición</b>	uEye ActiveX Control [27]
<b>Equipo 3: Cámara 3</b>	
<b>Marca</b>	Dell

<b>Sistema Operativo</b>	Windows 8
<b>Edición de Windows</b>	Windows 8.1 Single Language
<b>Procesador</b>	Intel® Core(TM) i7-3632QM CPU @ 2.20GHz
<b>Memoria Instalada (RAM)</b>	16 GB
<b>Tipo de sistema</b>	Sistema operativo de 64 bits
<b>Software de adquisición</b>	uEye ActiveX Control [27]
<b>Equipo 4: Arduino</b>	
<b>Marca</b>	Dell
<b>Sistema Operativo</b>	Windows 8
<b>Edición de Windows</b>	Windows 8.1 Pro
<b>Procesador</b>	Intel® Core(TM) i5-4200U CPU @ 1.60GHz
<b>Memoria Instalada (RAM)</b>	6 GB
<b>Tipo de sistema</b>	Sistema operativo de 64 bits
<b>Software de adquisición</b>	uEye ActiveX Control [27]

### **Sistema de procesamiento y cálculo (MATLAB™):**

Matlab™ es una herramienta de software matemático capaz de analizar y diseñar sistemas y productos de transformación de nuestro mundo [26].

**Cálculos, gráficas y programación:** La plataforma MATLAB™ está optimizada para la solución de problemas de ingeniería y científicos. Su lenguaje basado en matrices es la forma más natural del mundo para expresar matemática computacional. Gráficos integrados hacen que sea fácil de visualizar y obtener información a partir de datos. Una vasta biblioteca de cajas de herramientas prediseñados le permite comenzar de inmediato con algoritmos esenciales a su dominio. El entorno de escritorio invita a la experimentación, la exploración y el

descubrimiento. Estas herramientas y capacidades de MATLAB™ están rigurosamente probados y diseñados para trabajar [26].

## ANEXO B. ALGORITMO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

```

clc
close all;
clear all;

muestras=3000;
periodo=1;
expl=0.290;
retardo=0.1;

h=actxcontrol('UEYECAM.uEyeCamCtrl.1','position',[0 0 1024 1280]);
% h.methods('-full');
h.InitCamera(1); %Camera near: #1. Camera far: #2
h.SetPixelClock(34);
h.SetFrameRate(19.78);
pause(1);
h.SetExposureTime(expl); %ExposureTime. Camera near: 0.6 - Camera
far: 0.32 - Camera far 151Cms: 0.4
image=h.StopLiveVideo(1); %Detenemos la camara
Width=h.GetImageWidth; %Ancho de la Imagen
Height=h.GetImageHeight; %Altura de la Imagen
image=uint8(zeros(Width,Height));

% h.SetImageSize(Width,Height);
%
Si=h.GetColorMode; %Confirmamos la dimension de la matriz.
if Si==0 %4 Bytes por pixel RGB 32 mode
    Col=4;
elseif Si==1 %3 Bytes por pixel RGB 24 mode
    Col=3;
elseif Si==6 %Escala de grises
    Col=1;
else
    uiwait(errordlg('tamaño error',''));
end
ImSize=int32(Height*Width*Col); %Creamos variable formateada a 8 bits con
la
%dimension de la imagen RGB.
hMem=h.GetImageMem; %Asignamos memoria para guardar la imagen.
h.SetMemoryMode(round(4096000/(Width*Height)),50);
t =
timer('StartDelay',retardo,'Period',periodo,'TasksToExecute',muestras,'Ex
ecutionMode','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);           %Captura una imagen con un timer de 10 fps
    (aprox).
    hMem=h.GetImageMem;         %Asignamos memoria para guardar la imagen.
    u=CopyImage_Matlab(TMem,ImSize);%Recupera en un vector uint8 los
    datos de la imagen grabada
    I=u>30;
    if(sum(I)>2000)
        tic;
        start(t);
        break
    end
end

function iol_52(obj,event,T,ImSize)
    r1=toc;
    hMem1=h.GetImageMem;         %Asignamos memoria para guardar la
    imagen.
    h.FreezeImage(1);           %Captura una imagen con un timer de 10 fps
    (aprox).
    u1=CopyImage_Matlab(hMem1,ImSize);%Recupera en un vector uint8 los
    datos de la imagen grabada
    u11=u1(3:4:end);
    r2=toc;
    save(['C:\Users\juanc\Documents\MATLAB\3pc\cam\'
    num2str(obj.TasksExecuted) '.mat'], 'u11', 'r1', 'r2');
    disp(obj.TasksExecuted);

end

```

## ANEXO C. ALGORITMO DE DATOS DE TEMPERATURA

```
clc;
clear all;
close all;
delete(instrfind({'Port'},{'COM4'}));

muestras=3000; %numero de muestras
periodo=1.0004;
retardo=0.09;

N=2;
Vt1=(zeros(N,1));
Vt2=(zeros(N,1));
Vt3=(zeros(N,1));
Vt3=(zeros(N,1));

ar= arduino('COM4');

ta=timer('StartDelay',retardo,'Period',periodo,'TasksToExecute',muestras,
'ExecutionMode','fixedRate');
ta.BusyMode='error';
ta.TimerFcn=@arduino_connect,ar ,vt1 ,vt2 , vt3, vt4,N};

while 1

    disp('esperando');
    lec=ar.analogRead(2);
    disp(lec);

    if lec<250
        tic;
        start(ta);
        disp('inicio');
        break;
    end
end
```

```

function arduino_connect(obj,event,vt1,vt2,vt3,vt4,N)
time1=toc;

for s=1:N
    vt1(s) = ar.analogRead(0);
    vt2(s) = ar.analogRead(1);
    vt3(s) = ar.analogRead(2);
    vt4(s) = ar.analogRead(3);

end

promt1=mean (vt1);
temp1 = (500/1023)*promt1;
promt2=mean (vt2);
temp2 = (500/1023)*promt2;
promt3=mean (vt3);
temp3 = (500/1023)*promt3;
promt4=mean (vt4);
temp4 = (500/1023)*promt4;

time2=toc;
save(['C:\Users\juanc\Documents\MATLAB\3pc\prureina\' ,num2str(obj.TasksExecuted),'.mat'],'temp1','temp2','temp3','temp4','time1','time2');

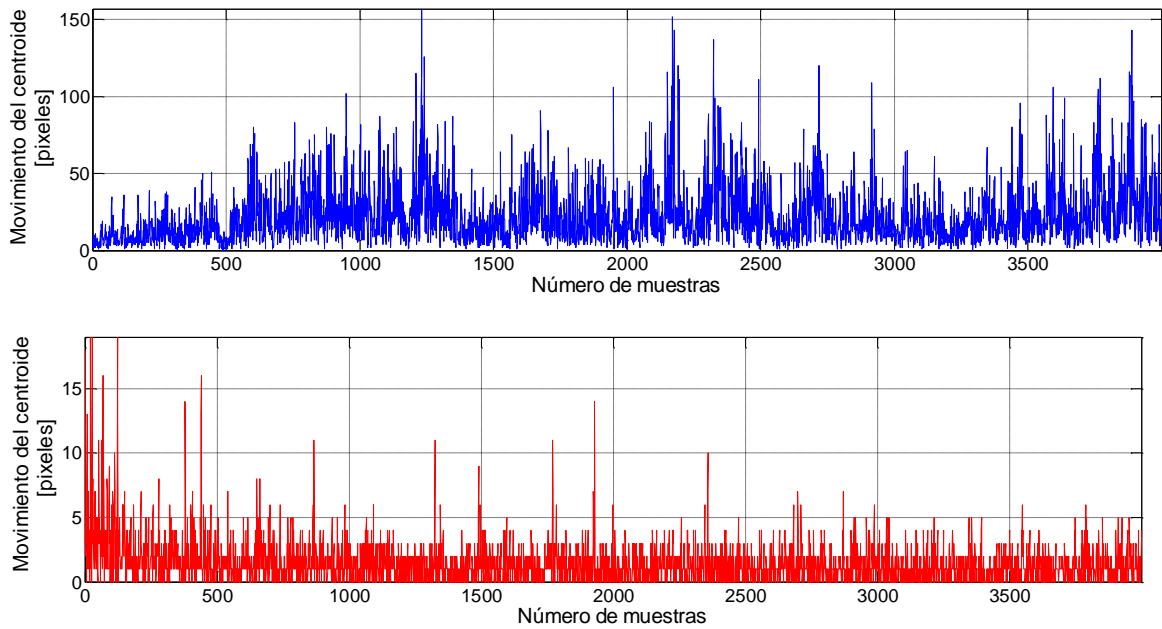
disp([obj.TasksExecuted temp1 temp2 temp3 temp4]);

end

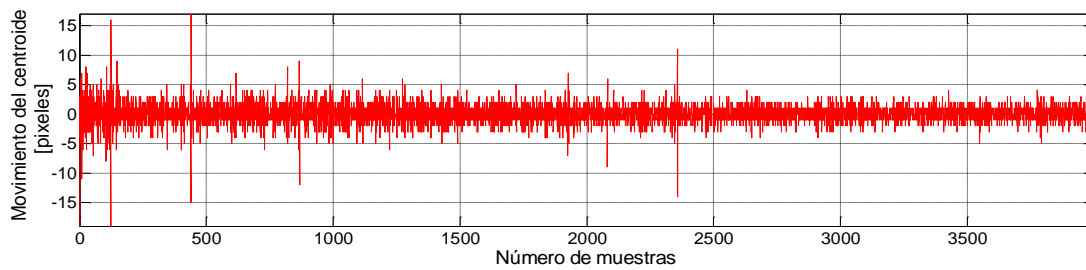
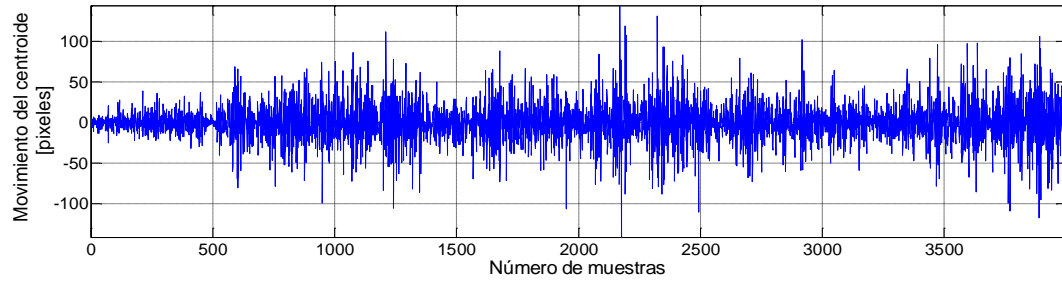
```

**ANEXO D. PARALELEPÍPEDO DE VIDRIO – PRUEBA INCREMENTANDO LA TEMPERATURA DE 25°C A 100°C (ESTUDIO DEL CENTROIDE).**

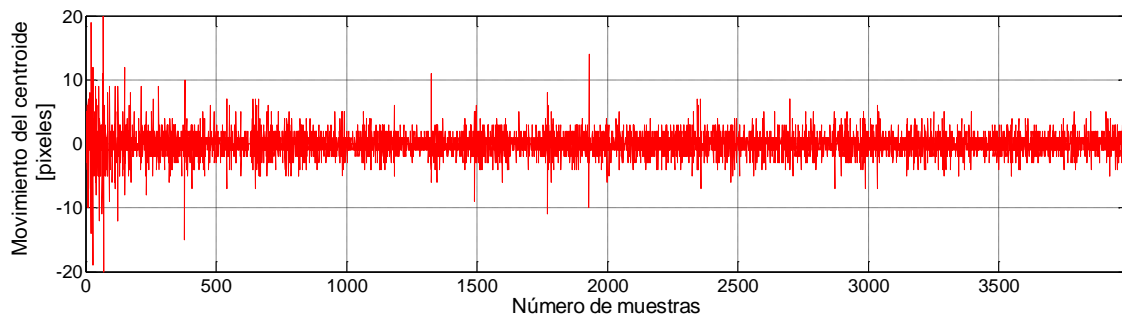
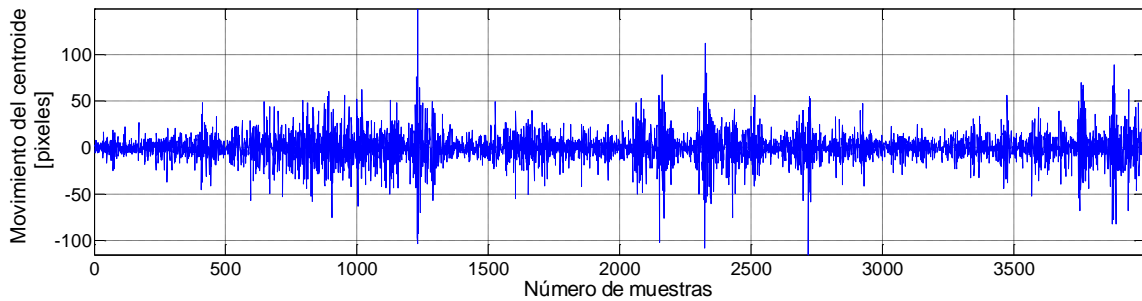
**Figura 86. Posición del centroide en CMOS3 – Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



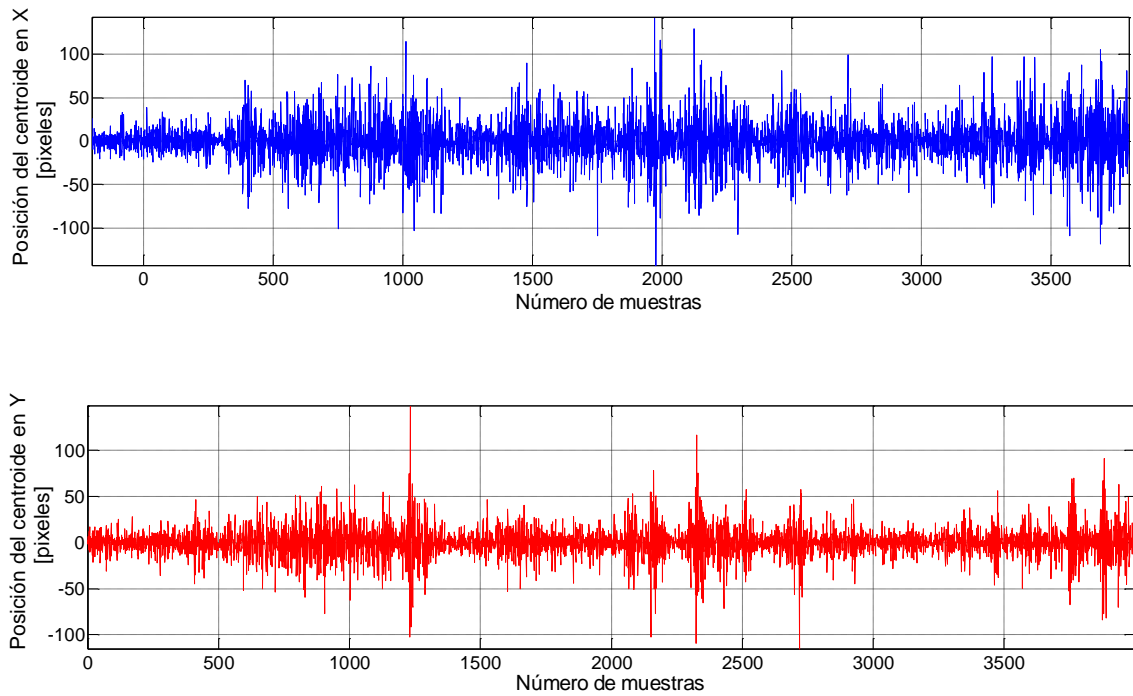
**Figura 87. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



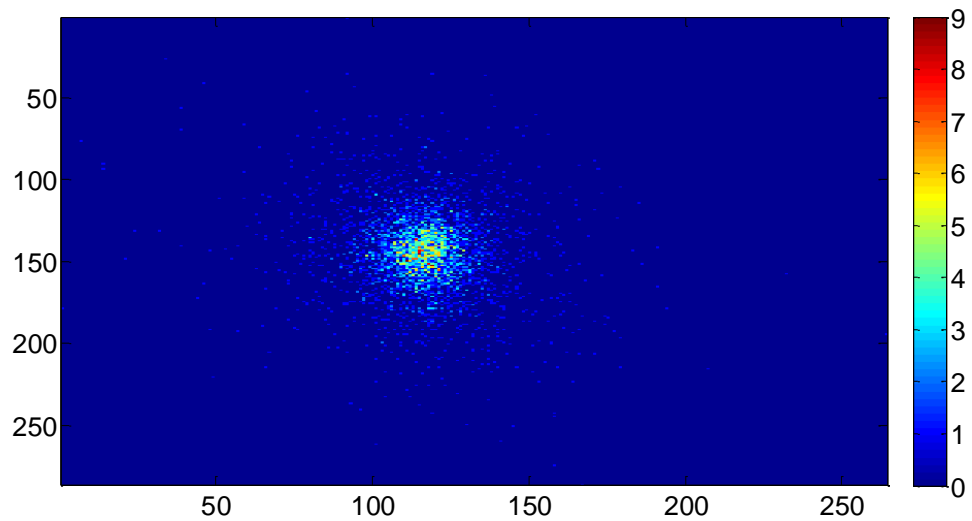
**Figura 88. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo)**



**Figura 89. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera**

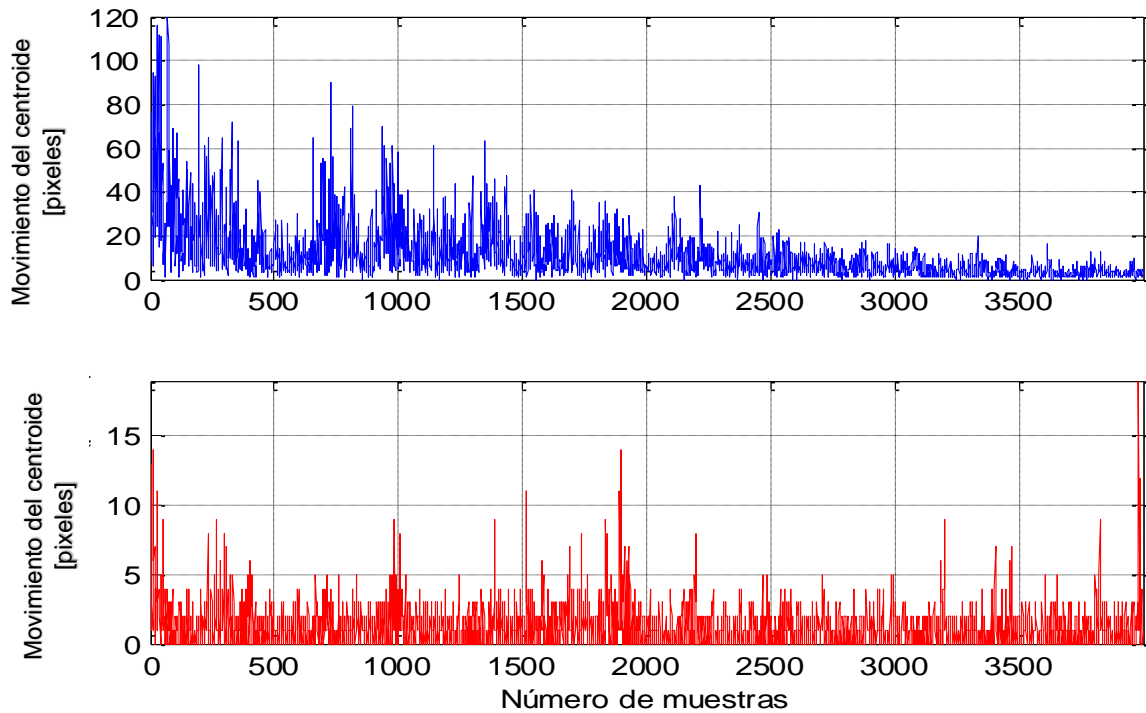


**Figura 90. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)**

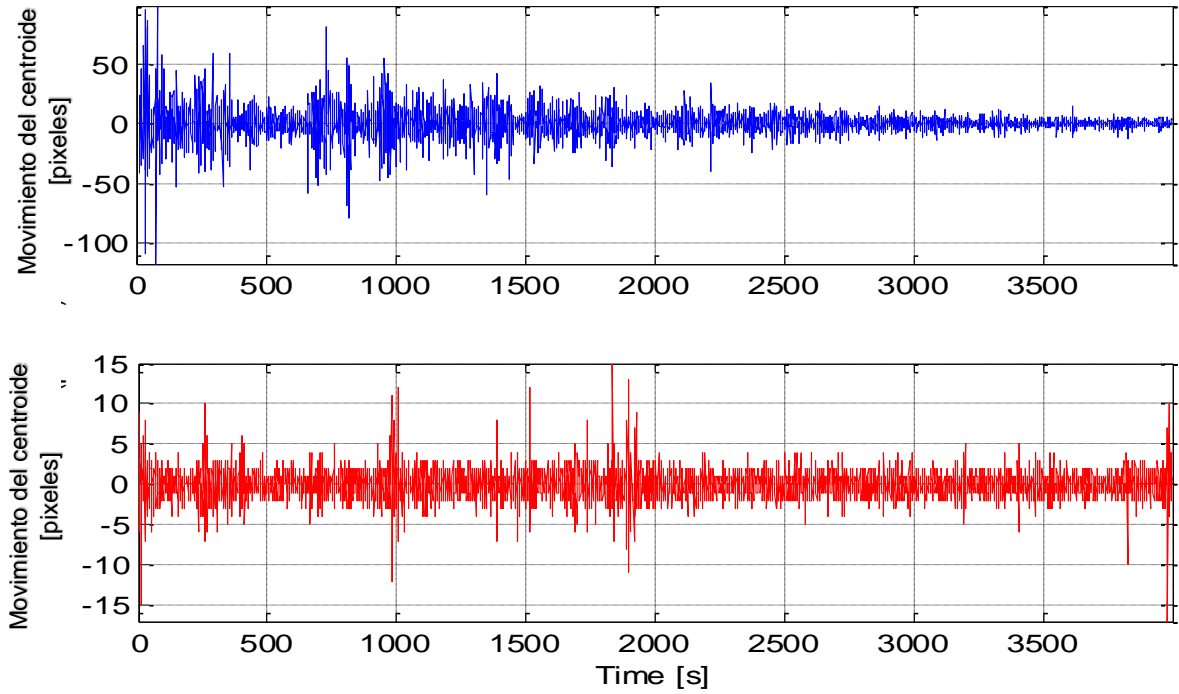


**PARALELEPÍPEDO DE VIDRIO – PRUEBA DISMINUYENDO LA TEMPERATURA DE 100°C A 25°C (ESTUDIO DEL CENTROIDE).**

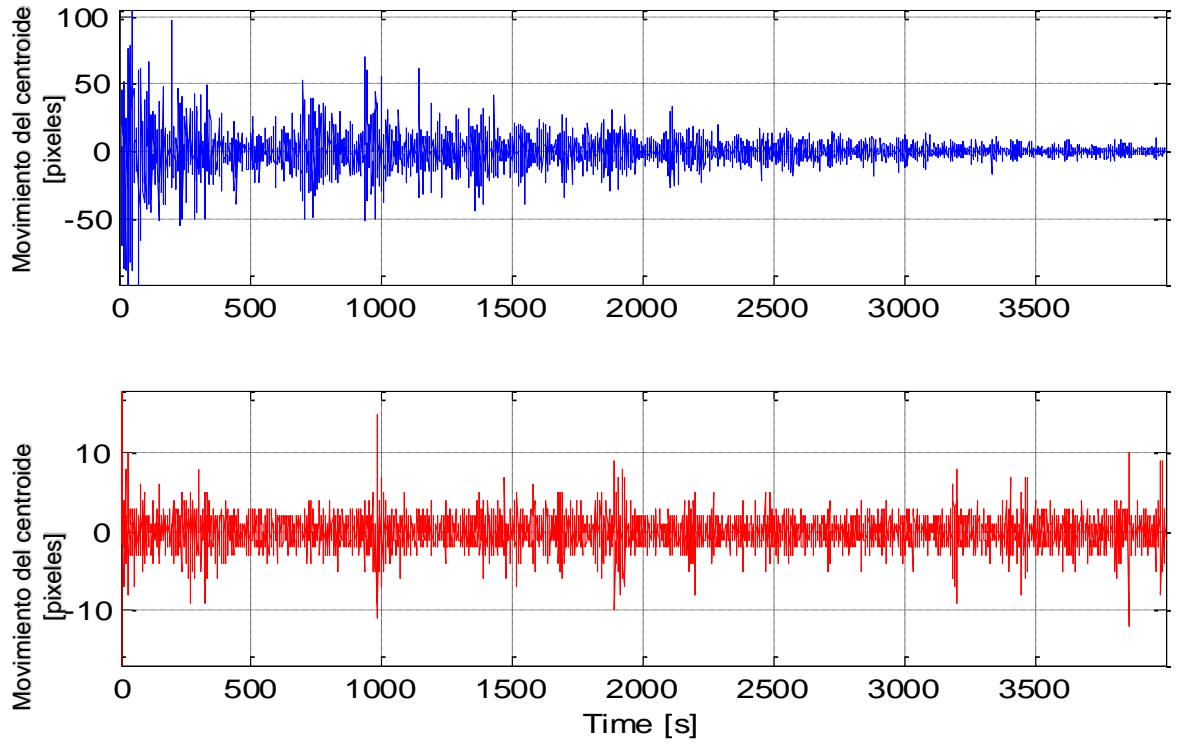
**Figura 91. Posición del centroide en CMOS3 – Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



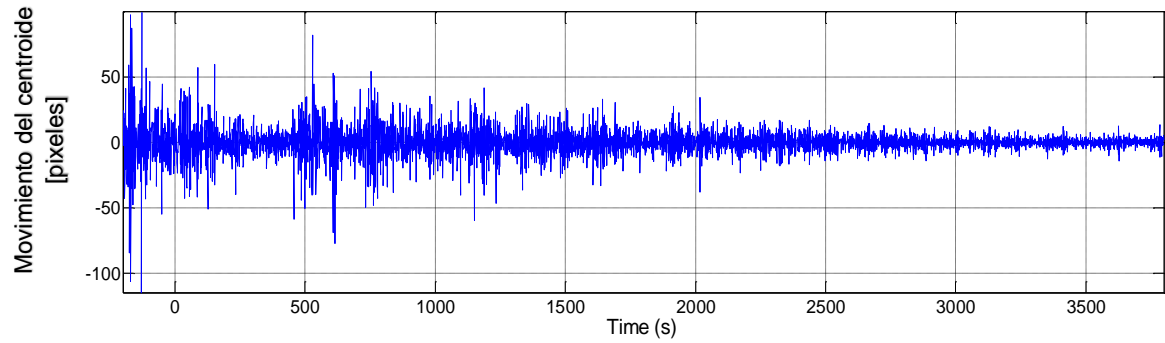
**Figura 92. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



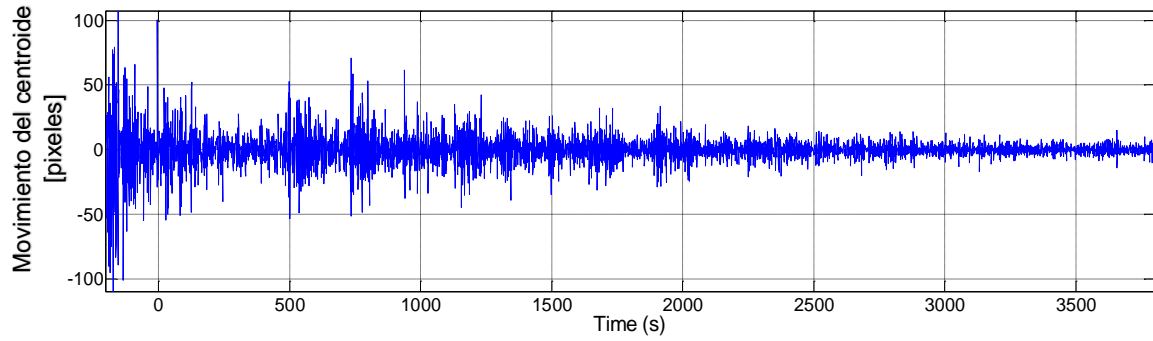
**Figura 93. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



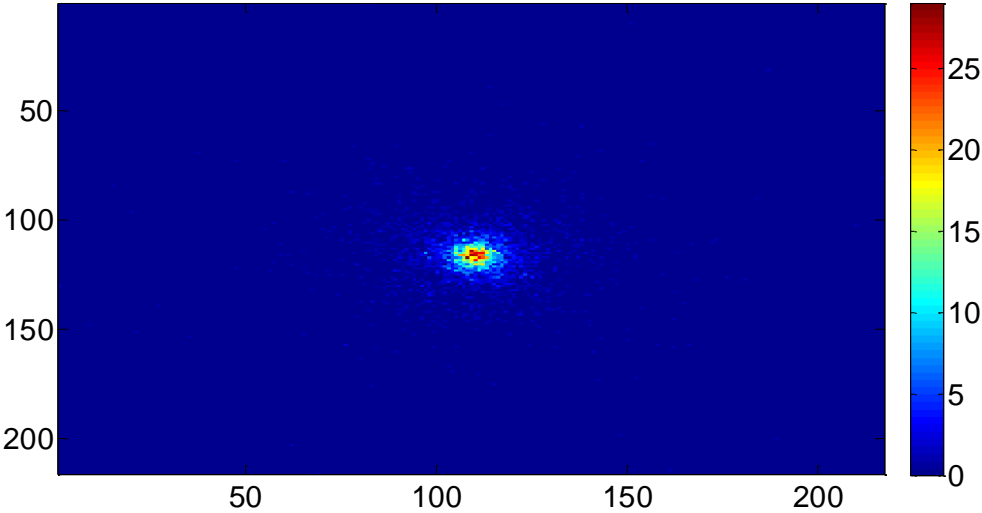
**Figura 94. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera**



**Figura 95. Movimiento del centroide en el Eje Y. Sin bandeo – Sólo atmósfera**

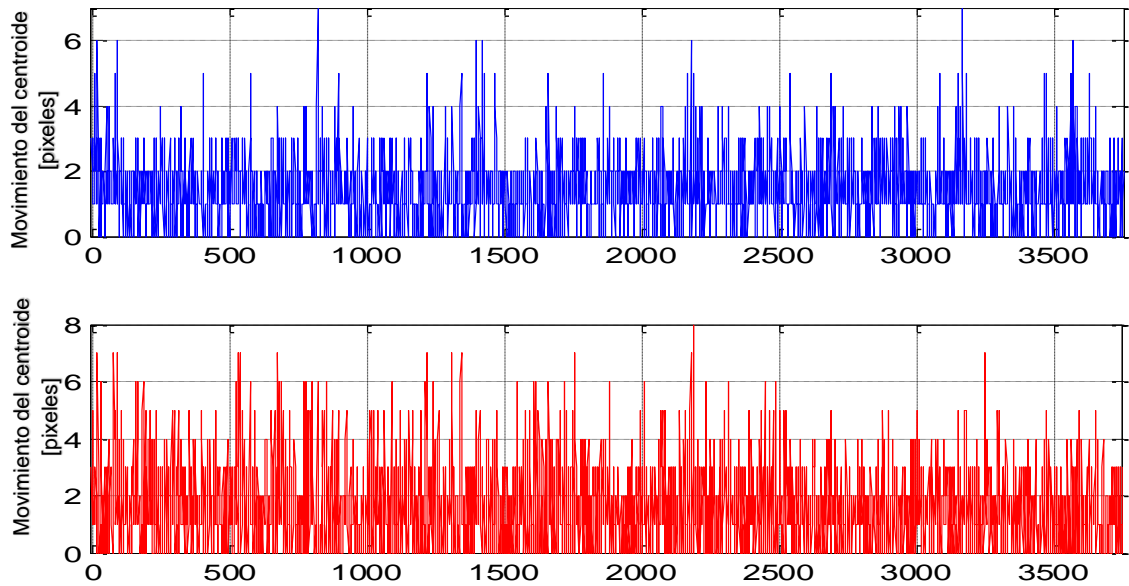


**Figura 96. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)**

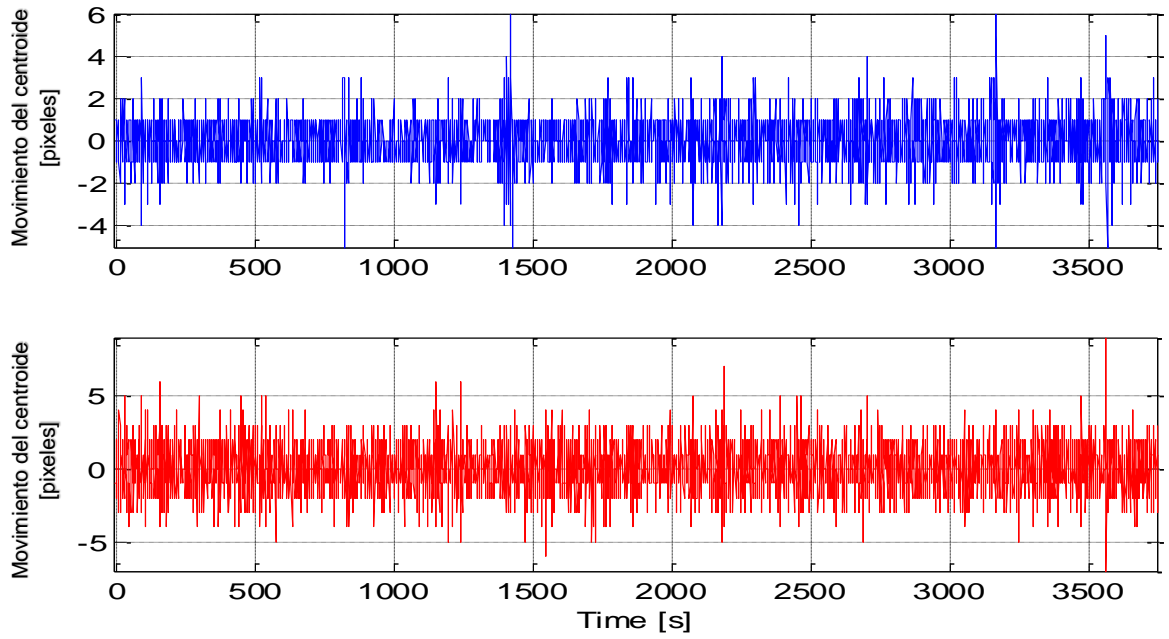


**ANEXO E. TURBULADOR – PRUEBA INCREMENTANDO LA TEMPERATURA DE 25°C A 145°C (ESTUDIO DEL CENTROIDE).**

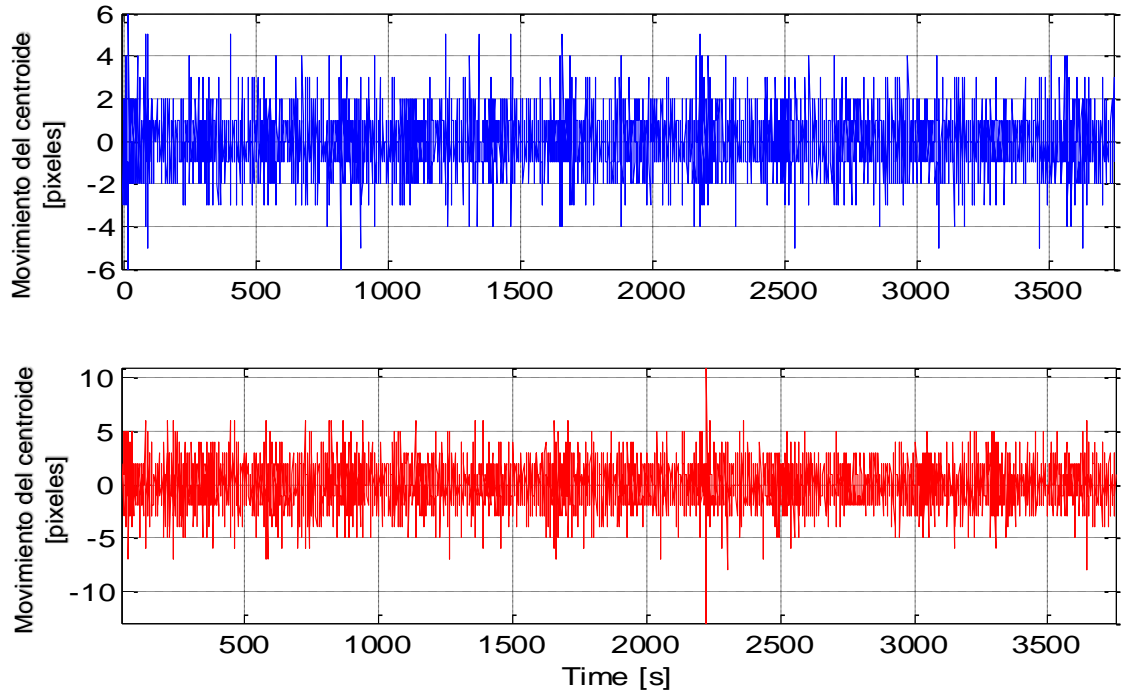
**Figura 97. Posición del centroide en CMOS3 – Medida del radio en el sensor lejano (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



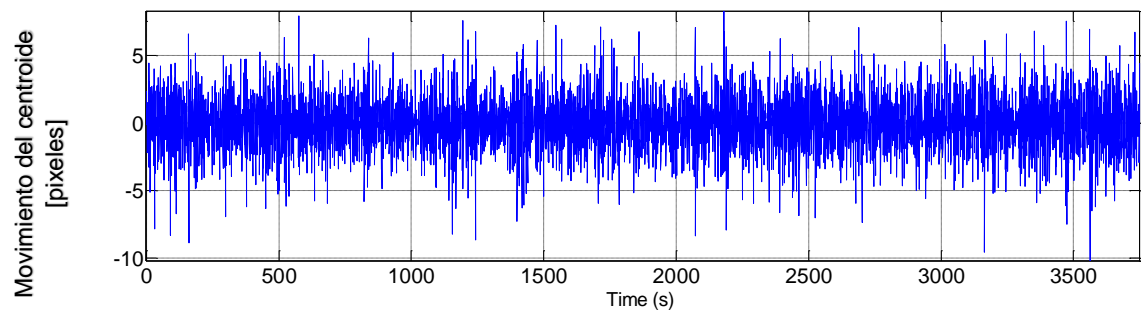
**Figura 98. Movimiento del centroide en el eje X - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



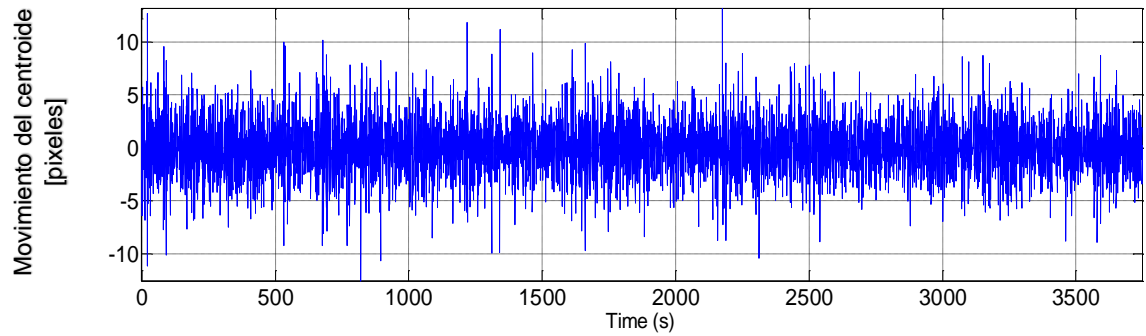
**Figura 99. Movimiento del centroide en el eje Y - medido en cámara lejana (arriba) y calculado con cámaras cercanas (abajo).**



**Figura 100. Movimiento del centroide en el Eje X. Sin bandeo – Sólo atmósfera**



**Figura 101. Movimiento del centroide en el Eje Y. Sin bandeo – Sólo atmósfera**



**Figura 102. Distribución 2D de los centros de masa (sólo efectos de la atmósfera)**

